

MotroLink

Manual de Calibração

MOTROLINK

Sumário

I	Fundamentos	1
1	Introdução	2
1.1	Para quem é este manual	2
1.2	Compatibilidade — família evoTech	2
1.3	Pré-requisitos	3
1.4	Documentação relacionada	4
1.5	Fluxo geral de calibração	5
1.6	Convenções usadas neste manual	6
1.7	Segurança	7
2	Primeira Calibração — Da ECU Nova ao Motor Funcionando	9
2.1	Visão Geral do Processo	9
2.2	Importar o Mapa Base	10
2.3	Configurar o Motor	11
2.4	Configurar a Roda Fônica	12
2.5	Mapear Entradas e Saídas	14
2.6	Configurar Sensores Essenciais	16
2.7	Configurar Limites de Segurança	17
2.8	Configurar a Partida	18
2.9	Configurar Marcha Lenta Básica	20
2.10	Verificar a Tabela VE Inicial	21
2.11	Gravar na ECU (Write + Burn)	22
2.12	Primeira Partida — Checklist e Procedimento	22
2.13	Primeiros Ajustes Após a Partida	24
2.14	Próximos Passos	26
II	Configuração do Motor e Sensores	28
3	Configuração Inicial do Motor	29
3.1	Informações do Veículo	29
3.2	Roda Fônica	36
3.3	Roda Fônica Avançada	40
3.4	Saídas	42
3.5	Bateria e Alternador	44
3.6	Limites e Proteções	46
3.7	Ventilador	50
3.8	Ar Condicionado	52
3.9	Entrada da Chave de Ignição	54
4	Sensores	56
4.1	CLT — Sensor de Temperatura do Líquido de Arrefecimento	58
4.2	IAT — Sensor de Temperatura do Ar Admitido	60
4.3	MAP — Sensor de Pressão do Coletor de Admissão	62
4.4	Sensor Barométrico	65

4.5	TPS — Sensor de Posição da Borboleta	67
4.6	Pedal do Acelerador	70
4.7	MAF — Sensor de Fluxo de Massa de Ar	72
4.8	Sensores de O ₂ /Lambda	74
4.9	Pressão e Temperatura de Óleo	77
4.10	Sensores de Combustível	79
4.11	Sensor de Velocidade	82
4.12	Sensores Turbo	84
4.13	Sensores Auxiliares	86
4.14	Configurações de Entradas Analógicas	88

III Calibração de Combustível e Ignição 90

5 Combustível 91

5.1	Fundamentos Teóricos	91
5.2	Hardware de Injeção	95
5.3	Configuração dos Injetores	96
5.4	Tabela VE – Eficiência Volumétrica	98
5.5	Lambda/AFR Alvo	102
5.6	Correção de Aquecimento (Warmup Enrichment)	104
5.7	Correção por IAT (Temperatura do Ar de Admissão)	105
5.8	Correção Barométrica	106
5.9	Estimativa de Temperatura de Carga (Charge Temperature)	107
5.10	STFT – Controle em Malha Fechada (Short Term Fuel Trim)	108
5.11	LTFT – Ajustes de Longo Prazo (Long Term Fuel Trim)	110
5.12	DFCO – Corte de Combustível em Desaceleração	112
5.13	Timing de Injeção (Ângulo de Injeção)	113
5.14	Enriquecimento de Aceleração (Acceleration Enrichment – AE)	115
5.15	Injeção Escalonada (Staged Injection)	118
5.16	Trim por Cilindro (Per-Cylinder Trim)	119
5.17	Tabela MAP Estimado (Estimated MAP)	121

6 Ignição 124

6.1	Teoria da Ignição	124
6.2	Configurações de Ignição	129
6.3	Tabela de Avanço	130
6.4	Correção por CLT (Temperatura do Líquido de Arrefecimento)	134
6.5	Correção por IAT (Temperatura do Ar de Admissão)	136
6.6	Dwell (Tempo de Carga da Bobina)	137
6.7	Multi-Centelha (<i>Multi-Spark</i>)	140
6.8	Controle de Detonação (<i>Knock Control</i>)	141
6.9	Tabelas de <i>Blend</i> de Ignição (<i>Ignition Blend Tables</i>)	144
6.10	Trim por Cilindro	145

7 Partida do Motor 148

7.1	Teoria da Partida a Frio e a Quente	148
7.2	Configurações de Partida	150
7.3	Pulso de Priming	151

7.4	Combustível Base de Cranking	153
7.5	Multiplicador de Cranking por CLT	154
7.6	Multiplicador de Cranking por TPS	155
7.7	Avanço de Ignição na Partida	156
7.8	Enriquecimento Pós-Partida	157
8	Marcha Lenta	160
8.1	Teoria do Controle de Marcha Lenta	160
8.2	Configurações	162
8.3	Hardware de Marcha Lenta	164
8.4	RPM Alvo	165
8.5	Posição Base da Válvula	167
8.6	IAC durante Cranking	168
8.7	Taper Cranking → Funcionamento	169
8.8	Timing em Malha Fechada	169
8.9	Multiplicador PID IAC	170
8.10	IAC em Desaceleração	171
8.11	VE de Marcha Lenta	172
8.12	Avanço na Marcha Lenta	172
IV	Controles Avançados	174
9	Corpo de Borboleta Eletrônico (ETB)	175
9.1	Teoria do Controle ETB	175
9.2	Configuração do ETB	178
9.3	Curva de Bias (Feed-Forward)	180
9.4	Tabela Pedal → Borboleta	181
9.5	Limitação de Velocidade	183
9.6	ETB #2 Trim	184
10	Controle de Boost	186
10.1	Teoria de Funcionamento	186
10.2	Configurações Gerais	189
10.3	Malha Aberta	190
10.4	Malha Fechada PID	192
10.5	Boost Alvo	193
10.6	Correções	194
10.7	Wastegate Eletrônica	196
10.8	Boost Blend Tables	197
11	VVT (Comando de Válvulas Variável)	200
11.1	Teoria de Funcionamento	200
11.2	Configuração VVT	202
11.3	Tabela VVT Admissão	204
11.4	Tabela VVT Escape	206
11.5	VVL (Variable Valve Lift)	207

12 Controle de Largada e Anti-Lag	210
12.1 Teoria de Funcionamento	210
12.2 Launch Control	212
12.3 Anti-Lag (ALS)	215
12.4 Flat Shift / Redução de Torque	217
13 Nitro e Cruise Control	220
13.1 Controle de Nitro	220
13.2 Cruise Control	224
14 Controle de Tração	228
14.1 Teoria de Funcionamento	228
14.2 Tração via ETB (Borboleta Eletrônica)	230
14.3 Tração via Timing (Retardo de Ignição)	232
14.4 Tração via Corte de Ignição	233
V Comunicação e Extensibilidade	236
15 Barramento CAN	237
15.1 Fundamentos do Barramento CAN	237
15.2 Configurações CAN	239
15.3 Sensores via CAN	241
16 PWM de Uso Geral e Atuadores DC	245
16.1 General Purpose PWM (GPPWM 1–4)	245
16.2 Atuadores DC Motor (Ponte H)	248
17 Scripting Lua	252
17.1 Visão Geral	252
17.2 Tabelas e Curvas de Script	255
VI Diagnóstico e Referência	259
18 Bench Test e Diagnóstico	260
18.1 Teste de Bancada	260
18.2 Monitoramento em Tempo Real	263
19 Bomba de Combustível de Alta Pressão (HPFP)	270
19.1 Teoria: Injeção Direta e HPFP	270
19.2 Perfil do Lóbulo	272
19.3 Deadtime da Válvula	273
19.4 Pressão Alvo	275
19.5 Compensação Feed-Forward	276
19.6 Compensação por Massa de Combustível	277

20 Dicas de Calibração e Boas Práticas	280
20.1 Ordem Recomendada de Calibração	280
20.2 Checklist Pré-Partida	282
20.3 Checklist Pós-Calibração	284
20.4 Erros Comuns e Como Evitá-los	285
20.5 Uso do Datalogger para Validação	288
20.6 Pontos de Restauração	290
20.7 Valores Típicos por Tipo de Motor	291
 Apêndice A — Glossário de Calibração	 293
 Apêndice B — Revisões do Manual	 298

Parte I

Fundamentos

1 Introdução

Este manual é o guia definitivo para calibração das unidades de gerenciamento eletrônico da família **evoTech**, desenvolvidas pela MotroLink . Aqui você encontrará, de forma estruturada e progressiva, todos os procedimentos necessários para levar um motor do primeiro giro de partida até uma calibração completa, segura e otimizada.

O documento foi elaborado para ser utilizado em conjunto com o software MotroLink Manager , que é a interface principal de comunicação, configuração e monitoramento das centralinas evoTech.

1.1 Para quem é este manual

Este manual destina-se a:

- **Preparadores automotivos** que realizam conversões de injeção e ignição eletrônica programável em motores de competição, street ou projetos especiais.
- **Engenheiros automotivos** que necessitam de documentação técnica detalhada para desenvolvimento, validação e homologação de calibrações em bancada ou dinamômetro.
- **Técnicos de instalação e calibração** que já possuem experiência básica com sistemas de gerenciamento eletrônico e desejam dominar os recursos da família evoTech.

Nível de conhecimento esperado

Assume-se que o leitor possui conhecimentos fundamentais sobre motores de combustão interna (ciclo Otto), princípios de injeção eletrônica e ignição, bem como familiaridade básica com o uso de computadores e software de calibração. Este manual não se propõe a ensinar teoria de motores, mas sim a guiar o processo de calibração dentro do ecossistema MotroLink .

1.2 Compatibilidade — família evoTech

Este é um **documento único** que cobre toda a família de centralinas evoTech. As diferenças entre os modelos são apontadas ao longo do texto sempre que um recurso for exclusivo ou limitado a determinado modelo.

Característica	evoTech4	evoTech8	evoTech12
Cilindros suportados	até 4	até 8	até 12
Injetores sequenciais	4	8	12
Saídas de ignição	4	8	12
Entradas analógicas	8	12	16
Entradas de frequência	2	4	4
Saídas auxiliares PWM	4	8	12
Controle de VVT	1 banco	2 bancos	2 bancos
Controle de boost eletrônico	Sim	Sim	Sim
Saída para drive-by-wire	—	Sim	Sim
Comunicação CAN	1 barr.	2 barr.	2 barr.

! Documento único, múltiplos modelos

Quando um procedimento ou parâmetro se aplicar somente a um modelo específico, ele será indicado com a etiqueta correspondente, por exemplo: **[evoTech8/12 apenas]**. Se nenhuma etiqueta estiver presente, o conteúdo aplica-se a todos os modelos da família.

1.3 Pré-requisitos

Antes de iniciar qualquer procedimento descrito neste manual, certifique-se de que as seguintes condições foram atendidas:

1. **Hardware instalado e conferido** — a centralina evoTech deve estar fisicamente instalada no veículo ou bancada de testes, com toda a fiação conectada conforme o diagrama elétrico do respectivo Manual de Hardware. Verifique alimentação, aterramento, fusíveis e conectores.
2. **Software MotroLink Manager instalado e atualizado** — o computador utilizado para calibração deve ter a versão mais recente do MotroLink Manager instalada. Confirme a comunicação USB ou Wi-Fi com a centralina antes de prosseguir.
3. **Projeto criado no MotroLink Manager** — um projeto novo deve ter sido criado no software, selecionando o modelo correto da centralina (evoTech4, evoTech8 ou evoTech12) e o tipo de motor. O assistente de novo projeto guia as configurações iniciais básicas.
4. **Firmware da centralina atualizado** — verifique se o firmware da centralina corresponde à versão mínima exigida pela versão do MotroLink Manager em uso. A atualização pode ser feita pelo próprio software.
5. **Sensores e atuadores testados** — recomenda-se que todos os sensores (MAP, TPS, CLT, IAT, sonda lambda) e atuadores (injetores, bobinas, válvulas) tenham sido previamente testados quanto à integridade elétrica.

⚠ Não pule os pré-requisitos

Iniciar a calibração com fiação mal feita, sensores defeituosos ou firmware desatualizado é a principal causa de problemas difíceis de diagnosticar. Invista tempo na verificação antes de dar a partida.

1.4 Documentação relacionada

Este manual de calibração faz parte de um conjunto de documentos técnicos da MotroLink. Consulte os manuais complementares sempre que necessário:

1.4.1 Manual do MotroLink Manager

O *Manual do MotroLink Manager* cobre toda a operação do software de calibração: instalação, interface gráfica, navegação por menus, criação e gerenciamento de projetos, edição de tabelas e mapas, uso do datalogger, atualização de firmware, comunicação com a centralina e demais funcionalidades do aplicativo.

📘 Quando consultar o Manual do MotroLink Manager

Se a sua dúvida for sobre *como usar o software* (onde clicar, como editar uma tabela, como gravar uma calibração), consulte o Manual do MotroLink Manager. Se a dúvida for sobre *o que calibrar e quais valores usar*, você está no manual correto.

1.4.2 Manuais de Hardware

Os manuais de hardware cobrem instalação física, diagramas de fiação, especificações elétricas, pinagens de conectores e procedimentos de bancada:

- **Manual de Hardware — evoTech4** — instalação e fiação para aplicações de até 4 cilindros.
- **Manual de Hardware — evoTech8** — instalação e fiação para aplicações de até 8 cilindros.
- **Manual de Hardware — evoTech12** — instalação e fiação para aplicações de até 12 cilindros.
- **Manual de Hardware — WideLink** — instalação e configuração do módulo de sonda lambda wideband WideLink, incluindo integração via CAN com as centralinas evoTech.

⚠ Fiação correta é fundamental

Nenhum procedimento de calibração substituirá uma instalação elétrica bem feita. Se durante a calibração você encontrar leituras inconsistentes ou comportamentos inesperados, volte ao Manual de Hardware e revise a instalação antes de prosseguir.

1.5 Fluxo geral de calibração

A calibração de um motor com a família evoTech segue uma sequência lógica e progressiva. Cada etapa depende da anterior estar corretamente concluída. O fluxo macro recomendado é:

1. **Configuração do motor** — definição do número de cilindros, tipo e configuração da roda fônica (dentes, falha, sensor), ordem de ignição, atribuição de saídas de injeção e ignição, tipo de injeção (sequencial, semi-sequencial, batch) e parâmetros fundamentais do motor (cilindrada, taxa de compressão).
2. **Configuração de sensores** — calibração e verificação de todos os sensores de entrada: TPS (posição de borboleta), MAP (pressão do coletor), CLT (temperatura do líquido de arrefecimento), IAT (temperatura do ar de admissão), sonda lambda wideband, sensor de posição do acelerador, sensores de pressão de óleo, combustível, entre outros.
3. **Verificação de partida (*cranking* e *priming*)** — ajuste do pulso de injeção durante a partida (*cranking fuel*), tempo de *priming* dos injetores, avanço de ignição na partida e verificação de que o motor dá partida e se mantém funcionando, ainda que de forma instável.
4. **Marcha lenta estável** — ajuste da rotação alvo de marcha lenta, controle de atuador de marcha lenta (motor de passo, válvula PWM ou corpo de borboleta eletrônico), enriquecimento pós-partida, correções de temperatura e estabilização da rotação em todas as condições térmicas.
5. **Tabela VE (combustível)** — construção e refinamento da tabela de Eficiência Volumétrica (VE), que é o mapa principal de controle de combustível. Utiliza-se a leitura da sonda lambda wideband para atingir os valores de AFR (*Air-Fuel Ratio*) desejados em cada ponto de rotação e carga.
6. **Tabela de avanço (ignição)** — construção e refinamento do mapa de avanço de ignição. Ajusta-se o ponto de ignição em cada célula de rotação e carga buscando o melhor torque (MBT) sem ocorrência de detonação (*knock*).
7. **Correções (temperatura, altitude, aceleração)** — configuração das tabelas de correção de combustível e ignição por temperatura do motor, temperatura do ar, pressão barométrica (altitude) e regimes transitórios de aceleração e desaceleração (*accel enrichment* e *decel enleanment*).
8. **Ajustes avançados** — configuração de recursos avançados conforme a aplicação: controle de pressão de turbo (*boost control*), comando de válvulas variável (VVT), controle de largada (*launch control*), controle de tração, *anti-lag*, corte de giro, *flat shift*, entre outros.
9. **Validação final com datalogger** — registro completo de dados (*datalog*) em condições reais de operação, análise dos canais críticos (AFR, avanço, temperaturas, pressões, detonação), verificação de segurança e aprovação final da calibração.

Respeite a sequência

É tentador pular etapas para “acelerar” o processo, mas cada fase constrói a base para a próxima. Uma tabela VE calibrada sobre uma configuração de sensores incorreta, por exemplo, precisará ser inteiramente refeita. Siga a ordem.

Navegação por capítulos

Cada etapa do fluxo acima corresponde a um ou mais capítulos deste manual. Ao final de cada capítulo, há indicações de quais são os próximos passos recomendados.

1.6 Convenções usadas neste manual

Ao longo deste manual, são utilizadas caixas de destaque coloridas para chamar a atenção do leitor para informações de diferentes níveis de importância. Familiarize-se com cada tipo:

1.6.1 Caixa de nota

Utilizada para dicas, informações complementares e esclarecimentos que auxiliam na compreensão do conteúdo, mas não são críticos para a segurança.

Exemplo de nota

As tabelas VE podem ser editadas manualmente célula a célula ou com o auxílio do recurso de *autotune* do MotroLink Manager, que ajusta automaticamente os valores com base na leitura da sonda lambda.

1.6.2 Caixa de alerta

Utilizada para advertências que, se ignoradas, podem resultar em calibração incorreta, perda de tempo ou danos menores ao motor ou componentes.

Exemplo de alerta

Nunca ajuste a tabela de avanço de ignição em carga plena (*WOT*) sem monitorar simultaneamente a sonda lambda e a temperatura dos gases de escape. Valores de avanço excessivos em alta carga podem causar detonação severa.

1.6.3 Caixa de importante

Utilizada para informações de alta relevância que afetam diretamente o resultado da calibração ou a integridade do sistema.

Exemplo de importante

Ao trocar o modelo de injetor no projeto, é obrigatório recalibrar a tabela de *dead time* (tempo morto) dos injetores. Valores incorretos de *dead time* causam erros significativos na dosagem de combustível, especialmente em baixas tensões de ba-

teria.

1.6.4 Caixa de perigo

Utilizada para avisos de segurança críticos. Indica situações que, se ignoradas, podem resultar em **danos graves ao motor, ao veículo, ao patrimônio ou risco à integridade física das pessoas envolvidas**.

Exemplo de perigo

Jamais opere o motor em dinamômetro ou via pública com a mistura ar/combustível excessivamente empobrecida (*lean*) em alta carga. Condições de mistura pobre em carga plena causam temperaturas de combustão extremas, podendo resultar em destruição de pistões, válvulas e cabeçote em questão de segundos.

1.7 Segurança

A calibração de motores envolve riscos reais. Combustível, temperaturas elevadas, peças girantes em alta rotação e gases tóxicos fazem parte do ambiente de trabalho. Leve a segurança a sério — **sempre**.

Nunca calibre sozinho em via pública

A calibração de um motor em rua, estrada ou qualquer via pública é **extremamente perigosa e fortemente desencorajada**. Durante o processo de calibração, o comportamento do motor é imprevisível — falhas de combustível, cortes de ignição, engasgos e picos de potência podem ocorrer a qualquer momento. Isso coloca em risco a vida do condutor, dos passageiros e de terceiros. Realize toda a calibração em dinamômetro ou, no mínimo, em ambiente controlado e fechado ao público.

Utilize dinamômetro sempre que possível

O dinamômetro de rolo ou de bancada é o ambiente correto para calibração. Ele permite aplicar carga controlada ao motor, reproduzir condições de operação de forma segura e repetível, e possibilita o monitoramento simultâneo de todos os parâmetros críticos. Se você não possui acesso a um dinamômetro, considere terceirizar esta etapa com um profissional equipado.

Tenha extintor de incêndio acessível

Mantenha sempre um extintor de incêndio de pó químico (classe BC ou ABC) ao alcance imediato durante qualquer procedimento de calibração com o motor em funcionamento. Vazamentos de combustível em contato com superfícies quentes (coletor de escapamento, turbo) podem causar incêndio instantâneo. Certifique-se de que o extintor está dentro da validade e que todos os presentes no ambiente sabem utilizá-lo.

⚡ Monitore temperaturas continuamente

Durante toda a calibração, mantenha os canais de temperatura do líquido de arrefecimento (CLT), temperatura do ar de admissão (IAT) e, se disponível, temperatura dos gases de escape (EGT) visíveis no MotroLink Manager. Configure alarmes sonoros e visuais no software para limites seguros. Superaquecimento pode causar danos catastróficos ao motor e risco de queimaduras ao operador.

⚡ Nunca calibre sozinho

Tenha sempre pelo menos uma segunda pessoa presente durante a calibração com o motor em funcionamento. Em caso de emergência — mal súbito, incêndio, falha mecânica — a presença de outra pessoa pode ser a diferença entre um susto e uma tragédia. A segunda pessoa deve saber onde está o extintor, como desligar o motor de emergência (*kill switch*) e como acionar socorro.

⚡ Cuidado com gases de escape

Motores de combustão interna emitem monóxido de carbono (CO), um gás inodoro, incolor e **letal**. Nunca opere o motor em ambiente fechado sem ventilação forçada adequada. Em dinamômetros de sala, certifique-se de que o sistema de exaustão está funcionando corretamente antes de dar a partida. Sintomas de intoxicação por CO incluem dor de cabeça, tontura, náusea e perda de consciência — ao primeiro sinal, desligue o motor e ventile o ambiente imediatamente.

❗ Lista de verificação de segurança

Antes de cada sessão de calibração, verifique:

- Extintor de incêndio presente e dentro da validade.
- Segunda pessoa presente e instruída sobre procedimentos de emergência.
- Ventilação adequada no ambiente (natural ou forçada).
- *Kill switch* (corte de emergência do motor) funcional e acessível.
- Nenhum vazamento visível de combustível, óleo ou líquido de arrefecimento.
- Nível de combustível, óleo e líquido de arrefecimento verificados.
- Alarmes de temperatura e AFR configurados no MotroLink Manager.
- Ferramentas e objetos soltos afastados do motor e do dinamômetro.
- Cabelo preso, roupas justas, sem acessórios soltos (anéis, correntes, pulseiras).

2 Primeira Calibração — Da ECU Nova ao Motor Funcionando

Esta seção é um guia prático e sequencial para levar uma centralina evoTech recém-instalada do estado “zero” até um motor funcionando em marcha lenta. O objetivo aqui não é a calibração perfeita — é colocar o motor para funcionar de forma segura e estável pela primeira vez. O refinamento fino será feito nas seções subsequentes deste manual.

Leia esta seção inteira antes de ligar a chave. Entender o processo completo antes de executá-lo evita retrabalho e, mais importante, evita danos ao motor.

2.1 Visão Geral do Processo

O caminho da ECU nova ao motor funcionando segue uma sequência lógica e deliberada. Cada etapa depende da anterior estar correta, portanto não pule passos, mesmo que pareçam óbvios.

O processo completo é:

1. Importar um mapa base compatível com o seu motor.
2. Configurar os parâmetros fundamentais do motor (cilindros, cilindrada, ordem de ignição).
3. Configurar a roda fônica e verificar o sincronismo.
4. Mapear todas as entradas e saídas (injetores, bobinas, sensores, relés).
5. Calibrar os sensores essenciais (CLT, IAT, TPS, MAP, sonda lambda).
6. Estabelecer limites de segurança (corte de giros, limite de pressão).
7. Configurar os parâmetros de partida (priming, cranking, avanço).
8. Configurar uma marcha lenta básica.
9. Verificar a tabela VE inicial.
10. Gravar a calibração na ECU.
11. Executar a primeira partida seguindo o checklist de segurança.
12. Realizar os primeiros ajustes com o motor funcionando.

❗ Comece conservador, refine depois

Em cada parâmetro, opte pelo valor mais conservador e seguro. Corte de giros baixo, avanço moderado, mistura ligeiramente rica. Um motor que funciona “mais ou menos” na primeira tentativa é um sucesso. A otimização virá nas seções seguintes deste manual, com o auxílio do datalogger e, idealmente, de um dinamômetro.

Para explicações detalhadas sobre cada parâmetro mencionado nesta seção, consulte as seções específicas: Seção 3 (Configuração do Motor), Seção 4 (Sensores), Seção 5 (Combustível), Seção 6 (Ignição), Seção 7 (Partida) e Seção 8 (Marcha Lenta).

2.2 Importar o Mapa Base

O primeiro passo é carregar um ponto de partida — um mapa base que contenha valores razoáveis para o seu tipo de motor. Isso economiza horas de configuração manual e reduz drasticamente o risco de erros.

2.2.1 Criando um novo projeto

1. Abra o MotroLink Manager .
2. Clique em **Novo Projeto**.
3. Selecione o modelo da sua centralina (evoTech4, evoTech8 ou evoTech12).
4. Dê um nome descritivo ao projeto — por exemplo, “Gol_AP_2.0_Turbo” ou “Civic_B16_Aspirado”. Esse nome será a referência do projeto e dos datalogs associados.
5. Escolha o diretório onde deseja salvar o projeto.

2.2.2 Importando o mapa base

A MotroLink disponibiliza mapas base (arquivos **.evomap**) para uma variedade de motores populares. Esses mapas contêm valores iniciais conservadores para tabela VE, avanço de ignição, configurações de sensores, parâmetros de partida e marcha lenta.

1. Acesse a página de downloads em **motrolink.com** e localize a seção de mapas base.
2. Baixe o arquivo **.evomap** correspondente ao seu motor. Caso não exista um mapa base para o seu motor específico, baixe o que mais se assemelha em termos de número de cilindros, tipo de injeção e aspiração (aspirado/turbo).
3. No MotroLink Manager , abra o projeto criado e importe o mapa base baixado.
4. O software carregará todos os parâmetros do mapa base para o projeto atual.
5. Revise os valores importados — em especial, confirme que o número de cilindros, tipo de injeção e tipo de ignição correspondem à sua instalação. Se o mapa base for de um motor similar (mas não idêntico), será necessário ajustar esses parâmetros.

Mapa base de motor similar

Se não existir um mapa base exato para o seu motor, utilize o mais próximo. Por exemplo, para um motor AP 1.8 turbo, um mapa base de AP 2.0 turbo será um excelente ponto de partida — basta ajustar a cilindrada e, eventualmente, a vazão dos injetores. O importante é que a configuração fundamental (número de cilindros, tipo de roda fônica, tipo de injeção) seja compatível ou facilmente adaptável.

Se preferir partir do zero sem mapa base, será necessário configurar todos os parâmetros manualmente. Isso é perfeitamente viável, porém exige mais experiência. Nesse caso, siga cada etapa desta seção com atenção redobrada e utilize os valores de referência fornecidos ao longo do texto.

❗ O mapa base é apenas um ponto de partida

Mesmo que o mapa base seja para o “mesmo” motor que o seu, cada motor é único. Diferenças em estado de conservação, modificações, combustível, altitude, temperatura ambiente, escape, filtro de ar e dezenas de outros fatores fazem com que o mapa base **nunca** seja a calibração final. Ele existe para que o motor pegue e funcione de forma segura — a partir daí, a calibração precisa ser ajustada para o **seu** motor específico.

2.3 Configurar o Motor

Com o mapa base importado (ou partindo do zero), o próximo passo é verificar e ajustar as configurações fundamentais do motor na tela de **Configuração do Veículo** no MotroLink Manager .

2.3.1 Número de cilindros

Selecione o número de cilindros do seu motor: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 ou 12, conforme o modelo da centralina suportar.

2.3.2 Cilindrada

Informe a cilindrada total do motor em centímetros cúbicos (cc). Por exemplo, 1.600 cc para um motor 1.6, 1.998 cc para um 2.0, etc. Este valor é fundamental para o cálculo de massa de ar no modelo Speed Density.

2.3.3 Ordem de ignição

A ordem de ignição (firing order) define a sequência em que os cilindros disparam. Configure-a exatamente conforme o manual do fabricante do motor. Ordens de ignição comuns:

- **4 cilindros em linha:** 1-3-4-2 (a mais comum) ou 1-2-4-3
- **6 cilindros em linha:** 1-5-3-6-2-4
- **V6 (90°):** 1-2-3-4-5-6 (varia conforme fabricante)
- **V8 (GM/Chevrolet):** 1-8-4-3-6-5-7-2
- **V8 (Ford):** 1-3-7-2-6-5-4-8

Uma ordem de ignição errada fará o motor funcionar de forma extremamente irregular ou simplesmente não funcionar. Consulte o manual do motor em caso de dúvida.

2.3.4 Tipo de injeção

Selecione o tipo de injeção conforme a sua instalação de fiação:

- **Sequencial:** Cada injetor é acionado individualmente, no momento exato do ciclo de admissão do respectivo cilindro. É o modo mais preciso e deve ser utilizado sempre que a fiação permitir.

- **Semi-sequencial (batch fire):** Os injetores são acionados em pares. Utilizado quando há menos saídas de injetor disponíveis do que cilindros.
- **Simultâneo:** Todos os injetores são acionados ao mesmo tempo. Modo mais simples, porém menos preciso.

Se a fiação da sua instalação suportar injeção sequencial, utilize-a. A diferença na qualidade da calibração é significativa.

2.3.5 Tipo de ignição

Selecione o tipo de ignição:

- **Bobina individual (COP — Coil on Plug):** Uma bobina por cilindro, cada uma com sua própria saída de controle. É o modo ideal.
- **Centelha perdida (Wasted Spark):** Uma bobina para cada par de cilindros. A bobina dispara duas vezes por ciclo — uma no cilindro correto (compressão) e outra no cilindro parceiro (escape). Funciona bem e é comum em muitos motores OEM.
- **Distribuidor:** Uma única bobina com distribuidor mecânico. A ECU controla apenas o momento da centelha.

2.3.6 Tipo de combustível

Configure o tipo de combustível primário:

- **Gasolina pura (E0):** AFR estequiométrico 14,7:1
- **Gasolina brasileira (E27):** AFR estequiométrico $\approx 13,1:1$
- **E85:** AFR estequiométrico $\approx 9,8:1$
- **Etanol (E100):** AFR estequiométrico $\approx 9,0:1$

O tipo de combustível afeta diretamente o cálculo de injeção, os alvos de lambda e as correções de partida a frio. Configure-o corretamente desde o início.

Detalhes completos

Cada parâmetro descrito aqui possui explicações teóricas detalhadas na [Seção 3](#) (Configuração Inicial do Motor). Se você tem dúvida sobre o que um parâmetro faz ou por que ele importa, consulte essa seção antes de prosseguir.

2.4 Configurar a Roda Fônica

A roda fônica (trigger wheel) é o único meio que a ECU tem de saber a posição e a velocidade do virabrequim. Se a roda fônica não estiver configurada corretamente, o motor **não vai funcionar** — ponto final. Esta é a etapa mais crítica de toda a configuração inicial.

2.4.1 Tipo de roda fônica

Selecione o padrão de dentes da roda fônica instalada no seu motor. Os padrões mais comuns são:

- **60–2:** 60 dentes com 2 dentes faltantes. Padrão mais utilizado em preparações e em muitos motores OEM europeus.
- **36–1:** 36 dentes com 1 dente faltante. Comum em motores japoneses e em algumas aplicações OEM.
- **12–1:** 12 dentes com 1 dente faltante.
- **Outros padrões:** A evoTech suporta diversos padrões adicionais. Consulte a lista completa no MotroLink Manager .

2.4.2 Tipo de sensor

Configure o tipo do sensor da roda fônica:

- **Hall (digital):** Produz um sinal de onda quadrada. Comum em sensores de 3 fios (alimentação, sinal, terra).
- **VR / Indutivo:** Produz um sinal senoidal cuja amplitude varia com a rotação. Comum em sensores de 2 fios. Requer que a ECU detecte a borda correta do sinal.

2.4.3 Ângulo de offset do trigger

O ângulo de offset define a relação entre a posição da falha da roda fônica e o Ponto Morto Superior (PMS) do cilindro 1. Se você importou um mapa base para o seu motor, esse valor já estará configurado. Caso contrário, consulte a documentação do motor ou meça fisicamente a posição da falha em relação ao PMS.

Esse valor será verificado posteriormente com uma pistola estroboscópica (timing light). Por enquanto, se estiver partindo de um mapa base, confie no valor importado.

2.4.4 Verificar o sincronismo

Antes de tentar dar a partida, é fundamental verificar que a ECU está lendo a roda fônica corretamente:

1. Conecte o computador à ECU via USB ou Wi-Fi.
2. Ligue a chave de ignição (posição “On”, sem dar partida).
3. No MotroLink Manager , observe o indicador de status “**Roda Fônica**” na tela de monitoramento.
4. Gire o motor manualmente (pela polia ou pela castanha do arranque) ou dê um breve toque no motor de arranque (apenas 1–2 segundos).
5. O indicador deve mudar para “OK” ou “Sincronizado”, e o campo de RPM deve mostrar um valor coerente durante o giro.

Se o indicador mostrar erro de sincronismo, verifique:

- O padrão de dentes está correto?
- O tipo de sensor (Hall vs. VR) está correto?
- A fiação do sensor está íntegra? (sinal, terra, alimentação se Hall)
- O sensor está na distância correta da roda fônica (gap)?
- A roda fônica está em bom estado (dentes danificados, folga no encaixe)?

! Causa nº 1 de falha na primeira partida

A configuração incorreta da roda fônica é, de longe, a causa mais frequente de motores que não pegam na primeira tentativa. Se o trigger não sincroniza, a ECU não sabe a posição do motor e não pode injetar combustível nem gerar centelha nos momentos corretos. Não prossiga para as etapas seguintes até que o sincronismo esteja confirmado.

2.5 Mapear Entradas e Saídas

Esta etapa diz à ECU “qual pino faz o quê”. É preciso associar cada atuador (injetor, bobina, relé) ao pino de saída correto da centralina, conforme a fiação instalada no veículo.

2.5.1 Injetores

Associe cada injetor ao pino de saída correspondente. A ordem dos injetores deve seguir a **ordem de ignição** configurada anteriormente:

- **Injetor 1** → Saída correspondente ao cilindro 1
- **Injetor 2** → Saída correspondente ao cilindro 2
- E assim por diante para todos os cilindros.

Se a fiação foi feita com chicote proprietário MotroLink, os pinos já estarão mapeados conforme o diagrama elétrico do chicote. Se a fiação é custom, verifique com um multímetro qual fio vai para qual injetor antes de atribuir os pinos no software.

2.5.2 Bobinas de ignição

Associe cada bobina ao pino de saída correspondente, seguindo a mesma lógica dos injetores:

- **Bobina 1** → Saída correspondente ao cilindro 1
- **Bobina 2** → Saída correspondente ao cilindro 2 (ou par de cilindros, se wasted spark)
- E assim por diante.

2.5.3 Bomba de combustível

Atribua a saída do relé da bomba de combustível. Após configurar:

1. Ligue a chave de ignição.
2. Verifique que a bomba de combustível é acionada (você deve ouvir o zumbido da bomba por alguns segundos durante o priming).
3. Se a bomba não ligar, verifique a atribuição do pino, o fusível e a fiação do relé.

2.5.4 Relé principal

Atribua a saída do relé principal da ECU (main relay). Este relé mantém a alimentação da ECU e dos periféricos após a chave de ignição ser desligada, permitindo que a ECU execute a rotina de desligamento.

2.5.5 Ventilador do radiador

Atribua a saída do ventilador (eletroventilador) do radiador. Configure a temperatura de acionamento (tipicamente 95–100°C) e a histerese (tipicamente 3–5°C).

2.5.6 Teste de bancada — verificação obrigatória

Antes de tentar dar a partida, utilize a função de **Teste de Bancada** (Bench Test, Seção 18) para acionar cada saída individualmente e verificar que o componente correto responde:

1. No MotroLink Manager, acesse a tela de Bench Test.
2. Acione cada injetor individualmente e verifique que o injetor correto clica (ouça ou peça para alguém observar no motor).
3. Acione cada bobina individualmente e verifique que a bobina correta gera centelha (observe com a vela fora do motor ou use uma lâmpada de teste).
4. Acione o relé da bomba de combustível e verifique que a bomba liga.
5. Acione o relé do ventilador e verifique que o ventilador gira.



Mapeamento errado pode causar danos graves

Se um injetor estiver associado ao cilindro errado, o motor pode sofrer *hydraulic lock* (travamento hidráulico) — combustível líquido acumulado em um cilindro que tenta comprimir um fluido incompressível, resultando em biela empenada ou bloco trincado. Se uma bobina estiver no cilindro errado, o motor pode ter ignição no momento da admissão, causando chamas no coletor de admissão (backfire). **Sempre** verifique o mapeamento com o teste de bancada antes da primeira partida.

2.6 Configurar Sensores Essenciais

A ECU precisa de informações precisas dos sensores para calcular a quantidade correta de combustível e o momento correto da ignição. Estes são os sensores mínimos que devem estar funcionando antes da primeira partida:

2.6.1 CLT — Temperatura do Motor (Coolant Temperature)

O sensor CLT informa a temperatura do líquido de arrefecimento. Esse dado é utilizado em praticamente todos os cálculos de partida, enriquecimento a frio, marcha lenta e proteção do motor.

1. Selecione o tipo de sensor CLT no MotroLink Manager (NTC genérico, GM, Bosch, etc.) ou configure a curva personalizada.
2. Na tela de monitoramento ao vivo, verifique que a leitura faz sentido: com o motor frio, a temperatura exibida deve estar próxima da temperatura ambiente.
3. Se a leitura estiver absurdamente alta, baixa ou instável, verifique a fiação, o tipo de sensor selecionado e a integridade do sensor.

2.6.2 IAT — Temperatura de Admissão (Intake Air Temperature)

O sensor IAT informa a temperatura do ar que está entrando no motor. A configuração é análoga ao CLT:

1. Selecione o tipo de sensor IAT.
2. Verifique que a leitura na tela de monitoramento corresponde à temperatura ambiente (com o motor frio e desligado, CLT e IAT devem mostrar valores próximos).

2.6.3 TPS — Posição da Borboleta (Throttle Position Sensor)

O sensor TPS informa a abertura da borboleta de aceleração. É essencial para detecção de aceleração, corte na desaceleração e diversas correções.

1. Acesse a tela de calibração do TPS no MotroLink Manager .
2. Com o acelerador totalmente solto (borboleta fechada), clique em **Calibrar Mínimo** (ou registre o valor de tensão como 0%).
3. Pressione o acelerador até o fim do curso (WOT — Wide Open Throttle) e clique em **Calibrar Máximo** (ou registre o valor de tensão como 100%).
4. Na tela de monitoramento, verifique: 0% com borboleta fechada, 100% com borboleta totalmente aberta, e variação suave e contínua entre os dois extremos.

Se o TPS apresentar pontos mortos, saltos ou leituras instáveis, o sensor pode estar com desgaste e deve ser substituído.

2.6.4 MAP — Pressão do Coletor de Admissão (Manifold Absolute Pressure)

O sensor MAP é o componente central do modelo Speed Density — ele fornece a informação de carga do motor.

1. Selecione o tipo de sensor MAP no MotroLink Manager (sensor interno da ECU, sensor externo de 1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar, etc.).
2. Com o motor desligado e a chave ligada, verifique que a leitura de MAP corresponde à pressão atmosférica local. Ao nível do mar, o valor deve ser próximo de 101 kPa. Em cidades com altitude elevada (ex.: São Paulo $\approx$ 92 kPa, Bogotá $\approx$ 75 kPa), o valor será proporcionalmente menor.
3. Se o valor exibido estiver muito diferente da pressão atmosférica esperada, verifique: tipo de sensor selecionado, conexão da mangueira de vácuo (se sensor externo), integridade da fiação.

2.6.5 Sonda Lambda

A sonda lambda mede a relação ar/combustível nos gases de escape. Embora não seja estritamente obrigatória para o motor pegar pela primeira vez, é **altamente recomendada** para a primeira partida, pois permite verificar imediatamente se a mistura está rica, pobre ou correta.

- **WideLink via CAN:** Se você possui o módulo WideLink da MotroLink, configure a comunicação CAN no MotroLink Manager. O WideLink fornece leitura de lambda wideband com alta precisão diretamente via barramento CAN.
- **Sonda wideband analógica:** Configure a entrada analógica correspondente, selecionando o tipo de controlador (AEM, Innovate, etc.) e a curva de tensão vs. lambda.

A sonda lambda precisa atingir temperatura de operação (acima de 600°C para wideband) antes de fornecer leituras válidas. Nos primeiros segundos de funcionamento, a leitura não será confiável.



Verifique todos os sensores antes de dar a partida

Com a chave ligada e o motor desligado, abra a tela de monitoramento ao vivo no MotroLink Manager e confira **todos** os sensores de uma vez. CLT e IAT devem mostrar temperatura ambiente; MAP deve mostrar pressão atmosférica; TPS deve mostrar 0%. Se qualquer leitura estiver visivelmente errada, **não tente dar a partida**. Uma leitura de CLT incorreta, por exemplo, fará a ECU calcular uma quantidade de combustível completamente errada — e o motor não pegará ou pegará em condições perigosas.

2.7 Configurar Limites de Segurança

Antes da primeira partida, é obrigatório configurar limites de segurança que protejam o motor em caso de erro de calibração, falha mecânica ou comportamento inesperado.

2.7.1 Limitador de rotação (rev limiter)

Configure o corte de giros em um valor **conservador**:

- Para a primeira partida e os primeiros ajustes, configure o limitador entre **3.000 e 3.500 RPM**. Isso é suficiente para o motor funcionar em marcha lenta e permitir ajustes básicos.
- O tipo de corte recomendado para a primeira partida é o **corte de combustível** (fuel cut). Evite corte por ignição na fase inicial.
- Após validar a calibração básica, o limitador poderá ser aumentado gradualmente até o valor final desejado.

2.7.2 Limite de pressão (MAP limit)

Configure o limite de pressão no coletor conforme a aplicação:

- **Motor aspirado:** Limite de ≈ 105 kPa (ligeiramente acima da pressão atmosférica).
- **Motor turbo:** Limite correspondente à pressão de boost alvo mais 10% de margem. Por exemplo, se o alvo é 1,5 bar (150 kPa absoluto), configure o limite em ≈ 165 kPa. Para a primeira partida, se não pretende usar boost ainda, configure em 120 kPa.

2.7.3 Proteção por pressão de óleo

Se o veículo possui sensor de pressão de óleo conectado à ECU:

- Habilite a proteção de pressão de óleo.
- Configure a pressão mínima aceitável (tipicamente 1,0 bar acima de 2.000 RPM).
- Configure a ação: corte de giros progressivo ou corte total.

Nunca dê a primeira partida sem limitador de rotação

Um motor em primeira partida pode ter comportamento imprevisível. Se a marcha lenta estiver mal configurada e o motor “disparar” (RPM subindo descontroladamente), o limitador de rotação é a última barreira antes de danos graves. Um motor girando sem carga acima do limite seguro pode quebrar em questão de segundos — bielas, pistões, válvulas e trem de válvulas estão em risco. **Sempre** configure o limitador antes da primeira partida.

2.8 Configurar a Partida

Os parâmetros de partida determinam como a ECU se comporta durante o cranking — o momento em que o motor de arranque gira o motor até que ele “pegue” e comece a funcionar por conta própria.

2.8.1 Pulso de priming

O priming é um pulso único de combustível injetado antes de o motor começar a girar, com o objetivo de “molhar” o coletor de admissão e as costas das válvulas. Os valores típicos são:

- A 20°C: 15–25 mg de combustível por cilindro.
- Abaixo de 0°C: 30–50 mg de combustível por cilindro (mais combustível para compensar a menor vaporização).
- Se você importou um mapa base, utilize os valores do mapa.

2.8.2 Combustível de cranking

Durante o cranking, a ECU utiliza uma tabela dedicada de enriquecimento que aplica mais combustível do que o normal. Valores típicos para um ponto de partida:

- A 20°C: fator de enriquecimento de $\approx 1,5x$ (50% a mais de combustível em relação ao calculado pela tabela VE).
- A 0°C: fator de enriquecimento de $\approx 2,5x$.
- Abaixo de -10°C : fator de enriquecimento de $\approx 3,5x$ ou mais.
- Se o mapa base já contém esses valores, utilize-os como ponto de partida.

2.8.3 Avanço de ignição na partida

Durante o cranking, o avanço de ignição deve ser fixo e conservador:

- Valor típico: **0° a 10° antes do PMS** (BTDC).
- Valores mais conservadores (0–5°) são recomendados para motores com alta compressão ou turbo.
- Valores de 5–10° funcionam bem para a maioria dos motores aspirados.

2.8.4 Posição da IAC/ETB na partida

A válvula de controle de ar de marcha lenta (IAC) ou o corpo de borboleta eletrônico (ETB) precisa estar suficientemente aberto durante o cranking para permitir a entrada de ar:

- Valor típico para IAC: **30% a 50%** de abertura durante cranking.
- Valor típico para ETB: **5% a 15%** de abertura durante cranking.
- Se o motor tem dificuldade para pegar, experimente aumentar ligeiramente esse valor.

Motor não pega? Verifique estes itens

Se o motor gira na partida mas não pega, as causas mais comuns são, em ordem de frequência:

1. **Roda fônica não sincronizada** — verifique o indicador de status no MotroLink Manager .
2. **Combustível insuficiente** — aumente o enriquecimento de cranking em 20–30% e tente novamente.
3. **Mapeamento incorreto de injetores ou bobinas** — refaça o teste de bancada.
4. **Sem centelha** — verifique as bobinas, velas e fiação.
5. **Sem pressão de combustível** — verifique bomba, filtro e regulador.

2.9 Configurar Marcha Lenta Básica

Para a primeira partida, o objetivo é uma marcha lenta funcional — não perfeita. O motor deve manter-se funcionando sem morrer, mesmo que a rotação oscile um pouco.

2.9.1 RPM alvo

Configure as rotações alvo de marcha lenta:

- **Motor quente** (acima de 80°C): 900–1.000 RPM.
- **Motor frio** (abaixo de 40°C): 1.200–1.500 RPM.
- Configure uma curva suave de RPM alvo vs. temperatura de arrefecimento (CLT), com os valores acima como extremos.

2.9.2 Posição base da IAC/ETB

Defina uma posição base que permita ao motor respirar o suficiente para manter a marcha lenta:

- Valor típico para IAC: **25% a 35%** de abertura.
- Valor típico para ETB: **3% a 8%** de abertura.
- Se o motor morrer em marcha lenta, aumente esse valor em incrementos de 5%.
- Se o motor acelerar demais em marcha lenta, diminua esse valor.

2.9.3 Controle em malha aberta primeiro

Para a primeira partida, **desabilite** o controle de marcha lenta em malha fechada (PID). Utilize apenas o controle em malha aberta (open loop), onde a posição da IAC/ETB é determinada diretamente pela tabela de posição base vs. temperatura.

O motivo é simples: o controle PID tenta corrigir automaticamente a rotação para atingir o alvo, mas se os parâmetros PID não estiverem bem calibrados, o resultado pode ser pior do que o controle manual — oscilações, overshoot, motor morrendo. Calibre o PID depois, quando o motor já estiver funcionando de forma estável em malha aberta.

❗ Não busque a perfeição agora

Uma marcha lenta com 50–100 RPM de oscilação é perfeitamente aceitável na primeira partida. O objetivo é que o motor se mantenha funcionando sem morrer. O ajuste fino da marcha lenta — incluindo a ativação do controle PID em malha fechada, compensações de carga elétrica, ar-condicionado e direção hidráulica — será abordado na Seção 8 (Marcha Lenta).

2.10 Verificar a Tabela VE Inicial

A tabela de Eficiência Volumétrica (VE) é o coração do cálculo de combustível no modelo Speed Density. Para a primeira partida, ela não precisa estar perfeita — precisa estar “perto o suficiente” para o motor funcionar.

2.10.1 Valores de referência para partida

Se você importou um mapa base, a tabela VE já deve conter valores razoáveis. Se está partindo do zero, utilize estes valores como referência inicial:

- **Região de marcha lenta** (700–1.200 RPM, 30–50 kPa): VE de 30% a 45%.
- **Região de cruzeiro** (1.500–3.000 RPM, 50–80 kPa): VE de 50% a 75%.
- **Região de plena carga** (3.000+ RPM, 90+ kPa): VE de 75% a 95%.

Esses valores são genéricos e variam enormemente de motor para motor. Um motor com comando de válvulas bravo terá VE mais baixo em baixa rotação e mais alto em alta rotação. Um motor turbo pode ter VE acima de 100% sob boost.

2.10.2 Alvo de lambda para primeira partida

Configure o alvo de lambda em **1,00** (estequiométrico) em toda a tabela para a primeira partida. Isso simplifica a análise — se a sonda lambda estiver lendo 1,0, a tabela VE está correta naquele ponto.

Após a primeira partida e com o motor funcionando, você poderá enriquecer a região de plena carga (WOT) para um lambda de 0,85 para proteção térmica, mas isso não é necessário agora, pois o limitador de rotação estará baixo e você não levará o motor a plena carga.

❗ A tabela VE precisará de ajuste extensivo

Os valores acima são apenas para que o motor pegue. A calibração real da tabela VE é feita com o motor funcionando, utilizando o datalogger do MotroLink Manager para comparar o lambda medido com o lambda alvo em cada ponto de operação (RPM/MAP) e corrigir os valores de VE correspondentes. Esse processo é detalhado

na Seção 5 (Combustível).

2.11 Gravar na ECU (Write + Burn)

Após configurar todos os parâmetros descritos acima, é hora de enviar a calibração para a ECU.

O processo de gravação na evoTech é feito em duas etapas:

1. **Write (Gravar na RAM):** Envia a calibração para a memória volátil (RAM) da ECU. A calibração entra em efeito imediatamente, mas será perdida se a ECU perder alimentação.
2. **Burn (Gravar na Flash):** Copia a calibração da RAM para a memória não-volátil (Flash). A calibração é preservada mesmo sem alimentação.

Para a primeira partida, o fluxo recomendado é:

1. Clique em **Write** para enviar toda a calibração para a RAM.
2. Dê a partida no motor e verifique o funcionamento.
3. Se o motor funcionar satisfatoriamente, clique em **Burn** para salvar permanentemente.
4. Se precisar fazer ajustes, modifique os parâmetros, clique em **Write** novamente e repita até obter um funcionamento aceitável. Somente então faça o **Burn**.



Write sem Burn = perda de dados

Se você fez Write mas não fez Burn, e a ECU perder alimentação (bateria desconectada, fusível queimado, chave desligada em ECUs sem circuito de sustentação), **todas** as alterações feitas desde o último Burn serão perdidas. A ECU voltará à última calibração salva em Flash. Sempre faça Burn após confirmar que as alterações estão funcionando corretamente.

2.12 Primeira Partida — Checklist e Procedimento

Este é o momento. Todos os parâmetros foram configurados, a calibração foi gravada na ECU e o motor está pronto para dar a primeira partida. Siga este procedimento rigorosamente.

2.12.1 Checklist pré-partida

Antes de girar a chave, confirme cada item:

- o **Pressão de combustível:** Ligue a chave. A bomba de combustível deve acionar e pressurizar o sistema. Se houver manômetro de combustível, verifique que a pressão está dentro do esperado (tipicamente 3,0–4,0 bar para injeção indireta).

- **Sensores:** Na tela de monitoramento do MotroLink Manager , verifique que CLT, IAT, TPS e MAP mostram valores coerentes (temperatura ambiente, 0% TPS, pressão atmosférica).
- **Sincronismo da roda fônica:** Dê um breve toque no motor de arranque (1–2 segundos). O indicador de roda fônica deve mostrar “OK” e o RPM deve aparecer no display.
- **Limitador de rotação:** Confirme que está configurado entre 3.000 e 3.500 RPM.
- **Extintor de incêndio:** Tenha um extintor de pó químico ou CO₂ ao alcance da mão.
- **Segunda pessoa:** Tenha alguém observando o compartimento do motor, atento a vazamentos de combustível, fumaça ou qualquer anomalia.
- **Ventilação:** Se estiver em ambiente fechado (garagem), garanta ventilação adequada para os gases de escape. Monóxido de carbono mata silenciosamente.
- **Capô aberto:** Mantenha o capô aberto para visualização e acesso rápido ao motor.

2.12.2 Procedimento de partida

1. Ligue a chave de ignição (sem dar partida). Aguarde 2–3 segundos para o priming da bomba de combustível.
2. No MotroLink Manager , confirme que a ECU está conectada e os sensores estão lendo corretamente.
3. Dê a partida. Mantenha o motor de arranque acionado por **no máximo 3 segundos**.
4. **Se o motor não pegar em 3 segundos:** Solte a chave, aguarde 10 segundos (para dissipar combustível acumulado no coletor) e analise:
 - O indicador de roda fônica mostra sincronismo durante o cranking?
 - Há cheiro de combustível no escape? (Se sim, há combustível, mas pode faltar centelha ou o timing pode estar muito errado.)
 - Não há cheiro de combustível? (Verifique se a bomba está funcionando, se há pressão no rail e se os injetores estão sendo acionados.)
 - Verifique no datalog se há pulsos de injeção e eventos de ignição durante o cranking.
5. **Se o motor pegar:** Não toque no acelerador. Deixe-o estabilizar em marcha lenta.
6. Monitore imediatamente:
 - **RPM:** Deve estabilizar na faixa da marcha lenta configurada (pode oscilar nos primeiros segundos).
 - **Lambda:** Quando a sonda aquecer (10–30 segundos), verifique que a leitura está próxima de 1,0. Valores entre 0,85 e 1,10 são aceitáveis neste momento.

- **CLT:** A temperatura deve começar a subir gradualmente.
- **Pressão de óleo:** Se houver sensor, verifique que a pressão está dentro do normal.

7. Deixe o motor aquecer em marcha lenta. **Não acelere acima de 2.000 RPM** nos primeiros minutos.

Situações de desligamento imediato

Desligue o motor **imediatamente** se qualquer uma dessas situações ocorrer:

- Vazamento de combustível visível (líquido pingando ou jato de combustível no compartimento do motor).
- Fumaça (não vapor) saindo do compartimento do motor.
- Barulho mecânico anormal — batidas metálicas, rangidos, estalos fortes.
- RPM subindo descontroladamente além do limitador configurado.
- Pressão de óleo zerada ou muito abaixo do esperado após os primeiros segundos.
- Cheiro forte de combustível no compartimento do motor (pode indicar injetor travado aberto).

2.13 Primeiros Ajustes Após a Partida

Com o motor funcionando em marcha lenta, é hora de fazer os primeiros ajustes. Trabalhe de forma metódica — altere um parâmetro por vez e observe o efeito antes de alterar o próximo.

2.13.1 Lambda em marcha lenta

Com a sonda lambda aquecida e fornecendo leituras estáveis:

- **Lambda medido entre 0,95 e 1,05:** Excelente. A tabela VE na região de marcha lenta está razoavelmente correta.
- **Lambda abaixo de 0,95 (mistura rica):** Reduza o VE na região de marcha lenta (células correspondentes ao RPM e MAP atuais) em 3–5% por vez. Faça Write e observe a mudança.
- **Lambda acima de 1,05 (mistura pobre):** Aumente o VE na região de marcha lenta em 3–5% por vez.
- O alvo é lambda 1,00 (estequiométrico) em marcha lenta.

2.13.2 RPM de marcha lenta

Se o RPM estiver acima ou abaixo do alvo:

- **RPM muito alto:** Reduza a posição base da IAC/ETB em incrementos de 2–3%.
- **RPM muito baixo ou motor morrendo:** Aumente a posição base da IAC/ETB em incrementos de 2–3%.
- Ajuste até que o RPM fique estável na faixa desejada (900–1.000 RPM com motor quente).

2.13.3 Verificar o avanço de ignição com pistola estroboscópica

Este é um ajuste de segurança fundamental:

1. Conecte uma pistola estroboscópica (timing light) ao fio da vela do cilindro 1.
2. Com o motor em marcha lenta, aponte a pistola para as marcas de timing na polia do virabrequim.
3. Compare o avanço mostrado na polia com o valor exibido no MotroLink Manager .
4. Se os valores não coincidirem, ajuste o **offset do trigger** (ângulo de offset da roda fônica) até que a marca na polia corresponda ao valor exibido pelo software.

Esse ajuste garante que o avanço real de ignição corresponde ao que a ECU acredita estar comandando. Um offset errado significa que todos os valores de avanço na tabela de ignição estarão deslocados — o que pode causar detonação (se o avanço real for maior que o comandado) ou perda de potência (se for menor).

2.13.4 Monitorar o aquecimento

Acompanhe a temperatura do motor (CLT) subindo gradualmente:

- A temperatura deve subir de forma constante e atingir 80–90°C em 5–15 minutos, dependendo do motor e da temperatura ambiente.
- Quando a temperatura de acionamento do ventilador for atingida (95–100°C), o ventilador do radiador deve ligar automaticamente.
- Se o ventilador não ligar, verifique a configuração da saída do ventilador e a temperatura de acionamento.
- Se a temperatura subir além de 100°C sem o ventilador ligar, **desligue o motor** e corrija o problema.

2.13.5 Habilitar correção de combustível em malha fechada

Quando a sonda lambda estiver aquecida e fornecendo leituras estáveis (após 30–60 segundos de funcionamento), você pode habilitar a correção de combustível de curto prazo (STFT — Short Term Fuel Trim):

- A STFT permite que a ECU corrija automaticamente a mistura em tempo real, adicionando ou removendo combustível para manter o lambda no alvo.
- A correção típica da STFT é de $\pm 15\text{--}20\%$. Se a STFT estiver consistentemente no limite (ex.: sempre $+18\%$), isso indica que a tabela VE precisa de correção naquela região.
- Habilite a STFT apenas na região de marcha lenta e cruzeiro (carga parcial). Em plena carga (WOT), o controle deve permanecer em malha aberta até que a tabela VE esteja bem calibrada.

Da primeira partida à calibração completa

Neste ponto, o motor está funcionando com uma calibração básica. Ele pega, mantém marcha lenta e está razoavelmente dentro do alvo de lambda. Isso é um excelente começo, mas ainda há um longo caminho até uma calibração otimizada. A tabela VE precisa ser ajustada em todas as regiões de operação, o avanço de ignição precisa ser otimizado para máximo torque sem detonação, as correções de temperatura precisam ser calibradas, o enriquecimento de aceleração precisa ser afinado e, no caso de motores turbo, o controle de boost precisa ser configurado. Cada um desses tópicos é abordado em detalhe nas seções seguintes deste manual.

2.14 Próximos Passos

Com o motor funcionando de forma estável na primeira calibração, o roteiro de evolução recomendado é:

1. **Calibração da tabela VE** — Utilizando o datalogger do MotroLink Manager, percorra todas as regiões de RPM e carga e corrija os valores de VE até que o lambda medido corresponda ao alvo em toda a faixa de operação. Consulte a Seção 5 (Combustível) para o procedimento detalhado.
2. **Otimização do avanço de ignição** — Idealmente em dinamômetro, avance a ignição em cada ponto de operação até o torque máximo (MBT), recuando antes do limiar de detonação. Consulte a Seção 6 (Ignição).
3. **Correções de temperatura** — Calibre as correções de enriquecimento a frio (warm-up enrichment), a curva de enriquecimento pós-partida e as correções de IAT para garantir que o motor funcione bem em todas as faixas de temperatura. Consulte as Seções 5 e 6.
4. **Enriquecimento de aceleração** — Calibre o enriquecimento transitório (accel enrichment) para eliminar hesitação e buraco na aceleração. Consulte a Seção 5.

5. **Controle de boost** (se turbo) — Configure o controle da válvula wastegate ou blow-off, defina a curva de boost alvo por marcha ou RPM e calibre o PID. Consulte a Seção 10.
6. **Marcha lenta em malha fechada** — Com a tabela VE corrigida e a posição base da IAC/ETB ajustada, habilite o controle PID de marcha lenta e calibre os ganhos para uma marcha lenta estável e rápida na resposta. Consulte a Seção 8.
7. **Validação completa** — Realize uma sessão de validação com datalogger, percorrendo todas as condições de operação (partida a frio, aquecimento, marcha lenta, cruzeiro, aceleração, plena carga, desaceleração) e verifique que todos os parâmetros estão dentro do esperado. Consulte a Seção 20 (Dicas e Diagnóstico).

A calibração de um motor é um processo iterativo. Cada ajuste melhora o funcionamento e revela novos pontos que podem ser otimizados. Não tenha pressa — uma calibração bem feita é o resultado de metodologia, paciência e muitas horas de datalog.

Parte II

Configuração do Motor e Sensores

3 Configuração Inicial do Motor

Antes de iniciar qualquer calibração de combustível ou ignição, é fundamental que a ECU conheça as características físicas e elétricas do motor que será gerenciado. A configuração inicial do motor é o alicerce sobre o qual todo o restante da calibração será construído. Um erro nesta etapa — por menor que pareça — pode causar desde falhas de sincronismo até danos mecânicos graves ao motor.

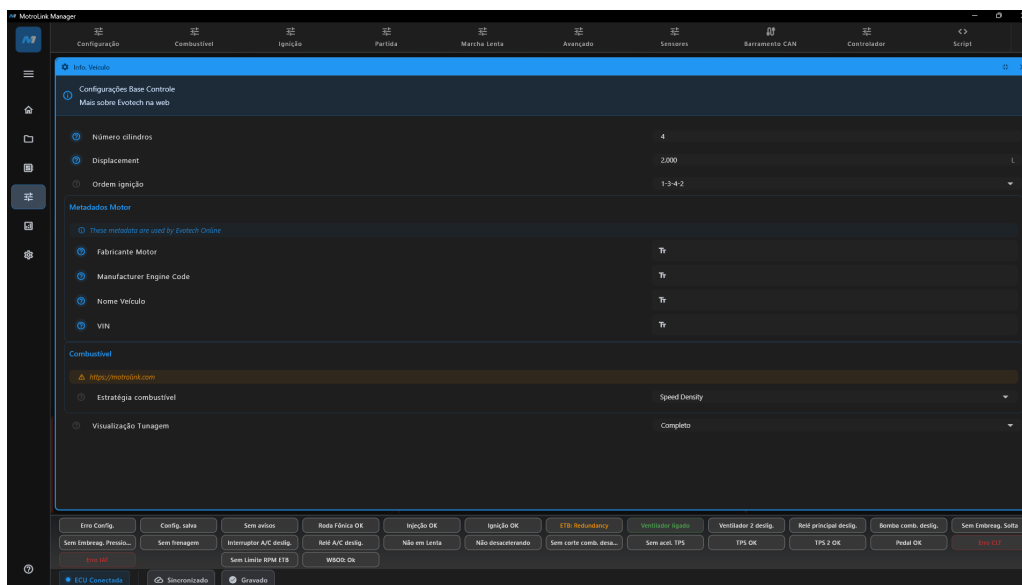
Esta seção cobre todos os parâmetros de configuração inicial disponíveis no MotroLink Manager, desde as informações básicas do veículo até as proteções e limites de segurança. Recomenda-se seguir a ordem apresentada aqui, pois cada subsistema depende das configurações anteriores para funcionar corretamente.

! Antes de Começar

Certifique-se de que a ECU está corretamente instalada no veículo, com todas as conexões elétricas verificadas conforme o diagrama de fiação fornecido pela MotroLink. A comunicação entre o MotroLink Manager e a ECU deve estar estabelecida e estável antes de alterar qualquer parâmetro.

3.1 Informações do Veículo

A tela de informações do veículo é o ponto de partida absoluto da configuração. Aqui são definidas as características fundamentais do motor que a ECU utilizará para calcular tempos de injeção, ângulos de ignição, sequenciamento de cilindros e diversas outras funções internas.



Tela de Informações do Veículo no MotroLink Manager.

3.1.1 Número de Cilindros

O número de cilindros informa à ECU quantos eventos de combustão ocorrem por ciclo completo do motor (720 extdegree de virabrequim em motores 4 tempos). Este parâmetro afeta diretamente:

- O cálculo do tempo de injeção por cilindro.
- O sequenciamento das bobinas de ignição.
- A interpretação dos sinais da roda fônica.
- Os cálculos de fluxo de ar e eficiência volumétrica.

Configure este campo com o número exato de cilindros do motor: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 ou 12. Motores com configurações atípicas (por exemplo, 3 cilindros) são suportados normalmente.

Motores com cilindros desativados

Se o motor possui sistema de desativação de cilindros (por exemplo, um V8 que opera como V4 em certas condições), configure sempre o número total de cilindros fisicamente presentes. O gerenciamento da desativação é feito em outra camada de controle.

3.1.2 Cilindrada

A cilindrada total do motor, expressa em centímetros cúbicos (cc) ou litros, é utilizada nos cálculos de eficiência volumétrica (VE) e fluxo de ar. A ECU divide a cilindrada total pelo número de cilindros para obter o volume unitário de cada cilindro.

Por exemplo, um motor 2.0L de 4 cilindros tem cilindrada total de 2000 cc e volume unitário de 500 cc. Insira o valor total (2000), e não o valor por cilindro.

Motores modificados

Se o motor foi retificado com aumento de diâmetro dos pistões (overbore) ou possui virabrequim com curso alterado, recalcule a cilindrada real e insira o valor correto. Utilizar a cilindrada original de fábrica em um motor modificado resultará em erros nos cálculos de VE e, conseqüentemente, em uma mistura incorreta.

3.1.3 Ordem de Ignição

A ordem de ignição (firing order) define a sequência na qual os cilindros realizam a combustão. Este parâmetro é essencial para o correto sequenciamento tanto das bobinas de ignição quanto dos injetores em modo sequencial.

Exemplos comuns de ordens de ignição:

- **4 cilindros em linha:** 1-3-4-2 (mais comum) ou 1-2-4-3.
- **6 cilindros em linha:** 1-5-3-6-2-4.
- **V6 a 60 extdegree:** 1-2-3-4-5-6 (depende do fabricante).
- **V8 (GM/Chevrolet):** 1-8-4-3-6-5-7-2.
- **V8 (Ford):** 1-3-7-2-6-5-4-8.
- **V8 (Chrysler/Mopar):** 1-8-4-3-6-5-7-2.

! Verificação obrigatória

Consulte sempre o manual de serviço do fabricante do motor para confirmar a ordem de ignição. Utilizar uma ordem incorreta pode causar explosões no coletor de admissão (backfire) ou no escapamento, podendo danificar componentes mecânicos.

3.1.4 Tipo de Injeção

O tipo de injeção define como e quando os injetores são acionados em relação ao ciclo do motor. O MotroLink Manager suporta quatro modos de injeção, cada um com características e aplicações distintas:

Injeção Sequencial Na injeção sequencial, cada injetor é acionado individualmente, uma vez por ciclo completo do motor (720 extdegree de virabrequim em motores 4 tempos). O combustível é injetado no momento ideal em relação à abertura da válvula de admissão de cada cilindro específico.

Vantagens:

- Controle preciso da quantidade de combustível por cilindro.
- Permite ajuste individual de cilindro a cilindro (trim de injetores).
- Melhor atomização do combustível, pois a injeção é sincronizada com o fluxo de ar.
- Menor consumo e menores emissões em comparação com outros modos.
- Resposta mais rápida a mudanças de demanda (transientes).

Requisitos:

- Sensor de fase (came) instalado e funcionando corretamente.
- Uma saída de injetor dedicada por cilindro na ECU.
- Fiação individual para cada injetor.

Quando usar: Sempre que possível. É o modo mais preciso e eficiente, sendo o padrão em veículos modernos de injeção eletrônica.

Injeção Semi-Sequencial Na injeção semi-sequencial, os injetores são agrupados em pares e acionados a cada 360 extdegree de virabrequim. Cada par de injetores dispara simultaneamente: enquanto um cilindro está no tempo de admissão (aproveitando o combustível), o outro está no tempo de escapamento (o combustível fica depositado na porta de admissão, aguardando o próximo ciclo de admissão).

Vantagens:

- Não requer sensor de fase (came).
- Utiliza metade das saídas de injetor em comparação com a sequencial.
- Desempenho aceitável para a maioria das aplicações de rua e competição.

Desvantagens:

- Parte do combustível injetado fica aguardando na porta do cilindro que está no tempo de escapamento, o que pode causar leve imprecisão na dosagem.
- Não permite ajuste individual por cilindro de forma tão precisa.

Quando usar: Em instalações que não possuem sensor de fase, ou quando o número de saídas da ECU é limitado.

Injeção Batch (em Lote) Na injeção batch, todos os injetores são acionados simultaneamente, normalmente duas vezes por ciclo do motor (a cada 360 extdegree de virabrequim). A quantidade de combustível injetada em cada evento é metade do total necessário para o ciclo completo.

Vantagens:

- Configuração muito simples — todos os injetores podem compartilhar uma única saída.
- Não requer sensor de fase.
- Funciona bem em motores mais antigos ou de menor exigência.

Desvantagens:

- Sem controle individual de cilindro.
- Menor precisão na dosagem de combustível.
- Maior consumo em comparação com modos sequenciais.
- Não ideal para motores de alta performance ou com exigências rigorosas de emissões.

Quando usar: Em motores de configuração simples, projetos antigos sendo retrofittados com injeção eletrônica, ou quando a simplicidade de instalação é prioritária.

Injeção Simultânea Na injeção simultânea, todos os injetores disparam ao mesmo tempo, uma vez por revolução do virabrequim (360 extdegree). É similar à batch, mas com um único evento de injeção por revolução, em vez de eventos distribuídos.

Vantagens:

- Simplicidade máxima de fiação e configuração.
- Adequada para motores monocilíndricos ou de baixa complexidade.

Desvantagens:

- As mesmas limitações da injeção batch, com ainda menos flexibilidade de temporização.

Quando usar: Apenas em casos específicos onde os demais modos não são viáveis.

i Escolha prática

Na dúvida, comece com injeção semi-sequencial. Ela oferece um bom equilíbrio entre simplicidade e desempenho. Após validar o funcionamento geral do motor, migre para sequencial se o hardware (sensor de fase e saídas da ECU) permitir.

3.1.5 Tipo de Ignição

O tipo de ignição define como as bobinas são acionadas para gerar a centelha nas velas. A escolha correta depende do hardware instalado no motor:

Bobina Individual (Coil-on-Plug — COP) Cada cilindro possui sua própria bobina de ignição, montada diretamente sobre a vela (ou conectada por cabo curto). A ECU aciona cada bobina individualmente no momento exato da ignição de cada cilindro.

Vantagens:

- Controle individual e preciso do avanço de ignição por cilindro.
- Maior energia de centelha disponível (a bobina tem o ciclo completo para carregar).
- Eliminação de cabos de vela longos, reduzindo perdas e interferências eletromagnéticas.
- Diagnóstico facilitado — falhas são isoladas por cilindro.

Requisitos:

- Uma saída de ignição por cilindro na ECU.
- Bobinas compatíveis (com driver interno ou driver externo, conforme a ECU).

Quando usar: Sempre que possível. É o padrão em motores modernos e oferece o melhor desempenho.

Centelha Perdida (Wasted Spark) No sistema de centelha perdida, uma única bobina alimenta duas velas de cilindros cujos pistões estão em posições opostas (um no TDC de compressão e outro no TDC de escapamento). A centelha ocorre em ambos os cilindros simultaneamente, mas apenas um deles está no tempo de compressão — a centelha no outro cilindro é “perdida” (desperdiçada), pois não há mistura comprimida para queimar.

Vantagens:

- Utiliza metade das saídas de ignição em comparação com COP.
- Não requer sensor de fase para funcionar.
- Hardware mais simples e de menor custo.

Desvantagens:

- A centelha desperdiçada causa desgaste adicional nas velas do cilindro em escapamento.
- Menor flexibilidade para ajuste individual de cilindros.

- A bobina precisa gerar energia suficiente para produzir centelha em dois gaps de vela simultaneamente.

Quando usar: Em motores que originalmente utilizam este sistema (muitos 4 cilindros dos anos 1990–2000), ou quando o número de saídas de ignição da ECU é limitado.

Bobina Única com Distribuidor Um único canal de ignição da ECU aciona uma única bobina. A alta tensão gerada é distribuída mecanicamente para cada vela pelo distribuidor rotativo (rotor e tampa do distribuidor). A ECU controla apenas o momento da centelha (avanço), enquanto a distribuição mecânica direciona a faísca ao cilindro correto.

Vantagens:

- Apenas uma saída de ignição necessária na ECU.
- Compatível com motores antigos que utilizam distribuidor.
- Configuração elétrica simples.

Desvantagens:

- Desgaste mecânico do distribuidor (rotor, tampa, contatos).
- Perdas de energia nos cabos de vela longos.
- Sem possibilidade de ajuste individual de avanço por cilindro.
- Limitação de RPM máximo devido à parte mecânica.

Quando usar: Em motores antigos que mantêm o distribuidor original, onde a substituição por COP ou centelha perdida não é viável ou desejada.

⚠ Compatibilidade de bobinas

Verifique sempre se as bobinas de ignição instaladas são compatíveis com o tipo de driver da ECU. Bobinas com driver interno (smart coils) são acionadas diretamente por um sinal lógico, enquanto bobinas sem driver (dumb coils) requerem um módulo de potência (ignitor) externo. Conectar uma bobina sem driver diretamente à saída da ECU pode danificar ambos os componentes.

3.1.6 Relação de Compressão

A relação de compressão (taxa de compressão) é a razão entre o volume total do cilindro (com o pistão no ponto morto inferior — PMI) e o volume da câmara de combustão (com o pistão no ponto morto superior — PMS). É expressa como um valor adimensional, por exemplo, 10.5:1.

A ECU utiliza este parâmetro como referência para:

- Estimativas internas de pressão na câmara de combustão.
- Modelos preditivos de detonação (knock).
- Limites de avanço de ignição seguros.

Como determinar: Consulte o manual do fabricante do motor. Se o motor foi modificado (pistões forjados, cabeçote faceado, junta de cabeçote de diferente espessura), recalcule a taxa de compressão efetiva.

Valores típicos:

- Motores aspirados a gasolina: 9.0:1 a 13.0:1.
- Motores turbo a gasolina: 8.0:1 a 10.0:1.
- Motores a etanol (aspirados): 10.0:1 a 14.0:1.
- Motores a etanol (turbo): 8.5:1 a 11.0:1.

3.1.7 Tipo de Combustível

O tipo de combustível informa à ECU qual o combustível primário que será utilizado. Este parâmetro influencia:

- A estequiometria alvo (relação ar/combustível ideal).
- As tabelas de enriquecimento e empobrecimento.
- Os limites de avanço de ignição.
- O comportamento do sensor de oxigênio (sonda lambda).

Opções típicas incluem:

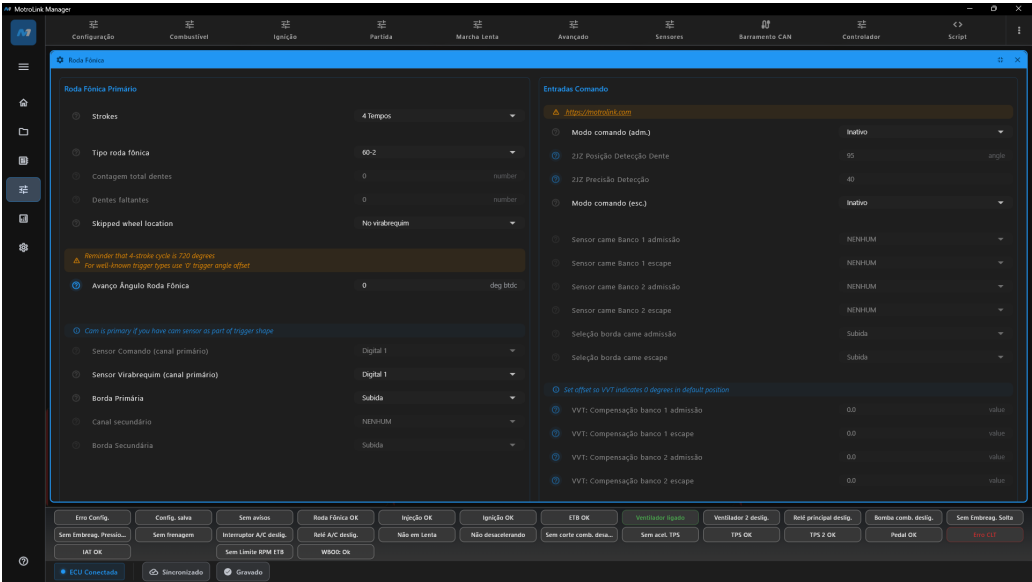
- **Gasolina (Gasoline):** Estequiometria de 14.7:1 (AFR). Combustível padrão na maioria dos mercados internacionais.
- **Etanol (E100):** Estequiometria de aproximadamente 9.0:1 (AFR). Combustível predominante no Brasil. Permite maiores avanços de ignição e maior potência em motores com taxa de compressão adequada.
- **Flex (E20–E85):** Para veículos flex-fuel que operam com misturas variáveis de gasolina e etanol. A ECU pode utilizar um sensor de composição de combustível (flex-fuel sensor) para determinar automaticamente a proporção da mistura.
- **Metanol:** Estequiometria de aproximadamente 6.4:1. Utilizado em competição. Requer injetores de alta vazão.
- **GNV/GLP:** Combustíveis gasosos com características específicas de injeção e ignição.

! Combustível e segurança do motor

A escolha incorreta do tipo de combustível pode levar a misturas extremamente pobres (risco de detonação e dano a pistões) ou extremamente ricas (lavagem de cilindro, diluição do óleo). Confirme o combustível utilizado antes de dar a partida no motor.

3.2 Roda Fônica

A roda fônica (trigger wheel ou crank wheel) é o componente que fornece à ECU a informação de posição angular e velocidade de rotação do virabrequim. Sem este sinal, a ECU não consegue determinar quando injetar combustível ou quando gerar a centelha. É, portanto, o sensor mais crítico de todo o sistema de gerenciamento eletrônico do motor.



Tela de configuração da Roda Fônica no MotroLink Manager .

3.2.1 Tipo de Roda Fônica

A roda fônica consiste em um disco dentado montado no virabrequim (ou na polia do virabrequim) com um padrão específico de dentes e falhas (dentes ausentes). A ECU conta os dentes e identifica as falhas para determinar a posição exata do virabrequim.

Os tipos mais comuns são:

- **60-2:** 60 dentes com 2 dentes consecutivos ausentes (falha). É o padrão mais utilizado mundialmente. A falha ocorre em uma posição conhecida em relação ao PMS do cilindro 1. Cada dente corresponde a 6 extdegree de virabrequim, proporcionando boa resolução angular.
- **36-1:** 36 dentes com 1 dente ausente. Cada dente corresponde a 10 extdegree de virabrequim. Comum em motores europeus e asiáticos mais antigos.
- **36-2-2-2:** 36 dentes com três falhas de 2 dentes cada, distribuídas a cada 120 extdegree. Utilizada em alguns motores Ford.
- **12-1:** 12 dentes com 1 ausente. Resolução de 30 extdegree por dente. Encontrada em motores mais simples.
- **4-1:** 4 dentes com 1 ausente. Resolução muito baixa (90 extdegree por dente). Utilizada raramente.
- **Outras:** O MotroLink Manager suporta diversos padrões adicionais. Consulte a lista completa no software.

i Resolução angular

Quanto maior o número de dentes, maior a resolução angular e, consequentemente, maior a precisão no controle de injeção e ignição, especialmente em altas rotações. A roda 60-2 é a escolha ideal para a maioria das aplicações de alta performance.

3.2.2 Sensor Primário (Virabrequim)

O sensor primário é o sensor que lê a roda fônica do virabrequim. Existem três tipos principais, e a escolha correta é fundamental para a qualidade do sinal:

Sensor Hall O sensor de efeito Hall é um sensor ativo (requer alimentação elétrica) que produz um sinal digital de onda quadrada. A tensão alterna entre um nível alto (tipicamente 5V ou 12V) e um nível baixo (0V) conforme os dentes da roda fônica passam pela face do sensor.

Vantagens:

- Sinal limpo e de amplitude constante, independente da rotação do motor.
- Funciona perfeitamente em baixas rotações (partida).
- Menos suscetível a ruídos eletromagnéticos.
- Bordas de sinal bem definidas, facilitando a interpretação pela ECU.

Desvantagens:

- Requer alimentação elétrica (fio de 5V ou 12V, terra e sinal).
- Pode ser danificado por sobretensão.

Sensor VR (Relutância Variável) O sensor VR (Variable Reluctance), também chamado de sensor indutivo passivo, é um sensor que gera seu próprio sinal elétrico por indução eletromagnética. Quando um dente da roda fônica se aproxima e se afasta do sensor, a variação no campo magnético induz uma tensão alternada (AC) no sensor.

Vantagens:

- Não requer alimentação elétrica (apenas dois fios: sinal e terra).
- Extremamente robusto e durável.
- Muito utilizado em aplicações industriais e automotivas OEM.

Desvantagens:

- A amplitude do sinal é proporcional à rotação: em baixas RPMs (partida com motor de arranque), o sinal pode ser muito fraco e difícil de interpretar.
- Requer um limiar (threshold) bem ajustado na ECU para detectar corretamente os dentes e as falhas.
- Mais suscetível a ruídos eletromagnéticos, especialmente em ambientes com bobinas de ignição e alternadores.

Sensor Indutivo (com condicionamento interno) Alguns sensores indutivos modernos possuem circuitos internos de condicionamento de sinal, produzindo uma saída digital similar à do sensor Hall, mas baseada no princípio indutivo. Eles combinam a robustez do sensor VR com a qualidade de sinal do Hall.

Importante: No MotroLink Manager, selecione o tipo correto de sensor. Se o sensor é VR puro (dois fios, sem alimentação), selecione “VR”. Se o sensor é Hall ou indutivo com saída digital (três fios, com alimentação), selecione “Hall”.

Identificação do sensor

Na dúvida sobre o tipo do sensor, meça a resistência entre os dois terminais com um multímetro. Sensores VR típicos apresentam resistência entre 200 Ω e 1500 Ω . Sensores Hall apresentam resistência muito alta (circuito aberto) entre o pino de sinal e o terra, pois possuem circuito eletrônico interno.

3.2.3 Sensor Secundário (Came / Fase)

O sensor secundário, também chamado de sensor de fase ou sensor de came, é montado no eixo do comando de válvulas. Sua função principal é distinguir entre os dois ciclos de um motor 4 tempos:

- O virabrequim completa duas voltas (720 extdegree) para cada ciclo completo.
- Apenas com o sensor de virabrequim, a ECU sabe a posição angular, mas não sabe se o cilindro 1 está no PMS de compressão ou no PMS de escapamento.
- O sensor de fase resolve essa ambiguidade, pois o comando de válvulas gira a metade da velocidade do virabrequim.

Quando é obrigatório:

- Injeção sequencial.
- Sistemas com VVT (Variable Valve Timing).
- Motores com ignição bobina individual (para identificação precisa de cilindro).

Quando é opcional:

- Injeção batch ou semi-sequencial com centelha perdida — nestas configurações, a ECU funciona plenamente apenas com o sensor de virabrequim.

Configure o tipo do sensor de fase da mesma forma que o sensor primário (Hall ou VR), de acordo com o hardware instalado.

3.2.4 Offset de Sincronismo (Trigger Angle Offset)

O offset de sincronismo é o parâmetro que alinha a posição angular relatada pela roda fônica com a posição real do PMS (Ponto Morto Superior) do cilindro número 1. Este valor compensa a posição física da falha da roda fônica em relação ao PMS.

Por que é necessário: A falha da roda fônica raramente está exatamente no PMS. Ela pode estar a 90 extdegree, 114 extdegree, ou qualquer outro ângulo antes ou depois

do PMS, dependendo de como a roda foi fabricada e montada. O offset informa à ECU: “A falha da roda fônica está a X graus do PMS do cilindro 1”.

Como ajustar:

1. Conecte uma lâmpada estroboscópica (pistola de ponto) ao cabo de vela do cilindro 1.
2. No MotroLink Manager, fixe (trave) o avanço de ignição em um valor conhecido, por exemplo, 10 extdegree BTDC (antes do PMS).
3. Dê partida no motor e ilumine a marca de ponto na polia ou volante com o estroboscópio.
4. Compare a marca iluminada com a referência de PMS do motor (geralmente uma marca no bloco ou na tampa de distribuição).
5. Se a marca indica um ângulo diferente dos 10 extdegree configurados, ajuste o offset até que a marca coincida com o valor travado.

Offset incorreto — risco de dano ao motor

Um offset de sincronismo incorreto faz com que a ECU aplique o avanço de ignição no momento errado. Se o avanço real estiver muito adiantado em relação ao desejado, ocorrerá detonação severa, podendo destruir pistões, bielas e bronzinas em questão de segundos. **Sempre** verifique o offset com pistola de ponto antes de acelerar o motor além da marcha lenta.

3.2.5 Como Verificar se a Roda Fônica Está OK

Após configurar todos os parâmetros da roda fônica, é fundamental verificar se a ECU está interpretando o sinal corretamente:

1. **Verificar RPM na partida:** Durante o acionamento do motor de arranque (sem dar partida), a leitura de RPM no MotroLink Manager deve mostrar um valor estável entre 150 e 350 RPM, dependendo do motor. Se o valor flutua excessivamente ou mostra zero, há problema de sinal.
2. **Verificar erros de sincronismo:** O MotroLink Manager exibe contadores de erros de trigger (trigger errors). Este contador deve permanecer em zero ou com valores muito baixos durante a operação normal. Erros constantes indicam problema de gap do sensor, ruído elétrico ou configuração incorreta.
3. **Verificar estabilidade em diferentes RPMs:** Com o motor funcionando, varie a rotação lentamente e observe se a leitura de RPM é suave e sem saltos.
4. **Log do sinal:** Utilize a função de log do MotroLink Manager para gravar o sinal da roda fônica e analisá-lo visualmente, verificando a regularidade dos dentes e a detecção correta das falhas.

Gap do sensor

O gap (distância) entre a face do sensor e os dentes da roda fônica é crítico. Para sensores VR, o gap típico é de 0,5 mm a 1,0 mm. Para sensores Hall, pode ser um pouco maior (1,0 mm a 1,5 mm). Um gap excessivo enfraquece o sinal; um gap muito pequeno pode causar contato mecânico.

3.3 Roda Fônica Avançada

Os parâmetros avançados da roda fônica permitem refinar a interpretação do sinal em condições difíceis ou com hardware não ideal. Estes ajustes são especialmente úteis em motores com sensores VR, ambientes com alto ruído eletromagnético, ou rodas fônicas com imperfeições mecânicas.

3.3.1 VR Threshold Curves (Curvas de Limiar VR)

Sensores VR geram um sinal analógico cuja amplitude é proporcional à velocidade de rotação do motor. Em baixas rotações (partida), o sinal pode ter apenas algumas centenas de milivolts, enquanto em altas rotações pode ultrapassar 100V pico-a-pico.

A curva de limiar (threshold) define a tensão mínima que a ECU considera como um “dente” em função da rotação. Se o limiar for fixo, ocorrem dois problemas:

- **Limiar muito baixo:** Funciona bem em baixas RPMs, mas em altas RPMs pode capturar ruído como se fosse dente, causando erros de trigger.
- **Limiar muito alto:** Funciona bem em altas RPMs, mas em baixas RPMs o sinal não é forte o suficiente para ultrapassar o limiar, e a ECU perde dentes.

A solução é uma curva adaptativa: o limiar aumenta proporcionalmente com a rotação. No MotroLink Manager, esta curva é definida por pontos de RPM e seus respectivos valores de limiar em volts.

Como ajustar:

1. Comece com os valores padrão fornecidos pelo MotroLink Manager.
2. Se o motor apresenta dificuldade de partida (RPM instável durante o cranking), reduza o limiar nos pontos de baixa rotação (abaixo de 500 RPM).
3. Se ocorrem erros de trigger em alta rotação, aumente o limiar nos pontos acima de 4000 RPM.
4. Faça ajustes incrementais e verifique o contador de erros de trigger após cada alteração.

Sensores Hall e limiares

Se o sensor primário ou secundário é do tipo Hall, as curvas de limiar VR não se aplicam e podem ser ignoradas. Elas são relevantes exclusivamente para sensores VR (relutância variável).

3.3.2 Filtro de Ruído (Noise Filter)

O filtro de ruído é um processamento digital que a ECU aplica ao sinal da roda fônica para rejeitar pulsos espúrios causados por interferência eletromagnética. Fontes comuns de ruído incluem:

- Bobinas de ignição (especialmente sistemas DIS e COP).
- Alternador (retificador e regulador de tensão).
- Bomba de combustível elétrica.
- Motor de partida (motor de arranque).
- Fiação de alta corrente próxima aos cabos de sinal.

O filtro funciona rejeitando pulsos que ocorrem com intervalo de tempo menor que um valor mínimo esperado para aquela rotação. Por exemplo, se a roda fônica tem 60 dentes e o motor está a 6000 RPM, o intervalo entre dentes consecutivos é de aproximadamente $167\text{ }\mu\text{s}$. Um pulso que chega após apenas $50\text{ }\mu\text{s}$ é claramente ruído e pode ser filtrado.

Níveis de filtro:

- **Desligado:** Sem filtragem. Usar apenas se o sinal é comprovadamente limpo.
- **Baixo:** Filtragem suave. Remove apenas ruídos muito evidentes. Recomendado como ponto de partida.
- **Médio:** Filtragem moderada. Adequada para a maioria das instalações.
- **Alto:** Filtragem agressiva. Pode introduzir leve atraso na detecção de dentes. Usar apenas se níveis menores não resolvem o problema de ruído.

! Filtragem excessiva

Não use filtro “Alto” como solução permanente para problemas de ruído. A filtragem agressiva pode mascarar problemas de fiação ou aterramento que devem ser corrigidos na raiz. Em altas rotações, filtros muito agressivos podem causar perda de dentes legítimos.

3.3.3 Gap Override (Sobreposição de Detecção de Falha)

O gap override permite ajustar manualmente o critério que a ECU utiliza para detectar a falha (dentes ausentes) na roda fônica. Normalmente, a ECU detecta a falha quando o intervalo entre dois pulsos consecutivos é significativamente maior que o intervalo dos dentes normais (tipicamente 1,5x a 2,5x o intervalo de um dente normal).

Por que ajustar:

- Rodas fônicas com desgaste mecânico podem ter dentes irregulares, causando falsa detecção de gap.
- Rodas fônicas não padronizadas podem ter proporções de falha diferentes das esperadas.

- Em motores com variação significativa de velocidade instantânea (monocilíndricos, bicilíndricos), a aceleração e desaceleração natural do virabrequim dentro de cada revolução pode confundir a detecção de falha.

Como ajustar:

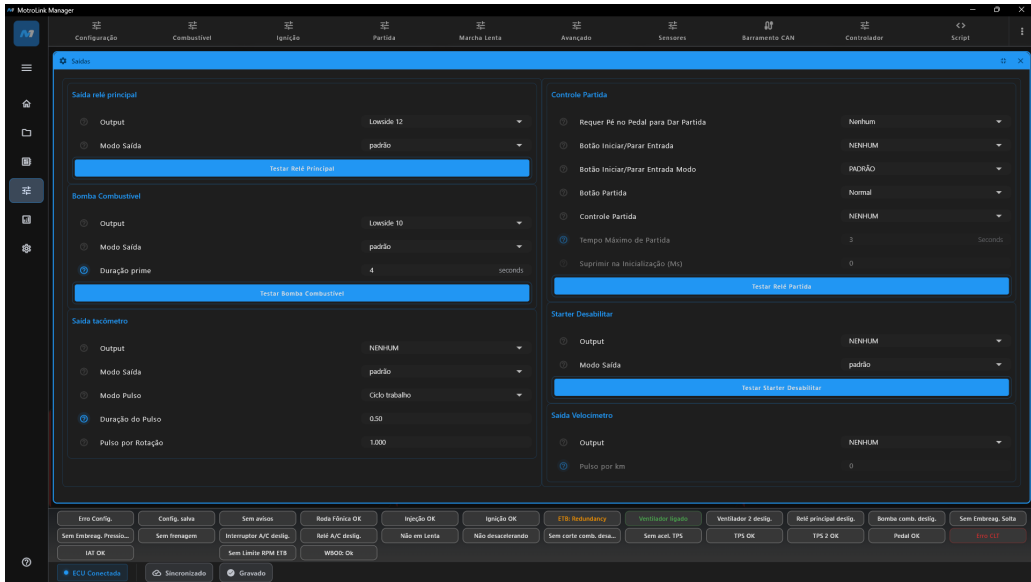
- Aumente o valor se a ECU está detectando falhas onde não existem (falsos gaps) — o contador de trigger errors aumenta e o RPM fica instável.
- Diminua o valor se a ECU não está detectando a falha real (perde a sincronização) — o motor não dá partida ou morre intermitentemente.

Uso conservador

Na grande maioria das instalações, os valores padrão de gap override funcionam corretamente. Altere este parâmetro apenas se houver evidência clara de problemas de sincronismo que não foram resolvidos com ajuste de gap do sensor, fiação e filtragem de ruído.

3.4 Saídas

A configuração de saídas (outputs) é onde se define qual pino físico da ECU controla qual componente do motor. Esta etapa é absolutamente crítica, pois um mapeamento incorreto pode resultar em injetores acionando cilindros errados, bobinas disparando fora de sequência, ou relés sendo ativados no momento inadequado.



Tela de mapeamento de saídas no MotroLink Manager .

3.4.1 Injetores

Cada injetor deve ser atribuído ao pino de saída correto da ECU, respeitando a numeração dos cilindros e a ordem de ignição configurada anteriormente. Em modo sequencial, cada cilindro terá seu próprio pino de injetor. Em modo semi-sequencial, os cilindros são agrupados em pares.

Como configurar:

1. Identifique qual fio da fiação (harness) da ECU está conectado a cada injetor no motor.
2. No MotroLink Manager , atribua a saída do cilindro 1 ao pino correspondente ao injetor do cilindro 1, e assim por diante.
3. Após a configuração, utilize a função de teste de bancada (bench test) para verificar se cada injetor clica no cilindro correto.

Verificação obrigatória

Antes de dar a partida, use o bench test para confirmar fisicamente que cada injetor está associado ao cilindro correto. Com o motor desligado e a bomba de combustível desativada, ative cada injetor individualmente pelo software e confirme (pelo som do clique) que o injetor correto está respondendo.

3.4.2 Bobinas de Ignição

Da mesma forma que os injetores, cada bobina (ou par de bobinas, no caso de centelha perdida) deve ser mapeada para o pino de saída correto. A numeração das saídas de ignição segue a mesma lógica da numeração de cilindros.

Pontos de atenção:

- Em sistemas COP (bobina individual), cada bobina tem seu próprio pino.
- Em sistemas de centelha perdida, cada pino controla uma bobina que atende dois cilindros.
- Em sistemas com bobina única e distribuidor, há apenas um pino de ignição.
- Verifique a polaridade do sinal: algumas bobinas requerem sinal ativo em nível alto (rising edge), outras em nível baixo (falling edge).

3.4.3 Relés

O MotroLink Manager permite o controle de diversos relés por meio de saídas dedicadas:

- **Relé Principal (Main Relay):** Controla a alimentação principal da ECU e dos atuadores. Quando a chave de ignição é ligada, este relé é ativado para fornecer energia ao sistema. Ele permanece energizado por alguns segundos após o desligamento (para salvar dados e finalizar processos internos).
- **Relé da Bomba de Combustível (Fuel Pump Relay):** Controla a bomba de combustível. A ECU ativa este relé por alguns segundos ao ligar a ignição (para pressurizar a linha de combustível) e mantém-no ativo enquanto o motor estiver funcionando. Se o motor morrer, o relé é desativado após um tempo de segurança, evitando que a bomba continue operando com o motor parado (risco em caso de vazamento de combustível).

Temporização do relé da bomba

A pré-pressurização da bomba de combustível (priming) ao ligar a chave é configurável em duração e pode ser desativada se necessário. O tempo típico de priming é de 2 a 5 segundos.

3.4.4 Saídas Auxiliares

As saídas auxiliares são pinos de uso geral (GPIO — General Purpose Input/Output) que podem ser configurados para diversas funções, como:

- Controle de eletroválvulas (purga do canister, wastegate eletrônica, válvula de recirculação de gases — EGR).
- Acionamento de embreagem do compressor de ar condicionado.
- Controle de aquecedor da sonda lambda (heater).
- Saídas para tacômetro (conta-giros) do painel.
- Saídas de sinal para shift light (luz de troca de marchas).
- Controle de sistemas de nitro (injeção de óxido nitroso).

Cada saída auxiliar pode ser configurada como:

- **On/Off:** Liga ou desliga com base em condições (RPM, temperatura, pressão, etc.).
- **PWM:** Sinal modulado por largura de pulso, com frequência e duty cycle configuráveis, para controle proporcional de atuadores.

3.4.5 LEDs Indicadores

A ECU pode possuir LEDs de diagnóstico que indicam estados do sistema. No MotroLink Manager, é possível configurar o significado de cada LED:

- LED de comunicação (pisca durante a comunicação com o software).
- LED de erro (acende quando há falhas ativas).
- LED de status do motor (aceso = motor funcionando).
- LED de check engine (MIL — Malfunction Indicator Lamp), que pode ser mapeado para uma saída externa conectada à lâmpada do painel.

3.5 Bateria e Alternador

O sistema de controle de tensão da bateria e alternador permite que a ECU gerencie a tensão de carga do sistema elétrico do veículo. Isto é especialmente relevante em veículos com alternadores de carga variável, onde a ECU controla o duty cycle do regulador de tensão.

3.5.1 Tensão Alvo

A tensão alvo da bateria define o valor que a ECU tentará manter no sistema elétrico. Em condições normais de operação, a tensão ideal de carga é:

- **12V nominais:** Tensão de carga entre 13,8V e 14,4V.
- **Em partida (cranking):** A tensão pode cair para 9V–11V e isso é normal.
- **Com carga elétrica alta:** Faróis, ar condicionado, som potente — a tensão alvo pode ser ligeiramente aumentada para compensar.

3.5.2 Tabela de Tensão por RPM e Carga

Em sistemas avançados, a tensão alvo pode variar em função da rotação e da carga elétrica do veículo. A ECU utiliza uma tabela bidimensional (RPM vs. carga elétrica estimada) para determinar o duty cycle ideal do alternador.

Configuração típica:

- Em marcha lenta com baixa carga elétrica: duty menor (menor tensão de carga), para reduzir a carga mecânica no motor e melhorar a estabilidade da marcha lenta.
- Em cruzeiro com carga elétrica moderada: duty médio, mantendo a tensão de carga nominal.
- Em alta rotação com alta carga elétrica: duty maior, para garantir a carga adequada da bateria.

3.5.3 Pino de Controle do Alternador

Configure qual saída da ECU está conectada ao terminal de controle do alternador. Este pino envia um sinal PWM ao regulador de tensão do alternador para controlar a corrente de campo.

Pontos de atenção:

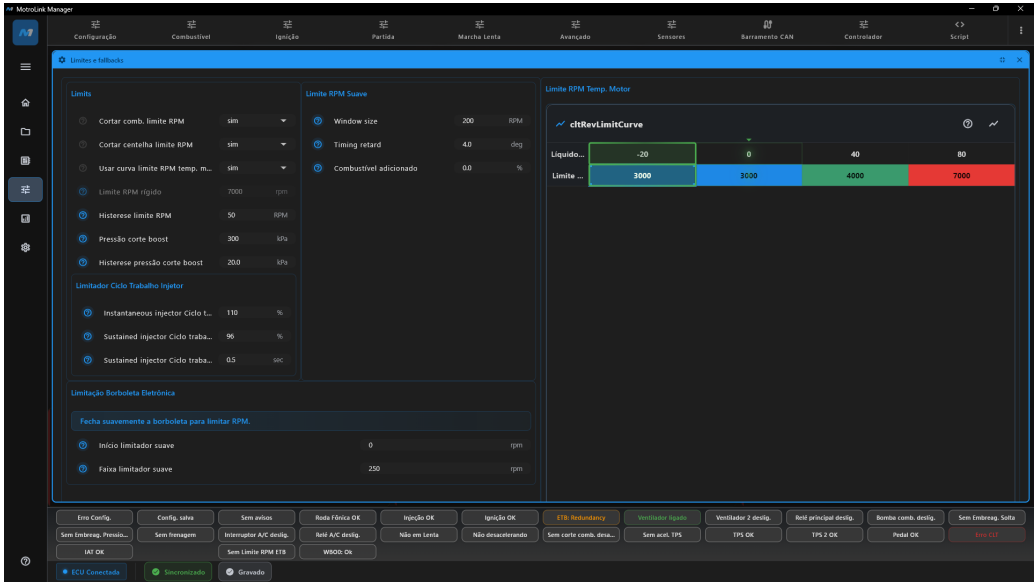
- Nem todos os alternadores são compatíveis com controle eletrônico. Alternadores com regulador interno fixo não possuem terminal de controle externo.
- A frequência do sinal PWM varia conforme o fabricante do alternador. Valores típicos são de 100 Hz a 400 Hz.
- Se o veículo não utiliza controle eletrônico de alternador, esta função pode ser desabilitada.

Compensação de tensão da bateria

Independente do controle do alternador, a ECU utiliza a leitura de tensão da bateria para compensar automaticamente os tempos de abertura dos injetores (dead time) e o tempo de carga das bobinas de ignição (dwell time). Quanto menor a tensão, maior o tempo necessário para abrir os injetores e carregar as bobinas. Esta compensação ocorre internamente e é fundamental para a precisão do sistema.

3.6 Limites e Proteções

Os limites e proteções são mecanismos de segurança que impedem o motor de operar em condições que possam causar danos mecânicos. Uma configuração cuidadosa destes parâmetros pode ser a diferença entre um motor que sobrevive a uma situação anormal e um motor que sofre falha catastrófica.



Tela de Limites e Proteções no MotroLink Manager .

3.6.1 Limitador de Rotação (Rev Limiter)

O limitador de rotação impede que o motor ultrapasse uma rotação máxima segura. Quando o RPM atinge o limite configurado, a ECU intervém para reduzir a rotação. Os métodos de limitação incluem:

- **Corte de combustível (Fuel Cut):** A ECU interrompe a injeção de combustível em parte ou todos os cilindros. É o método mais suave e mais comum. A reativação ocorre quando o RPM cai abaixo de um valor de histerese (tipicamente 200–500 RPM abaixo do limite).
- **Corte de ignição (Spark Cut):** A ECU suprime a centelha em parte ou todos os cilindros. Gera um efeito sonoro característico (estouros no escapamento). É mais agressivo e pode aumentar a temperatura do escapamento, pois combustível não queimado chega ao catalisador ou ao coletor de escapamento.
- **Combinado:** A ECU aplica ambos os métodos simultaneamente para uma limitação mais eficaz.

Como configurar:

- **RPM Hard Limit (Limite Absoluto):** A rotação máxima que o motor jamais deve atingir. Configure com base nas especificações do fabricante do motor, levando em conta o trem de válvulas (molas, comandos, seguidores) e os componentes do trem alternativo (bielas, pistões). Valores típicos variam de 6500 RPM (motores de rua) a 10000+ RPM (motores de competição).

- **RPM Soft Limit (Limite Suave):** Uma rotação ligeiramente abaixo do hard limit, onde a ECU começa a intervir gradualmente (por exemplo, retirando avanço de ignição ou empobrecendo a mistura). Isso proporciona uma transição mais suave em vez de um corte abrupto.

Limitador de rotação desabilitado

Nunca opere o motor sem um limitador de rotação ativo. Sem esta proteção, o motor pode ultrapassar a rotação segura em uma questão de frações de segundo, especialmente em neutro ou com a embreagem pressionada, resultando em quebra de válvulas, bielas ou virabrequim.

3.6.2 Limite de MAP (Pressão no Coletor)

O limite de MAP define a pressão máxima permitida no coletor de admissão. Este parâmetro é especialmente importante em motores turbo ou supercharged, onde pressão excessiva (overboosting) pode causar danos graves.

Como funciona:

- Quando a pressão no coletor atinge o limite configurado, a ECU reduz o avanço de ignição e/ou corta a injeção de combustível.
- O limite deve ser configurado ligeiramente acima da pressão máxima de boost desejada, para permitir oscilações transitórias normais sem ativar a proteção.

Valores de referência:

- Motores aspirados: não requerem este limite (MAP nunca ultrapassa a pressão atmosférica).
- Motores turbo de rua: tipicamente 1,5 a 2,5 bar absolutos (0,5 a 1,5 bar de boost).
- Motores turbo de competição: pode chegar a 3,0–4,0 bar absolutos, dependendo do motor e da preparação.

3.6.3 Boost Cut (Corte de Sobre-Pressão)

O boost cut é uma proteção específica para motores sobrealimentados que age de forma mais agressiva que o limite de MAP. Quando a pressão de boost atinge um valor considerado perigoso (acima do limite de MAP), a ECU pode:

- Cortar completamente a injeção de combustível.
- Cortar a ignição.
- Abrir a válvula wastegate (se controlada eletronicamente).
- Reduzir drasticamente o avanço de ignição.

Configure o boost cut com uma margem de segurança acima do boost alvo máximo. Por exemplo, se o boost alvo máximo é 1,2 bar, configure o boost cut em 1,5 bar.

3.6.4 Fuel Cut (Corte de Combustível por Desaceleração)

O fuel cut por desaceleração (overrun fuel cut) é uma função que corta a injeção quando o motorista solta o acelerador em alta rotação (desaceleração com o motor em freio motor). Isso economiza combustível e reduz emissões.

Parâmetros configuráveis:

- **RPM de ativação:** A rotação acima da qual o fuel cut é habilitado (tipicamente 1500–2000 RPM).
- **RPM de desativação:** A rotação abaixo da qual a injeção é retomada (tipicamente 1200–1500 RPM), para evitar que o motor morra.
- **TPS máximo:** O fuel cut só ocorre se o TPS estiver abaixo de um valor mínimo (borboleta fechada ou quase fechada).
- **Delay:** Tempo de atraso antes de ativar o corte, para evitar ativações indesejadas em mudanças rápidas de aceleração.

3.6.5 Proteção de Baixa Pressão de Óleo

Esta é uma das proteções mais importantes para a integridade mecânica do motor. A pressão de óleo lubrificante deve ser suficiente para manter a película de lubrificação entre as superfícies metálicas em movimento (bronzinas, mancais, cames, balancins).

A pressão de óleo mínima aceitável varia com a rotação do motor. Em marcha lenta, uma pressão de 1,0 a 1,5 bar pode ser adequada, mas em alta rotação (com maiores cargas nos mancais e maior fluxo de óleo necessário), a pressão mínima aceitável sobe para 3,0 a 5,0 bar.

Curva mínima de pressão de óleo por RPM:

O MotroLink Manager permite configurar uma curva de pressão mínima de óleo em função da rotação. Se a pressão medida pelo sensor de pressão de óleo cair abaixo desta curva em qualquer ponto, a ECU toma ações de proteção:

1. **Alerta (Warning):** Acende a luz de check engine e/ou dispara um aviso no painel.
2. **Redução de potência:** A ECU reduz o avanço de ignição e/ou limita a rotação máxima (limp mode).
3. **Desligamento (Shutdown):** Em casos críticos, a ECU pode cortar completamente o motor para evitar danos irreversíveis.

Exemplo de curva mínima:

RPM	Pressão Mínima (bar)
800	0,8
2000	1,5
3000	2,5
4000	3,0
5000	3,5
6000	4,0
7000	4,5

! Sensor de pressão de óleo

Para utilizar esta proteção, é obrigatório ter um sensor de pressão de óleo analógico (não apenas o sensor de presença on/off original do veículo) conectado a uma entrada analógica da ECU e devidamente calibrado.

3.6.6 Proteção de Alta Pressão de Óleo

Embora menos comum, pressão de óleo excessivamente alta também pode indicar problemas:

- Válvula de alívio do sistema de lubrificação travada.
- Óleo com viscosidade inadequada (muito grosso) para a temperatura de operação.
- Obstrução parcial nas galerias de óleo.

Configure um limite máximo de pressão de óleo. Se ultrapassado, a ECU pode registrar um código de falha e emitir um alerta. Valores típicos de alarme de alta pressão estão na faixa de 7 a 10 bar, dependendo do motor e do tipo de bomba de óleo.

3.6.7 Proteção Lambda (Sonda de Oxigênio)

A proteção lambda monitora a leitura da sonda de oxigênio (lambda) para detectar condições de mistura perigosas:

- **Mistura excessivamente pobre (lean):** Lambda acima de 1,1 em carga plena é extremamente perigoso, pois aumenta dramaticamente a temperatura de combustão, podendo causar detonação, pré-ignição, queima de válvulas de escape e fusão de pistões. Se a ECU detectar uma leitura lambda acima do limite configurado em condições de carga, ela pode:
 - Enriquecer automaticamente a mistura (safety enrichment).
 - Reduzir o avanço de ignição.
 - Limitar a abertura da borboleta (se ETB).
 - Acionar o limitador de rotação em RPM reduzido.
- **Mistura excessivamente rica (rich):** Lambda abaixo de 0,70–0,75 em operação prolongada pode causar lavagem de cilindro (remoção da película de óleo), diluição do óleo do cárter, e acúmulo de carbono. A ECU pode registrar um alerta e, em casos extremos, cortar a injeção parcialmente.

Como configurar:

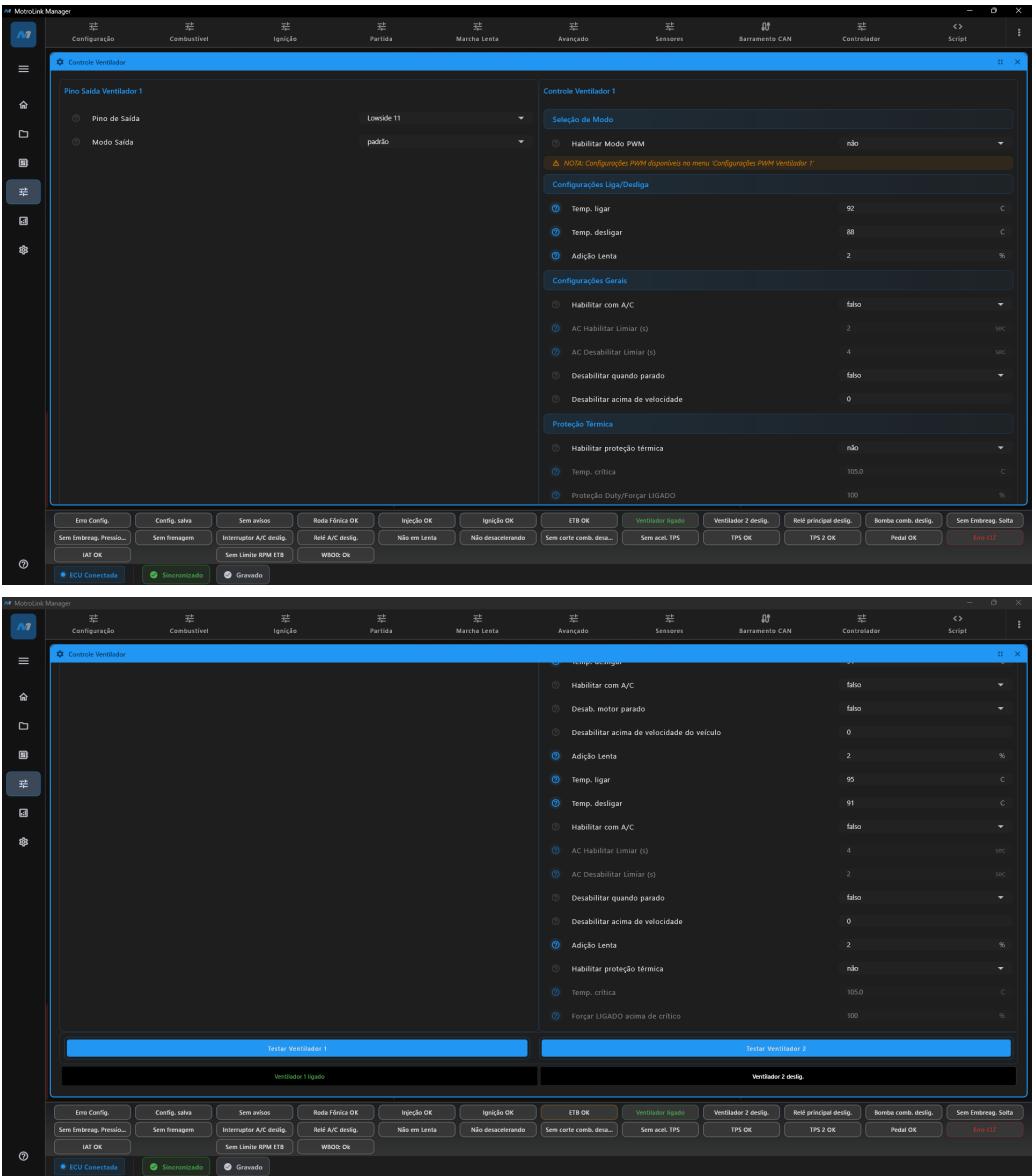
- Defina o limite lean (pobre) para carga alta: tipicamente lambda 1,05 a 1,10.
- Defina o limite rich (rico): tipicamente lambda 0,70 a 0,75.
- Configure a ação a ser tomada (enriquecimento, retardo de ignição, limp mode, shutdown).
- Configure o tempo de resposta (quanto tempo a condição deve persistir antes de ativar a proteção, para evitar falsos alarmes durante transientes rápidos).

Sonda wideband obrigatória

A proteção lambda funciona adequadamente apenas com sondas wideband (banda larga), que fornecem uma leitura precisa e contínua do lambda. Sondas narrowband (banda estreita) possuem resolução insuficiente para detecção confiável de condições perigosas.

3.7 Ventilador

O controle do ventilador de arrefecimento (ventoinha do radiador) é essencial para manter a temperatura do motor dentro da faixa ideal de operação. O MotroLink Manager oferece controle avançado por PWM, permitindo velocidade variável em vez de simples liga/desliga.



Telas de configuração do ventilador: controle PWM e parâmetros de operação.

3.7.1 Temperatura de Ativação e Desativação

As temperaturas de ativação e desativação definem a histerese do controle do ventilador:

- **Temperatura de ativação (Fan On):** A temperatura do líquido de arrefecimento na qual o ventilador começa a operar. Valores típicos estão entre 90 extdegreeC e 100 extdegreeC, dependendo do termostato do motor e do projeto do sistema de arrefecimento.
- **Temperatura de desativação (Fan Off):** A temperatura na qual o ventilador é desligado após ter sido ativado. Deve ser alguns graus abaixo da temperatura de ativação (tipicamente 3 extdegreeC a 7 extdegreeC abaixo), criando uma histerese que evita liga/desliga contínuo (cycling).

Exemplo: Se a ativação está em 95 extdegreeC e a desativação em 90 extdegreeC, o ventilador liga quando a temperatura sobe a 95 extdegreeC e só desliga quando a temperatura cai para 90 extdegreeC.

 Temperaturas muito altas

Não configure a temperatura de ativação acima de 105 extdegreeC. A maioria dos motores sofre degradação acelerada de componentes (juntas, retentores, mangueiras) e redução da eficiência da lubrificação quando a temperatura do líquido de arrefecimento ultrapassa 110 extdegreeC. Em motores turbo, o risco de detonação aumenta significativamente com temperaturas elevadas.

3.7.2 PWM Duty por Temperatura

O controle PWM permite que o ventilador opere em velocidades intermediárias, proporcionando um controle mais suave e silencioso da temperatura. A tabela de duty cycle por temperatura define a porcentagem de potência aplicada ao ventilador em função da temperatura do líquido de arrefecimento.

Exemplo de tabela:

Temperatura (extdegreeC)	Duty Cycle (%)
90	30
93	45
96	60
99	80
102	100

Com esta configuração, o ventilador opera suavemente em 30% quando a temperatura atinge 90 extdegreeC, aumentando progressivamente até 100% se a temperatura continuar subindo.

 Ventiladores compatíveis com PWM

O controle PWM requer ventiladores elétricos compatíveis (com motor de corrente contínua sem escovas, ou com módulo de controle PWM dedicado). Ventiladores com motor de escovas simples podem não responder bem a sinais PWM de baixa fre-

quência, produzindo ruído audível ou vibrações. Neste caso, configure a frequência PWM adequada (tipicamente 25 kHz para ventiladores automotivos PWM nativos, ou 100–200 Hz para ventiladores com relé de estado sólido).

3.7.3 Adder de IAC por Ventilador

Quando o ventilador é acionado, a carga elétrica adicional no alternador (e consequentemente no motor) pode causar uma queda na rotação de marcha lenta. O adder de IAC (Idle Air Control) compensa automaticamente esta queda, adicionando uma quantidade extra de ar na marcha lenta quando o ventilador está ativo.

Como configurar:

- Defina o valor de adder (tipicamente 2% a 10% de duty cycle adicional na válvula IAC, ou 20 a 50 RPM adicionais no alvo de marcha lenta, dependendo do tipo de controle de marcha lenta utilizado).
- Teste com o motor em marcha lenta: ligue e desligue o ventilador manualmente e observe se a rotação permanece estável. Ajuste o adder até que a queda de RPM seja imperceptível.

3.7.4 Duty Mínimo com Ar Condicionado (A/C)

Quando o compressor de ar condicionado está ativo, a temperatura do líquido de arrefecimento tende a subir mais rapidamente, especialmente em baixas velocidades ou com o veículo parado (trânsito). O MotroLink Manager permite configurar um duty cycle mínimo do ventilador quando o A/C está ligado.

Como configurar:

- Defina um duty mínimo (tipicamente 40% a 60%) que garanta fluxo de ar suficiente pelo radiador e pelo condensador do A/C, mesmo quando a temperatura do motor ainda está abaixo do ponto de ativação normal do ventilador.
- Esta função é essencial para manter a eficiência do ar condicionado e evitar superaquecimento do motor em condições de trânsito urbano.

3.8 Ar Condicionado

O gerenciamento do ar condicionado pela ECU permite integrar o funcionamento do compressor de A/C com as condições de operação do motor, evitando situações em que o A/C poderia prejudicar o desempenho ou a segurança.

3.8.1 Habilitação do A/C

Ative ou desative o gerenciamento de ar condicionado pela ECU. Quando habilitado, a ECU assume o controle da embreagem do compressor de A/C por meio de uma saída dedicada, e aplica as lógicas de proteção descritas a seguir.

3.8.2 Sensor de Pressão do A/C

O sensor de pressão do sistema de ar condicionado é conectado a uma entrada analógica da ECU. Ele permite monitorar a pressão do refrigerante (R134a, R1234yf, etc.) no circuito de A/C.

Funções do sensor de pressão:

- **Proteção de baixa pressão:** Se a pressão do refrigerante está muito baixa, indica vazamento ou carga insuficiente. Nesta condição, a ECU desliga o compressor para evitar danos por falta de lubrificação (o óleo circula com o refrigerante).
- **Proteção de alta pressão:** Se a pressão está muito alta, indica problema no condensador, ventilador inoperante, ou excesso de carga de refrigerante. A ECU desliga o compressor para evitar falha mecânica ou ruptura de mangueiras.
- **Controle do ventilador do condensador:** A ECU pode aumentar a velocidade do ventilador com base na pressão do refrigerante, melhorando a eficiência da condensação.

3.8.3 Corte de A/C por RPM e TPS

A ECU pode desligar temporariamente o compressor de A/C em duas situações:

- **Corte por RPM baixo:** Se o motor está em marcha lenta muito baixa ou prestes a morrer, desligar o compressor alivia a carga mecânica e ajuda a estabilizar a marcha lenta. Configure um RPM mínimo abaixo do qual o A/C é desligado (tipicamente 500–600 RPM).
- **Corte por TPS alto (WOT — Wide Open Throttle):** Quando o motorista solicita aceleração plena (borboleta totalmente aberta), a ECU desliga o compressor para disponibilizar toda a potência do motor para tração. O compressor é religado quando o TPS volta abaixo de um limite (tipicamente 90–95% de TPS). Este corte é temporário e imperceptível para os passageiros.

Conforto e desempenho

O corte de A/C por WOT é uma função padrão em praticamente todos os veículos modernos. Ele garante máxima potência em ultrapassagens e arrancadas, sem comprometer o conforto térmico na cabine, pois o compressor fica desligado apenas por poucos segundos.

3.8.4 Adder de RPM na Marcha Lenta com A/C

Quando o compressor de A/C está ativo, ele impõe uma carga mecânica significativa ao motor (tipicamente 3 a 7 HP). Para compensar esta carga e evitar que a marcha lenta caia ou fique instável, a ECU aumenta o alvo de RPM de marcha lenta quando o A/C está ligado.

Como configurar:

- Defina o valor de adder de RPM (tipicamente 50 a 200 RPM adicionais ao alvo normal de marcha lenta).

- Teste com o motor em marcha lenta estabilizada: ligue o A/C e observe se a rotação se mantém estável. Se houver queda perceptível antes da compensação atuar, aumente o adder.
- O adder atua em conjunto com o adder de IAC por ventilador. Certifique-se de que a soma dos dois adders não cause uma marcha lenta excessivamente alta.

3.9 Entrada da Chave de Ignição

A entrada da chave de ignição é o sinal que informa à ECU que o condutor ligou a chave (ou pressionou o botão de partida) do veículo. Este sinal é fundamental para o gerenciamento de energia e inicialização do sistema.

3.9.1 Pino de Entrada

Configure qual pino de entrada digital da ECU está conectado ao fio da chave de ignição (tipicamente o fio “IGN” ou “ACC” do comutador de ignição). Este pino recebe:

- **Nível alto (12V):** Quando a chave está na posição “Ignição” (ON) ou “Partida” (START).
- **Nível baixo (0V):** Quando a chave está desligada (OFF).

3.9.2 Lógica de Ativação

A lógica de ativação define como a ECU interpreta o sinal da chave:

- **Ativo Alto (Active High):** A ECU considera que a ignição está ligada quando o pino recebe tensão (12V). Esta é a configuração mais comum e padrão na maioria dos veículos.
- **Ativo Baixo (Active Low):** A ECU considera que a ignição está ligada quando o pino está em nível baixo (0V ou terra). Esta lógica invertida pode ser necessária em alguns veículos com sistemas elétricos não convencionais ou quando o sinal passa por um relé com lógica invertida.

Comportamento da ECU em função do sinal da chave:

1. **Chave ligada (ON):** A ECU inicializa todos os subsistemas, ativa o relé principal, realiza o priming da bomba de combustível e entra em modo de espera (aguardando sinal de partida ou RPM).
2. **Motor funcionando (RUN):** A ECU gerencia normalmente todos os atuadores e sensores.
3. **Chave desligada (OFF):** A ECU inicia a sequência de desligamento: salva dados de adaptação (aprendizado), desativa as saídas de potência, e permanece energizada por um breve período (tipicamente 3 a 10 segundos) para completar tarefas internas antes de desenergizar o relé principal (auto-shutdown).

i Veículos com botão start/stop

Em veículos com sistema de partida por botão (keyless/push-button start), o sinal de chave pode ser proveniente do módulo de corpo (BCM — Body Control Module) em vez de um comutador mecânico. Verifique o diagrama elétrico do veículo para identificar o fio correto.

4 Sensores

A ECU (Unidade de Comando Eletrônico) não possui percepção direta do motor — ela “enxerga” o mundo exclusivamente por meio de sensores. Cada grandeza física relevante (temperatura, pressão, posição, velocidade, composição dos gases) é convertida em um sinal elétrico que a ECU interpreta e utiliza para tomar decisões de controle. Consequentemente, **uma calibração de sensores incorreta invalida absolutamente tudo**: tabelas de combustível, avanço de ignição, limites de segurança, controle de marcha lenta e todas as estratégias dependentes de dados de entrada.

Tipos de Sensores Utilizados em Motores

Os sensores empregados em sistemas de injeção e ignição eletrônica podem ser classificados em algumas categorias fundamentais:

- **Termistores (NTC — Negative Temperature Coefficient):** São resistores cuja resistência diminui de forma não linear com o aumento da temperatura. São utilizados para medir temperatura do líquido de arrefecimento (CLT), temperatura do ar admitido (IAT), temperatura de óleo, entre outros. A curva resistência vs. temperatura segue aproximadamente a equação de Steinhart–Hart.
- **Sensores de pressão (piezoresistivos):** Utilizam um diafragma de silício cuja resistência elétrica varia proporcionalmente à pressão aplicada. Empregados em sensores MAP (pressão do coletor de admissão), pressão barométrica, pressão de óleo e pressão de combustível. Normalmente fornecem uma saída de tensão linear em relação à pressão.
- **Sensores de posição:**
 - **Potenciométricos:** Um cursor desliza sobre uma trilha resistiva, gerando uma tensão proporcional à posição angular ou linear. Usados em TPS (posição da borboleta) e pedal do acelerador. Sujeitos a desgaste mecânico.
 - **Efeito Hall:** Detectam variações de campo magnético sem contato mecânico. Usados em sensores de posição do virabrequim, comando de válvulas e, em versões mais modernas, em TPS e pedal sem contato.
 - **Indutivos (relutância variável):** Geram um sinal de tensão alternada cuja frequência é proporcional à velocidade de rotação. Comuns em sensores de rotação (dente de manivela) e velocidade.
- **Sensores de oxigênio (lambda):**
 - **Narrowband (banda estreita):** Baseados em uma célula de zircônia que gera uma tensão eletroquímica (princípio de Nernst). Produzem uma transição abrupta de tensão em torno de $\lambda = 1,0$. Úteis apenas para indicar rico/pobre, não para medir a mistura com precisão.
 - **Wideband (banda larga):** Utilizam uma célula de bombeamento de oxigênio adicional que permite medir com precisão toda a faixa de λ (tipicamente 0,65 a 1,60 ou além). Exigem um controlador dedicado (como o MotroLink WideLink) que fornece o valor de λ via sinal analógico ou barramento CAN.

- **Sensores de frequência:** Sensores como o Flex Fuel geram um sinal de onda quadrada cuja frequência é proporcional ao percentual de etanol no combustível.

O Circuito de Pull-up e o Divisor de Tensão

A maioria dos sensores resistivos (termistores, por exemplo) não gera tensão por conta própria. A ECU fornece uma tensão de referência (tipicamente 5 V) através de um resistor de *pull-up* interno. O sensor e o resistor de pull-up formam um **divisor de tensão**:

$$V_{\text{saída}} = V_{\text{ref}} \times \frac{R_{\text{sensor}}}{R_{\text{pull-up}} + R_{\text{sensor}}}$$

Quando a resistência do sensor é alta (temperatura baixa em um NTC), a tensão lida pela ECU é alta. Quando a resistência diminui (temperatura alta), a tensão cai. A ECU converte essa tensão em um valor digital por meio de um conversor analógico-digital (ADC) e, a partir da curva de calibração armazenada, determina a grandeza física correspondente.

Resistor de Pull-up

O valor do resistor de pull-up é fixo dentro da ECU (tipicamente entre 2,49 kΩ e 4,7 kΩ, dependendo da entrada). Ao configurar um sensor no MotroLink Manager, é essencial selecionar corretamente o valor do pull-up correspondente à entrada utilizada, pois isso afeta diretamente a conversão tensão → grandeza física.

Redundância de Sensores e Segurança

Em aplicações modernas, especialmente em sistemas *drive-by-wire* (acelerador eletrônico), sensores críticos como o TPS e o pedal do acelerador utilizam **dois sensores redundantes**. O segundo sensor pode ter uma curva espelhada (por exemplo, se o primeiro vai de 0,5 V a 4,5 V, o segundo vai de 4,5 V a 0,5 V) ou uma faixa de tensão diferente (metade da excursão do primeiro).

A ECU compara constantemente os dois sinais. Se a diferença entre eles exceder um limite programado, a ECU detecta uma falha e pode:

- Limitar a abertura da borboleta a um valor seguro (modo manco / *limp mode*).
- Desligar o motor em casos extremos.
- Acionar um código de falha (DTC) para diagnóstico.

Essa redundância é obrigatória em sistemas com borboleta eletrônica e é uma prática recomendada mesmo em sistemas com cabo de acelerador.

Segurança em Drive-by-Wire

Nunca desabilite a verificação de redundância do TPS ou do pedal do acelerador em veículos com borboleta eletrônica. A ausência de redundância pode resultar em aceleração descontrolada em caso de falha de sensor, com risco grave de acidente.

4.1 CLT — Sensor de Temperatura do Líquido de Arrefecimento

O sensor CLT (*Coolant Temperature Sensor*) mede a temperatura do líquido de arrefecimento do motor. Essa informação é fundamental para praticamente todas as estratégias da ECU: enriquecimento de partida a frio, avanço de ignição em aquecimento, controle de marcha lenta, ativação de ventoinha, proteção contra superaquecimento, entre outras.

4.1.1 Princípio de Funcionamento — Termistor NTC

O CLT é um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Fisicamente, trata-se de um elemento semicondutor cujas propriedades elétricas mudam com a temperatura. À medida que a temperatura aumenta, mais portadores de carga são liberados na estrutura cristalina do semicondutor, reduzindo a resistência elétrica.

A relação entre resistência e temperatura em um NTC segue a equação de Steinhart–Hart:

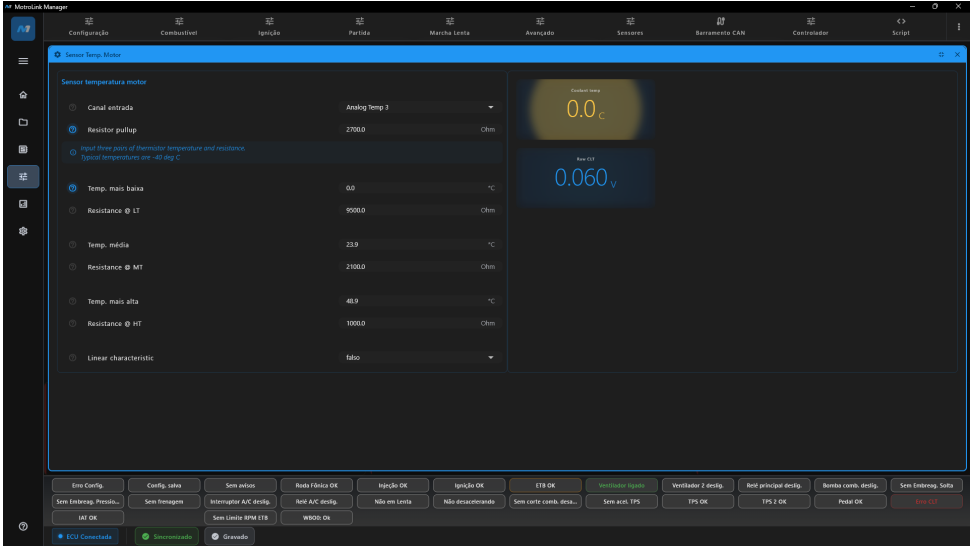
$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot [\ln(R)]^3$$

onde T é a temperatura em Kelvin, R é a resistência em ohms, e A , B , C são coeficientes específicos do sensor. Na prática, a curva é tipicamente definida por uma tabela de pares (resistência, temperatura) no software da ECU.

4.1.2 Configuração no MotroLink Manager

Para configurar o sensor CLT no MotroLink Manager :

1. **Tipo de sensor:** Selecione o tipo de termistor correspondente ao sensor instalado. O MotroLink Manager oferece diversos presets para sensores comuns de mercado (GM, Bosch, AEM, etc.) além da opção de tabela customizada.
2. **Resistor de pull-up (bias resistor):** Selecione o valor do resistor de pull-up correspondente à entrada analógica utilizada. A evoTech possui entradas com pull-ups de diferentes valores; certifique-se de que o valor configurado no software corresponde ao hardware.
3. **Tensão de bias (bias voltage):** A tensão de referência fornecida pela ECU ao divisor de tensão. Normalmente 5,0 V. Ajuste este valor se a tensão de referência real for ligeiramente diferente (verificável com multímetro na entrada do sensor com o conector desconectado).
4. **Curva de resistência vs. temperatura:** Se o sensor não corresponde a nenhum preset, insira manualmente os pares (resistência, temperatura). Recomenda-se ao menos 5 a 7 pontos distribuídos na faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os dados podem ser obtidos no datasheet do fabricante do sensor ou medidos com multímetro e termômetro de referência.



Tela de configuração do sensor CLT — curva de resistência do termistor.

4.1.3 Verificação em Tempo Real

Após a configuração, é essencial verificar se a leitura da ECU corresponde à realidade:

- **Motor frio:** Com o motor parado e frio (não operou nas últimas horas), a leitura do CLT deve corresponder à temperatura ambiente. Compare com um termômetro independente.
- **Motor em aquecimento:** Acompanhe a subida gradual da temperatura. A leitura deve ser suave, sem saltos ou oscilações.
- **Motor em temperatura de operação:** A maioria dos motores opera entre 80 *extdegreeC* e 100 *extdegreeC*. Verifique se a leitura é compatível com o termostato do motor.
- **Teste de resistência:** Desconecte o sensor e meça a resistência com multímetro. Compare com a tabela configurada.

⚠ Leitura Incorreta do CLT

Se a leitura do CLT estiver incorreta, as consequências são severas: o motor pode receber excesso ou falta de combustível na partida, a marcha lenta pode ficar instável, as proteções contra superaquecimento podem não funcionar, e toda a estratégia de enriquecimento por temperatura será comprometida.

💡 Dica Prática

Se ao ligar a ignição com o motor frio a leitura do CLT mostrar um valor muito diferente da temperatura ambiente (por exemplo, -40 *extdegreeC* ou +150 *extdegreeC*), verifique: (1) conexão elétrica do sensor, (2) tipo de sensor selecionado no software, (3) valor do pull-up configurado, (4) integridade da fiação.

4.2 IAT — Sensor de Temperatura do Ar Admitido

O sensor IAT (*Intake Air Temperature*) mede a temperatura do ar que está sendo admitido pelo motor. Essa informação é utilizada para correção de densidade do ar (a densidade diminui com o aumento da temperatura), ajuste de avanço de ignição (ar mais quente aumenta a tendência à detonação) e diversas estratégias de proteção.

4.2.1 Princípio de Funcionamento

O IAT utiliza exatamente o mesmo princípio do CLT: um termistor NTC em um circuito de divisor de tensão com resistor de pull-up. A diferença está na faixa de operação e no posicionamento:

- **Faixa de medição:** O IAT opera tipicamente de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (partidas em clima frio extremo) a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou mais (ar após compressor turbo sem intercooler).
- **Tempo de resposta:** Como o sensor está exposto ao fluxo de ar, seu tempo de resposta é importante. Sensores com massa térmica muito grande (corpo metálico grosso) podem atrasar a leitura.

4.2.2 Configuração no MotroLink Manager

A configuração segue a mesma estrutura do CLT:

1. Selecione o tipo de termistor (preset ou tabela customizada).
2. Configure o resistor de pull-up correspondente à entrada utilizada.
3. Ajuste a tensão de bias se necessário.
4. Insira ou verifique a curva de resistência vs. temperatura.

4.2.3 Posicionamento Recomendado

O posicionamento do sensor IAT influencia diretamente a qualidade da leitura:

- **Ideal:** Na tubulação de admissão, após o filtro de ar e após o intercooler (se houver), em uma região com bom fluxo de ar. O sensor deve estar exposto ao fluxo, não em um “bolsão” de ar estagnado.
- **Evitar:** Próximo a fontes de calor (coletor de escapamento, bloco do motor), em regiões com turbulência excessiva ou acúmulo de condensação.
- **Motores turbo:** Posicione o sensor **após o intercooler** para medir a temperatura real do ar que entra no motor. Se posicionado antes do intercooler, a leitura será muito maior que a temperatura efetiva, resultando em correções excessivas.
- **Sensor integrado ao MAF:** Alguns sensores MAF possuem o IAT integrado. Nesse caso, o posicionamento é fixo na caixa do filtro de ar. Essa posição pode não representar bem a temperatura real no coletor, especialmente em motores turbo.

IAT em Motores Turbo

Em motores turboalimentados, a temperatura do ar após o compressor pode variar de 40 *extdegreeC* a mais de 100 *extdegreeC* dependendo da pressão de boost e da eficiência do intercooler. A correção de densidade baseada no IAT é fundamental para manter a relação ar/combustível correta sob todas as condições de boost.

Sensor IAT Ausente

Se nenhum sensor IAT estiver conectado, a ECU não poderá corrigir a massa de ar por temperatura. Isso pode resultar em mistura pobre em dias quentes (ar menos denso, mesma quantidade de combustível) e mistura rica em dias frios. Em motores turbo, o erro pode ser significativo.

4.2.4 Verificação em Tempo Real

- Com o motor frio e parado, a leitura do IAT deve ser próxima à temperatura ambiente e à leitura do CLT.
- Com o motor em funcionamento, o IAT deve mostrar a temperatura do ar no ponto de instalação. Em aspirados, tipicamente alguns graus acima da ambiente. Em turbo, pode subir significativamente sob boost.
- Oscilações bruscas indicam mau contato elétrico ou sensor danificado.

4.3 MAP — Sensor de Pressão do Coletor de Admissão

O sensor MAP (*Manifold Absolute Pressure*) é um dos sensores mais importantes do sistema, especialmente em motores que utilizam a estratégia *Speed Density* para cálculo da massa de ar. Ele mede a pressão absoluta no coletor de admissão, permitindo à ECU estimar a quantidade de ar que entra nos cilindros.

4.3.1 Princípio de Funcionamento — Sensor Piezoresistivo

O sensor MAP utiliza um elemento piezoresistivo: um diafragma de silício com strain gauges integrados. Quando a pressão atua sobre o diafragma, ele se deforma, alterando a resistência dos strain gauges. Essa variação de resistência é convertida em um sinal de tensão por um circuito de condicionamento integrado ao sensor.

A saída é tipicamente linear:

$$V_{\text{saída}} = V_{\text{offset}} + \left(\frac{V_{\text{max}} - V_{\text{offset}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \right) \times (P - P_{\text{min}})$$

onde P é a pressão absoluta. Sensores comuns têm faixas de 0–1 bar (aspirados), 0–2,5 bar, 0–4 bar ou 0–7 bar (turbo de alta pressão).

4.3.2 Configuração no MotroLink Manager

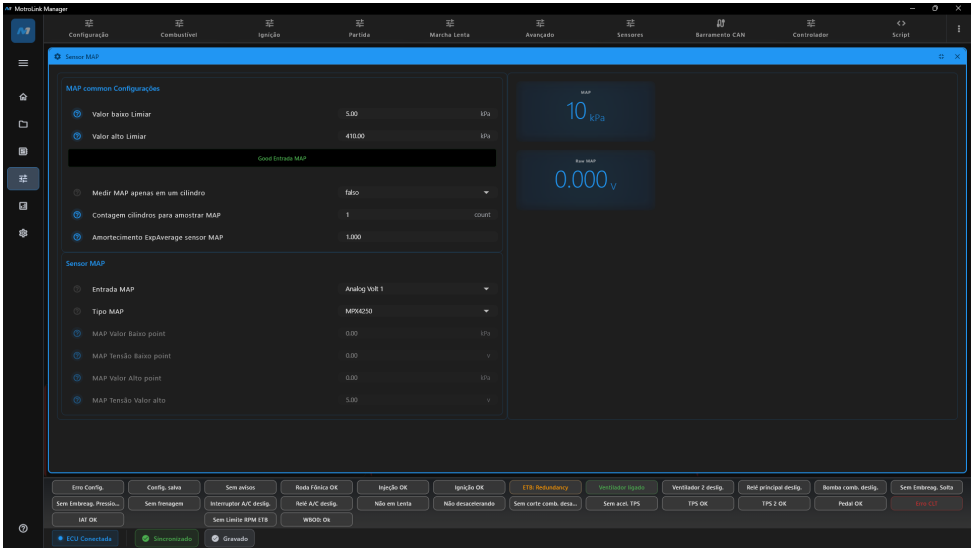
1. **Tipo de sensor:** Selecione o modelo do sensor MAP instalado. O MotroLink Manager inclui presets para sensores comuns (GM 1-bar, GM 2-bar, GM 3-bar, Bosch 2,5-bar, AEM 3,5-bar, etc.). Para sensores não listados, utilize a opção de configuração customizada (tensão mínima, tensão máxima, pressão mínima, pressão máxima).
2. **Frequência de amostragem:** A velocidade com que a ECU lê o sensor MAP. Frequências mais altas capturam variações rápidas de pressão (pulsações de admissão), mas podem introduzir ruído. A frequência padrão é adequada para a maioria das aplicações.
3. **Ângulo de amostragem (sample point):** Em motores de ciclo Otto, a pressão no coletor de admissão oscila significativamente durante cada ciclo. O ângulo de amostragem define **em que posição angular do virabrequim** a ECU realiza a leitura do MAP.

O ideal é amostrar o MAP em um momento em que a pressão esteja estável e representativa da carga real. Tipicamente, isso ocorre durante o período em que as válvulas de admissão estão fechadas. O ângulo ótimo pode variar com a RPM e o número de cilindros:

- Em **baixas RPM**, o período de válvulas fechadas é mais longo e menos crítico.
- Em **altas RPM**, o período é curto e o ângulo deve ser preciso para evitar amostrar durante a pulsação.

O MotroLink Manager permite definir uma **curva de ângulo de amostragem por RPM**, possibilitando ajuste fino para cada faixa de rotação.

4. **Janela de amostragem:** Define a duração angular (em graus do virabrequim) durante a qual as amostras são coletadas e promediadas. Uma janela mais larga suaviza pulsações, mas pode mascarar variações reais. Uma janela estreita é mais responsiva, mas mais suscetível a ruído.



Tela de configuração do sensor MAP — tipo de sensor e parâmetros de amostragem.

4.3.3 MAP vs. MAF — Speed Density vs. Mass Airflow

Existem duas estratégias principais para estimar a massa de ar admitida:

- **Speed Density (MAP):** Utiliza a pressão do coletor (MAP), a temperatura do ar (IAT) e a RPM para calcular a massa de ar via a equação dos gases ideais. Requer uma tabela de eficiência volumétrica (VE) calibrada. É a estratégia mais comum em ECUs de preparação e permite ampla faixa de modificações no motor.
- **Mass Airflow (MAF):** Mede diretamente o fluxo de massa de ar por meio de um sensor de fio quente ou filme quente. Não requer tabela VE, mas é sensível a modificações na admissão (filtro de ar diferente, tubulação modificada, turbo) que alterem o perfil de fluxo no ponto de instalação do MAF.

Recomendação

Para a maioria das aplicações de preparação, a estratégia *Speed Density* com sensor MAP é recomendada por sua flexibilidade e tolerância a modificações na admissão. O MAF pode ser utilizado como complemento ou em aplicações que requeiram alta precisão em carga parcial (economia de combustível).

4.3.4 Verificação em Tempo Real

- **Motor desligado (ignição ligada):** A leitura MAP deve corresponder à pressão atmosférica local. Ao nível do mar, aproximadamente 101 kPa (1,01 bar). Em altitudes elevadas, proporcionalmente menor (por exemplo, ≈91 kPa a 1000 m de altitude).

- **Motor em marcha lenta:** Em motores aspirados, tipicamente entre 25 kPa e 45 kPa dependendo do motor.
- **Aceleração plena (WOT):** Em aspirados, deve se aproximar da pressão atmosférica. Em turbo, deve indicar a pressão de boost configurada.
- **Verificação de sanidade:** Se a leitura em repouso não corresponder à pressão barométrica, verifique a mangueira de vácuo (obstruções, furos, desconexões), o tipo de sensor selecionado e a integridade elétrica.



Mangueira de Vácuo

Uma causa extremamente comum de problemas de calibração é a mangueira de vácuo do MAP: furada, mal encaixada, dobrada ou obstruída. Sempre verifique fisicamente a mangueira antes de alterar a configuração do sensor no software.

4.4 Sensor Barométrico

O sensor barométrico mede a pressão atmosférica absoluta. Essa informação é utilizada para compensar automaticamente os efeitos da altitude sobre a densidade do ar. Sem correção barométrica, um motor calibrado ao nível do mar apresentará mistura excessivamente rica em altitudes elevadas (onde a pressão — e portanto a densidade do ar — é menor).

4.4.1 Tipos de Configuração

O MotroLink Manager oferece três abordagens para a medição barométrica:

1. **Sensor barométrico dedicado:** Um sensor de pressão separado, exposto à pressão atmosférica (não conectado ao coletor). Oferece medição contínua e independente. É a abordagem mais precisa.
2. **Sensor barométrico interno:** Algumas versões da ECU evoTech possuem um sensor barométrico integrado na placa. Não requer fiação externa. A leitura pode ser ligeiramente influenciada pela temperatura interna da ECU.
3. **MAP na partida (inferred barometric):** Antes do motor ser acionado (com a ignição ligada), o coletor de admissão está à pressão atmosférica. A ECU pode utilizar a leitura do MAP nesse momento como referência barométrica. Limitação: a referência não é atualizada durante a operação, então mudanças de altitude durante a condução não são compensadas em tempo real.

4.4.2 Correção Barométrica

A correção barométrica atua como um multiplicador sobre a estimativa de massa de ar. O princípio é simples: a massa de ar admitida é proporcional à pressão (para uma dada temperatura e eficiência volumétrica). Portanto:

$$\text{Fator de Correção} = \frac{P_{\text{baro atual}}}{P_{\text{baro referência}}}$$

onde $P_{\text{baro referência}}$ é a pressão na qual o motor foi calibrado (tipicamente ao nível do mar, 101,3 kPa).

Altitude e Desempenho

A cada 1000 m de altitude, a pressão atmosférica diminui aproximadamente 12%. Isso significa que um motor aspirado perde cerca de 12% de potência a cada 1000 m. A correção barométrica não recupera essa potência — ela garante que a mistura ar/combustível permaneça na relação correta, evitando mistura rica e desperdício de combustível.

4.4.3 Configuração no MotroLink Manager

- Selecione o tipo de fonte barométrica (dedicado, interno ou MAP na partida).
- Se usar sensor dedicado, configure o tipo de sensor (mesmos presets do MAP) e a entrada analógica utilizada.

- Verifique a leitura com o motor desligado — deve corresponder à pressão atmosférica local.



Calibração em Altitude

Se o motor for calibrado em uma cidade de altitude elevada (por exemplo, São Paulo ≈ 760 m, Belo Horizonte ≈ 850 m, Bogotá ≈ 2600 m), considere que a pressão barométrica local será significativamente inferior a 101,3 kPa. Certifique-se de que a correção barométrica esteja habilitada para que a calibração funcione corretamente em outras altitudes.

4.5 TPS — Sensor de Posição da Borboleta

O sensor TPS (*Throttle Position Sensor*) mede a posição angular da borboleta de aceleração. Essa informação é fundamental para determinar a intenção do motorista, calcular a carga do motor, implementar estratégias de aceleração/desaceleração, e em sistemas *drive-by-wire*, garantir que a borboleta eletrônica esteja respondendo corretamente ao comando.

4.5.1 Princípio de Funcionamento

O TPS pode ser de dois tipos principais:

- **Potenciométrico:** Um cursor acoplado ao eixo da borboleta desliza sobre uma trilha resistiva. A tensão de saída é proporcional ao ângulo de abertura. Vantagem: simplicidade e baixo custo. Desvantagem: desgaste mecânico com o tempo, podendo causar “pontos mortos” ou ruído no sinal.
- **Efeito Hall (sem contato):** Um ímã acoplado ao eixo gera um campo magnético detectado por um sensor Hall. A tensão de saída varia com o ângulo. Vantagem: sem desgaste mecânico, maior durabilidade e repetibilidade. Usado em borboletas eletrônicas modernas.

4.5.2 TPS Primário e Redundante

A evoTech suporta dois canais de TPS:

- **TPS Primário (TPS 1):** É o canal principal utilizado pela ECU para todas as decisões baseadas em posição de borboleta. Tipicamente, a tensão aumenta de um valor baixo (borboleta fechada, $\approx 0,5\text{ V}$) até um valor alto (borboleta totalmente aberta, $\approx 4,5\text{ V}$).
- **TPS Redundante (TPS 2):** É o canal de segurança. Pode apresentar uma das seguintes configurações:
 - **Sinal invertido:** Quando TPS 1 está em $0,5\text{ V}$, TPS 2 está em $4,5\text{ V}$, e vice-versa. A soma dos dois sinais é aproximadamente constante.
 - **Sinal de metade da amplitude:** TPS 2 varia entre $0,25\text{ V}$ e $2,25\text{ V}$ enquanto TPS 1 varia entre $0,5\text{ V}$ e $4,5\text{ V}$.

A ECU compara continuamente os dois sinais. Se a diferença entre a posição indicada por TPS 1 e a posição indicada por TPS 2 exceder o limite configurado, um erro de redundância é ativado.

4.5.3 Calibração do TPS

A calibração do TPS define os pontos de 0% (fechado) e 100% (totalmente aberto):

1. Calibração do ponto mínimo (0%):

- Com o motor desligado e a borboleta em repouso (totalmente fechada).
- No MotroLink Manager, observe a tensão bruta do TPS 1 e do TPS 2.

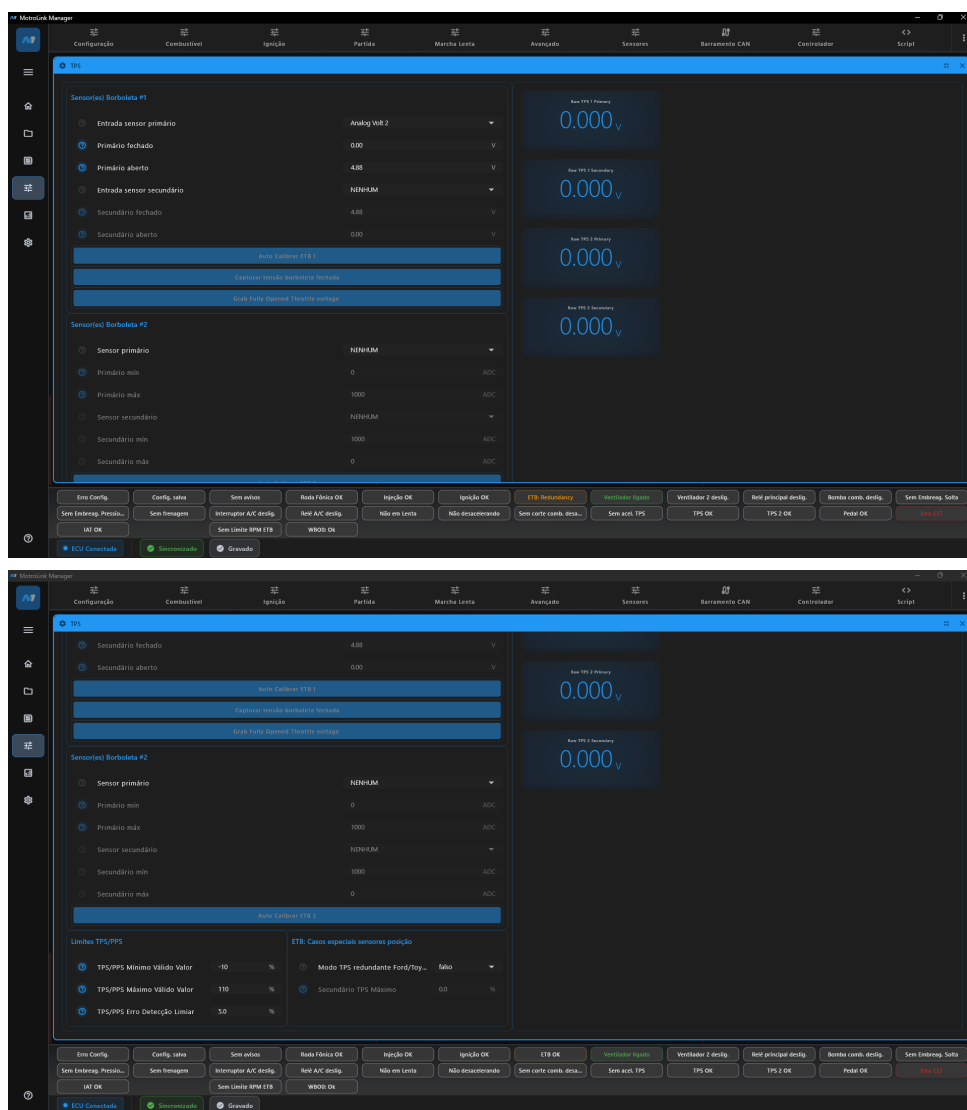
- Registre ou utilize a função de auto-calibração para definir o ponto mínimo.

2. Calibração do ponto máximo (100%):

- Com a borboleta totalmente aberta (pressione o acelerador a fundo em borboleta a cabo, ou comande abertura total em borboleta eletrônica via função de teste).
- Registre a tensão bruta e defina o ponto máximo.

3. Verificação de linearidade:

- Mova a borboleta lentamente de fechada para aberta e observe se a leitura de porcentagem sobe suavemente de 0% a 100%, sem saltos ou regiões mortas.
- Verifique que TPS 2 acompanha de forma coerente (invertido ou proporcional, conforme o tipo).



Configuração do TPS: (topo) sensor primário e calibração min/max; (base) sensor secundário e limites de verificação.

4.5.4 Verificação e Diagnóstico

- **Faixa de tensão:** A tensão mínima e máxima devem estar dentro de faixas razoáveis (tipicamente 0,3 V a 4,7 V). Tensões muito próximas de 0 V ou 5 V podem indicar curto-circuito para massa ou para alimentação.
- **Ruído no sinal:** Se a leitura de TPS oscila em repouso (por exemplo, alterna entre 0,0% e 1,5%), pode haver desgaste no potenciômetro, mau contato ou interferência eletromagnética. Verifique a blindagem da fiação e a qualidade do aterramento.
- **Erro de redundância:** Se o erro de redundância é ativado, verifique se os pontos de calibração de TPS 2 estão corretos, se o sensor não está danificado, e se a fiação está íntegra.

! Calibração Obrigatória

Sempre recalibre o TPS após: trocar a borboleta, trocar o sensor, alterar a fiação, ou atualizar o firmware da ECU. Uma calibração incorreta do TPS afeta diretamente a tabela de combustível, o controle de marcha lenta e todas as estratégias baseadas em carga.

4.6 Pedal do Acelerador

Em sistemas *drive-by-wire*, o pedal do acelerador não está conectado mecanicamente à borboleta. Em vez disso, o pedal contém sensores de posição que informam à ECU a intenção do motorista. A ECU então controla a borboleta eletrônica para atingir a abertura desejada, podendo aplicar filtros, limitações e mapeamentos entre a posição do pedal e a abertura da borboleta.

4.6.1 Sensores Primário e Redundante

Assim como o TPS, o pedal do acelerador utiliza obrigatoriamente dois sensores:

- **Pedal Primário (PPS 1 — Pedal Position Sensor 1):** Gera uma tensão proporcional à posição do pedal. Faixa típica: 0,5 V (pedal solto) a 4,5 V (pedal pressionado a fundo).
- **Pedal Redundante (PPS 2):** Gera um sinal complementar ao primário. Pode ser invertido ou com amplitude reduzida (metade). Faixa típica: 0,25 V a 2,25 V (amplitude de metade).

4.6.2 Calibração do Pedal

O procedimento de calibração é análogo ao do TPS:

1. **Ponto mínimo (0%):** Pedal completamente solto. Registre as tensões de PPS 1 e PPS 2.
2. **Ponto máximo (100%):** Pedal pressionado a fundo (até o batente mecânico). Registre as tensões.
3. **Verificação:** Mova o pedal lentamente e verifique que a porcentagem sobe suavemente de 0% a 100% sem saltos.

Redundância do Pedal

A verificação de redundância do pedal é uma função de segurança crítica. Se desabilitada ou mal calibrada, uma falha no sensor do pedal pode resultar em aceleração involuntária e descontrolada do veículo, com risco extremo de acidente. Nunca desabilite a redundância do pedal em veículos com borboleta eletrônica.

4.6.3 Relação Pedal–Borboleta

O MotroLink Manager permite configurar a relação entre a posição do pedal e a abertura da borboleta por meio de uma curva ou tabela:

- **Linear (1:1):** 50% de pedal = 50% de borboleta. Resposta direta e previsível.
- **Progressiva:** A abertura da borboleta é menor no início do curso do pedal e aumenta progressivamente. Proporciona controle mais fino em baixa carga e resposta mais suave. Comum em veículos de rua para conforto.

- **Agressiva:** A borboleta abre mais rapidamente no início do curso. Dá sensação de resposta imediata, mas pode dificultar o controle fino. Usada em aplicações esportivas.
- **Tabela 2D ou 3D:** Permite mapear a relação pedal–borboleta em função de outras variáveis (RPM, marcha, modo de condução).

Conforto vs. Desempenho

A relação pedal–borboleta é uma das calibrações que mais afetam a percepção do motorista sobre a “resposta” do motor. Uma curva bem calibrada faz o motor parecer mais potente e controlável, sem alterar a potência real. Experimente diferentes curvas no MotroLink Manager para encontrar o equilíbrio ideal entre resposta e controlabilidade.

4.7 MAF — Sensor de Fluxo de Massa de Ar

O sensor MAF (*Mass Airflow Sensor*) mede diretamente o fluxo de massa de ar que entra no motor. Ao contrário da estratégia *Speed Density* (que estima a massa de ar a partir de pressão e temperatura), o MAF fornece uma medição direta, o que pode ser mais preciso em determinadas condições.

4.7.1 Princípio de Funcionamento

O tipo mais comum de MAF é o sensor de **fio quente** (*hot wire*) ou **filme quente** (*hot film*):

- Um elemento resistivo (fio ou filme) é aquecido eletricamente a uma temperatura constante acima da temperatura do ar.
- O fluxo de ar passando pelo elemento remove calor por convecção.
- O circuito de controle aumenta a corrente para manter a temperatura constante.
- A corrente necessária para manter a temperatura é proporcional à massa de ar que passa pelo sensor.
- Essa corrente é convertida em uma tensão de saída que a ECU lê.

A relação entre tensão de saída e fluxo de massa de ar é **não linear** e específica para cada modelo de sensor.

4.7.2 Configuração no MotroLink Manager

1. **Configuração do pino:** Selecione a entrada analógica à qual o MAF está conectado. O MAF requer uma entrada sem pull-up (ou com pull-up desabilitado), pois gera seu próprio sinal de tensão.
2. **Curva de transferência (tensão vs. fluxo):** Insira a tabela que relaciona tensão de saída do sensor com fluxo de massa de ar em kg/h (ou g/s). Essa curva é específica para cada modelo de MAF e pode ser obtida:
 - No datasheet do fabricante.
 - Em bases de dados online para sensores OEM comuns.
 - Por calibração em bancada de fluxo com medição de referência.

A tabela típica possui de 20 a 40 pontos, cobrindo a faixa de 0 V a 5 V. É fundamental que a curva seja precisa, pois erros na linearização resultam diretamente em erros no cálculo de combustível.

4.7.3 Quando Usar MAF vs. Speed Density

- **MAF recomendado:** Quando a admissão não foi modificada significativamente em relação ao original, quando se deseja máxima precisão em carga parcial sem calibrar tabela VE, ou quando o sensor MAF original do veículo está em boas condições.

- **Speed Density recomendado:** Quando a admissão foi modificada (filtro esportivo, tubulação alterada, turbo adicionado), quando o MAF limita o fluxo máximo de ar, quando se deseja total flexibilidade de calibração, ou quando o perfil de fluxo no ponto de instalação do MAF foi alterado.
- **Combinação MAF + MAP:** Algumas estratégias utilizam ambos: o MAF como medição primária em carga parcial (alta precisão) e o MAP em carga plena (sem restrição de fluxo). O MotroLink Manager permite configurar a transição entre os dois.



MAF e Modificações na Admissão

Se a admissão foi modificada (troca de filtro, tubulação, intercooler), a curva de transferência do MAF pode não ser mais válida, pois o perfil de velocidade do ar no ponto de instalação foi alterado. Nesses casos, recalibre a curva do MAF ou utilize Speed Density.

4.8 Sensores de O₂/Lambda

Os sensores de oxigênio (também chamados de sensores lambda ou sonda lambda) medem a concentração de oxigênio nos gases de escapamento, permitindo à ECU determinar se a mistura ar/combustível está rica, pobre ou estequiométrica. Essa informação é essencial para o controle em malha fechada (*closed-loop*) da mistura.

4.8.1 Sensor Lambda Narrowband (Banda Estreita)

O sensor narrowband é baseado em uma célula eletroquímica de óxido de zircônia (ZrO₂). A célula gera uma tensão baseada na diferença de concentração de oxigênio entre o lado do escapamento e o lado da referência (ar atmosférico). O princípio é a equação de Nernst:

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2, \text{ref}}}{p_{O_2, \text{exh}}} \right)$$

onde R é a constante dos gases, T a temperatura, F a constante de Faraday, e p_{O_2} as pressões parciais de oxigênio.

Na prática, o sensor narrowband produz:

- $\approx 0,1$ V em mistura pobre (excesso de oxigênio).
- $\approx 0,9$ V em mistura rica (deficiência de oxigênio).
- Uma transição abrupta em lambda $\approx 1,0$ (estequiométrico).

Essa resposta tipo “degrau” torna o sensor narrowband útil apenas para controle em torno de lambda 1,0. Ele **não é capaz** de medir com precisão lambdas significativamente diferentes de 1,0 (por exemplo, 0,85 para potência máxima ou 1,10 para economia).

4.8.2 Sensor Lambda Wideband (Banda Larga)

O sensor wideband utiliza uma célula de Nernst combinada com uma **célula de bombeamento de oxigênio**. O controlador do sensor ajusta a corrente de bombeamento para manter a célula de Nernst em equilíbrio (450 mV). A corrente necessária para isso é proporcional ao desvio de lambda em relação a 1,0:

- Corrente positiva: mistura pobre (bombeando oxigênio para fora).
- Corrente negativa: mistura rica (bombeando oxigênio para dentro).
- Corrente zero: lambda = 1,0.

Isso permite medir com precisão toda a faixa de lambda, tipicamente de 0,65 a 1,60 ou além. O controlador converte a corrente de bombeamento em um valor de lambda ou AFR (relação ar/combustível) e o transmite à ECU via sinal analógico (0–5 V) ou barramento CAN.

4.8.3 CAN O2 — WideLink via CAN

O MotroLink WideLink é um controlador de sonda wideband que se comunica com a evoTech via barramento CAN. As vantagens dessa abordagem incluem:

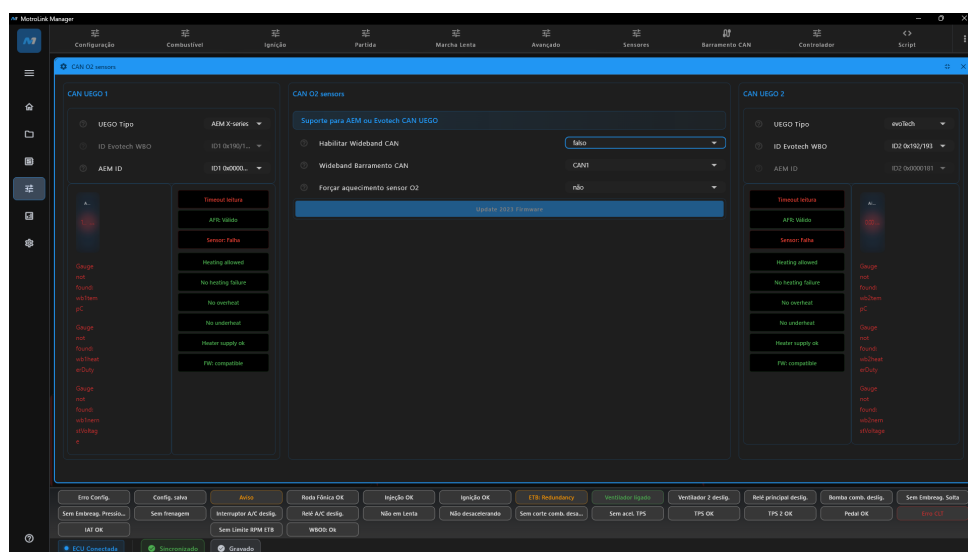
- **Maior precisão:** A transmissão digital via CAN elimina erros de conversão analógico-digital e ruído no cabo de sinal.
- **Informações adicionais:** Além do lambda, o WideLink pode transmitir temperatura do sensor, status de aquecimento, diagnósticos e estado de saúde do sensor.
- **Simplicidade de fiação:** Apenas dois fios de CAN (CAN-H e CAN-L) substituem o cabo de sinal analógico.
- **Múltiplos sensores:** É possível conectar vários controladores WideLink no mesmo barramento CAN, cada um com um ID único.

4.8.4 Configuração no MotroLink Manager

1. Tipo de sensor:

- **CAN O2 (WideLink):** Selecione esta opção para o controlador WideLink via CAN. Configure o ID CAN do dispositivo. Nenhuma linearização é necessária, pois o valor de lambda é transmitido digitalmente já processado.
- **Analógico wideband:** Para controladores que fornecem saída de tensão analógica (0–5 V). Configure a entrada analógica e a curva de linearização (tensão vs. lambda). Curvas comuns incluem: Bosch LSU 4.9 com controlador AEM (0,5 V = 0,68 lambda, 4,5 V = 1,36 lambda), Innovate LC-2, PLX, entre outros.
- **Analógico narrowband:** Para sondas narrowband de 1 ou 4 fios. A ECU utiliza o sinal apenas para controle estequiométrico (alternando entre rico e pobre em torno de lambda 1,0).

2. **Linearização:** Para sensores analógicos, insira a tabela de conversão tensão → lambda. Essa tabela depende do controlador utilizado, não do sensor em si. Consulte o manual do controlador para obter a curva correta.



Configuração do sensor de O2 — opções CAN (WideLink) e analógico.

i Sonda Lambda e Combustível

O valor de lambda é relativo ao combustível utilizado. A relação estequiométrica muda conforme o combustível: gasolina pura $\approx 14,7:1$, etanol (E100) $\approx 9,0:1$, E85 $\approx 9,8:1$. O MotroLink Manager compensa automaticamente o tipo de combustível ao exibir AFR a partir do lambda, desde que o combustível esteja corretamente configurado.

i Vida Útil da Sonda

Sondas lambda wideband têm vida útil limitada (tipicamente 50.000 a 100.000 km dependendo das condições). Sondas contaminadas por chumbo (combustível adulterado), silicone (uso de silicone RTV na montagem do motor), ou excesso de combustível não queimado (motor falhando) devem ser substituídas. Uma sonda degradada fornece leituras imprecisas, comprometendo o controle de mistura.

4.9 Pressão e Temperatura de Óleo

O monitoramento de pressão e temperatura do óleo lubrificante é fundamental para a proteção do motor. A ECU pode utilizar essas informações para acionar alertas, reduzir potência ou até desligar o motor em condições de risco.

4.9.1 Sensor de Pressão de Óleo

O sensor de pressão de óleo é tipicamente um transdutor piezoresistivo com saída de tensão proporcional à pressão. Diferente do MAP, a faixa de pressão é significativamente maior (tipicamente 0 a 10 bar ou 0 a 150 PSI).

Configuração:

- Selecione o tipo de sensor (preset ou customizado).
- Configure a curva de linearização (tensão vs. pressão em kPa ou bar).
- Dados típicos de sensores comuns:
 - 0,5 V = 0 bar (ou 0 PSI).
 - 4,5 V = 10 bar (ou 150 PSI).
- Defina os limites de alerta e proteção (por exemplo, pressão mínima de 1,5 bar em marcha lenta, 3,0 bar em alta RPM).

Física da pressão de óleo: A pressão de óleo é gerada pela bomba de óleo (acionada pelo virabrequim) e depende da viscosidade do óleo (que varia com a temperatura), da folga dos mancais (que aumenta com o desgaste), e da RPM do motor. É normal que a pressão de óleo seja menor em marcha lenta (baixa RPM) e maior em alta RPM.

4.9.2 Sensor de Temperatura de Óleo

O sensor de temperatura de óleo é tipicamente um termistor NTC, idêntico em princípio ao CLT. A faixa de operação vai tipicamente de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Configuração:

- Selecione o tipo de termistor (preset ou curva customizada).
- Configure o resistor de pull-up.
- Defina limites de alerta (por exemplo, alerta acima de $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, corte acima de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Importância: A temperatura do óleo é frequentemente mais representativa da temperatura real do motor do que o CLT, pois o óleo circula pelo bloco, cabeçote e pistões. Em motores de alto desempenho ou uso em pista, a temperatura do óleo pode exceder significativamente a temperatura do líquido de arrefecimento.

4.9.3 Curvas de Linearização

Para sensores que não correspondem a presets do MotroLink Manager , é necessário inserir uma curva de linearização:

- **Pressão:** Insira pares (tensão, pressão). Mínimo 3 pontos; recomendado 5 ou mais para boa interpolação.
- **Temperatura (NTC):** Insira pares (resistência, temperatura). Use dados do datasheet do fabricante.
- **Verificação:** Compare a leitura da ECU com um instrumento de referência independente (manômetro mecânico para pressão, termômetro infravermelho para temperatura).



Proteção do Motor

Configure sempre os limites de proteção por pressão e temperatura de óleo. Um motor operando com pressão de óleo insuficiente pode sofrer danos catastróficos nos mancais em questão de segundos. A temperatura excessiva do óleo degrada suas propriedades lubrificantes, acelerando o desgaste.

4.10 Sensores de Combustível

Esta subseção abrange os diversos sensores relacionados ao sistema de combustível: composição (flex fuel), pressão, temperatura e nível.

4.10.1 Sensor Flex Fuel

O sensor Flex Fuel mede o percentual de etanol no combustível. Essa informação é essencial em mercados como o brasileiro, onde veículos flex podem operar com qualquer mistura de gasolina e etanol (E27 a E100).

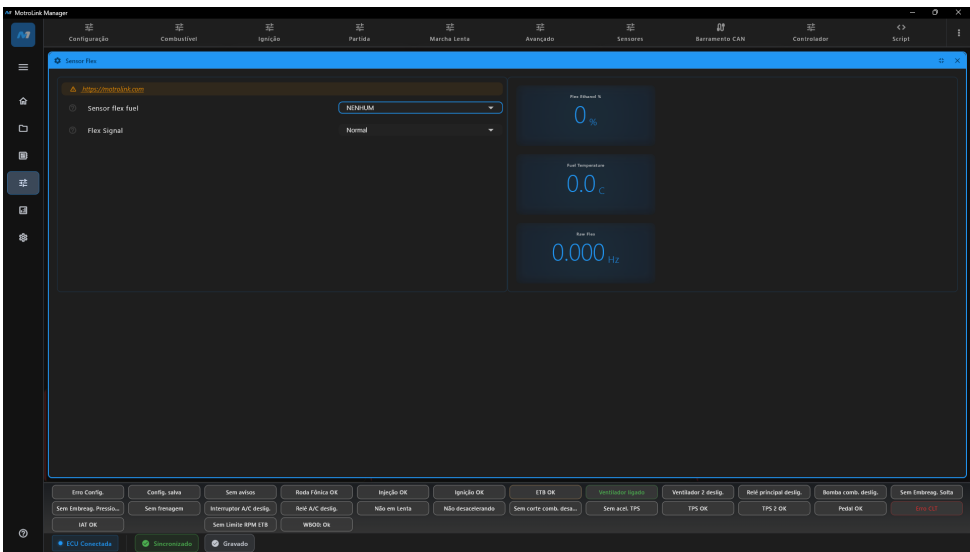
Princípio de funcionamento: O sensor Flex Fuel mais comum (Continental/GM) utiliza um princípio capacitivo/óptico. O combustível passa por uma câmara onde suas propriedades dielétricas são medidas. Como o etanol e a gasolina possuem constantes dielétricas significativamente diferentes, o sensor pode determinar a proporção da mistura.

A saída é um **sinal de frequência** (onda quadrada):

- 50 Hz = 0% de etanol (gasolina pura).
- 150 Hz = 100% de etanol (E100).
- A frequência varia linearmente entre esses extremos.
- Adicionalmente, a largura de pulso indica a temperatura do combustível.

Configuração no MotroLink Manager :

1. Selecione a entrada digital à qual o sensor está conectado.
2. Configure os limites de frequência (50 Hz para 0%, 150 Hz para 100%, ou ajuste conforme o sensor específico).
3. Habilite a compensação de temperatura do combustível, se desejada.
4. Verifique a leitura: com gasolina comum brasileira (E27), espere uma leitura de $\approx 27\%$. Com etanol, $\approx 92\text{--}100\%$.



Configuração do sensor Flex Fuel — entrada digital e faixa de frequência.

4.10.2 Virtual Flex Sensor

Quando não há sensor Flex Fuel físico instalado, o MotroLink Manager oferece a opção de **Flex Virtual**. Essa funcionalidade estima o percentual de etanol a partir da análise da correção de combustível em malha fechada:

- Se a ECU precisa adicionar consistentemente mais combustível do que o esperado (correção positiva grande), isso indica maior proporção de etanol (que requer mais combustível por ser menos energético por unidade de massa).
- O algoritmo converge gradualmente para uma estimativa do percentual de etanol.
- **Limitações:** A convergência é lenta (pode levar minutos ou até ciclos de condução), é afetada por outros fatores que alteram a mistura (vazamentos de vácuo, injetores degradados), e não é tão precisa quanto um sensor físico.

Sensor Flex Físico vs. Virtual

Sempre que possível, instale um sensor Flex Fuel físico. A resposta é imediata (a ECU sabe o percentual de etanol antes mesmo de dar partida), precisa, e não é afetada por outros parâmetros. O sensor virtual é uma alternativa quando a instalação física não é viável.

4.10.3 Pressão de Combustível

O sensor de pressão de combustível mede a pressão na linha de alimentação dos injetores. Essa informação é utilizada para:

- Compensar variações de pressão no cálculo do tempo de injeção (a vazão do injetor varia com a raiz quadrada da diferença de pressão).
- Monitorar o funcionamento da bomba de combustível.
- Detectar queda de pressão em alta carga (bomba subdimensionada, filtro obstruído).
- Em sistemas de injeção direta, monitorar a pressão do rail de alta pressão.

Configuração:

- Selecione o tipo de sensor (preset ou curva customizada).
- Configure a curva de linearização (tensão vs. pressão).
- Sensores comuns: 0,5 V a 4,5 V para 0 a 6 bar (sistemas port injection) ou 0 a 200 bar (sistemas GDI).

4.10.4 Temperatura de Combustível

A temperatura do combustível afeta sua densidade e, portanto, a massa injetada para um dado tempo de injeção. Em motores turbo com retorno de combustível, a temperatura pode subir significativamente.

Configuração: Termistor NTC, configuração idêntica ao CLT/IAT (tipo de sensor, pull-up, curva).

4.10.5 Nível de Combustível

O sensor de nível de combustível do tanque pode ser lido pela ECU para exibição no painel ou para estratégias de proteção (por exemplo, desabilitar boost alto com tanque quase vazio para evitar funcionamento da bomba em seco).

Configuração:

- Selecione a entrada analógica.
- Configure a curva de linearização (resistência ou tensão vs. nível em porcentagem ou litros).
- Boias de combustível OEM variam amplamente em faixa de resistência (por exemplo, 0–90 Ω ou 33–240 Ω). Consulte o manual do veículo.

4.11 Sensor de Velocidade

O sensor de velocidade do veículo (VSS — *Vehicle Speed Sensor*) fornece à ECU a velocidade instantânea do veículo. Essa informação é utilizada para controle de tração, limitador de velocidade, cálculo de marcha engrenada, controle de cruise, estratégias de desaceleração (fuel cut) e exibição no painel.

4.11.1 Tipos de Entrada

O MotroLink Manager suporta duas formas de obter a velocidade do veículo:

- **VSS via pino de entrada:** O sensor gera um sinal de frequência (onda quadrada ou senoidal) cuja frequência é proporcional à velocidade. O sensor pode ser:
 - **Efeito Hall:** Gera uma onda quadrada limpa. Requer alimentação (5 V ou 12 V). Tipicamente 3 fios: alimentação, sinal, massa.
 - **Indutivo (relutância variável):** Gera uma onda senoidal cuja amplitude e frequência aumentam com a velocidade. 2 fios: sinal e referência. Pode necessitar de condicionamento de sinal.
- **VSS via CAN:** A velocidade é recebida digitalmente do barramento CAN do veículo (do módulo ABS, TCM, ou painel). Vantagem: sem fiação adicional de sensor. Requer configuração do protocolo CAN (ID, byte, fator de escala).

4.11.2 Pulsos por Quilômetro

A calibração do VSS requer o parâmetro **pulsos por quilômetro**: o número de pulsos que o sensor gera por quilômetro percorrido. Esse valor depende de:

- O número de dentes da engrenagem acionadora do sensor.
- A relação de transmissão até o ponto de medição (câmbio, diferencial).
- O diâmetro dinâmico do pneu (que varia com o tamanho do pneu e a pressão).

Determinação do valor:

1. **Via especificação:** Consulte o manual do veículo ou do câmbio para obter o número de pulsos por revolução do eixo de saída. Calcule o número de pulsos por km com base na circunferência do pneu.
2. **Via GPS:** Compare a velocidade indicada pela ECU com a velocidade real medida por GPS. Ajuste o parâmetro de pulsos/km até que as leituras coincidam.
3. **Via distância conhecida:** Percorra uma distância conhecida (por exemplo, entre dois marcos quilométricos) e conte o número total de pulsos acumulados pela ECU. Divida pelo número de quilômetros.

Troca de Pneus

Ao trocar o tamanho dos pneus, recalibre o VSS. Pneus maiores geram menos pulsos por km (o veículo percorre mais distância por revolução), e pneus menores geram

mais. Uma calibração incorreta afeta velocidade indicada, odômetro, controle de tração e limitador de velocidade.

4.12 Sensores Turbo

Motores turboalimentados requerem monitoramento adicional para operação segura e eficiente. Esta subseção abrange os sensores específicos para sistemas turbo.

4.12.1 EGT — Temperatura dos Gases de Escapamento

O sensor EGT (*Exhaust Gas Temperature*) mede a temperatura dos gases de escapamento, tipicamente antes da turbina. Essa é uma das medições mais importantes para proteção do turbo e do motor:

- Temperaturas excessivas (acima de 900 *extdegreeC*–1000 *extdegreeC* para turbos comuns, ou 1050 *extdegreeC* para turbos de alto desempenho) podem danificar as pás da turbina, causar fadiga térmica no coletor de escapamento, e acelerar a degradação do óleo do turbo.
- Temperaturas muito baixas em carga plena podem indicar mistura excessivamente rica (ineficiência) ou problemas de ignição.

Tipos de sensor:

- **Termopar tipo K:** O tipo mais comum para EGT. Baseado no efeito Seebeck: a junção de dois metais diferentes (Chromel e Alumel) gera uma tensão proporcional à temperatura. Faixa típica: –200 *extdegreeC* a 1260 *extdegreeC*. Requer um amplificador/condicionador de sinal (o sinal bruto é da ordem de microvolts por grau). A ECU evoTech possui entradas dedicadas para termopar, ou pode-se utilizar um módulo condicionador externo.
- **EGT via CAN:** Módulos de EGT dedicados que condicionam o sinal do termopar e transmitem a temperatura via barramento CAN. Oferecem maior precisão, compensação de junção fria integrada, e possibilidade de monitorar múltiplos cilindros sem ocupar entradas analógicas.

Configuração no MotroLink Manager :

- Selecione o tipo de entrada (termopar direto ou CAN).
- Para termopar direto, selecione o tipo (K, J, etc.) e a entrada utilizada.
- Configure os limites de proteção (alerta e corte).
- Em aplicações de pista, considere monitorar EGT por cilindro para identificar cilindros com mistura desigual.

Proteção por EGT

Temperaturas de escapamento acima do limite podem destruir o turbocompressor em minutos. Configure sempre um limite de EGT com ação de proteção (redução de boost, enriquecimento de mistura, ou corte de potência). Em competição, onde o motor opera no limite, o monitoramento de EGT é absolutamente indispensável.

4.12.2 Posição da Wastegate

Em sistemas com wastegate eletrônica (controlada por solenoide ou motor de passo), um sensor de posição pode monitorar o ângulo real de abertura da wastegate. Isso permite controle em malha fechada do boost:

- O sensor é tipicamente um potenciômetro ou sensor Hall acoplado ao eixo da wastegate.
- A configuração é análoga ao TPS: tensão mínima (fechada), tensão máxima (aberta), calibração de 0% a 100%.
- A ECU compara a posição comandada com a posição real para ajustar o duty cycle do solenoide.

4.12.3 Temperatura Pós-Compressor

Um sensor de temperatura posicionado após o compressor e antes do intercooler permite avaliar a eficiência do compressor e do intercooler:

- **Temperatura pós-compressor:** Indica quão quente o ar sai do compressor. Temperaturas excessivamente altas indicam operação fora da faixa de eficiência do compressor (surge ou choke).
- **Diferença pré/pós intercooler:** Comparando a temperatura pós-compressor com o IAT (pós-intercooler), é possível calcular a eficiência do intercooler:

$$\eta_{IC} = \frac{T_{\text{pós-compressor}} - T_{\text{pós-IC}}}{T_{\text{pós-compressor}} - T_{\text{ambiente}}} \times 100\%$$

- Tipicamente utiliza-se um termistor NTC ou sensor de temperatura tipo Bosch. Configuração idêntica ao IAT.

Heat Soak

Em situações de trânsito ou após uma arrancada forte seguida de parada, o intercooler pode sofrer *heat soak* — o ar quente acumulado não é resfriado por falta de fluxo. O monitoramento da temperatura pós-intercooler permite à ECU reduzir o boost ou retardar a ignição até que as condições térmicas se normalizem.

4.13 Sensores Auxiliares

A ECU evoTech oferece entradas adicionais para sensores que não se enquadram nas categorias anteriores. Essas entradas proporcionam flexibilidade para monitorar grandezas específicas de cada aplicação.

4.13.1 AuxTemp1 e AuxTemp2 — Temperaturas Auxiliares

Duas entradas dedicadas a sensores de temperatura adicionais. Aplicações típicas:

- Temperatura do óleo da transmissão/câmbio.
- Temperatura do diferencial.
- Temperatura do líquido de arrefecimento em outro ponto do circuito.
- Temperatura do habitáculo ou do compartimento do motor.
- Temperatura do intercooler (corpo do trocador).

Configuração: Idêntica ao CLT/IAT — selecione o tipo de termistor, configure pull-up e curva de resistência vs. temperatura.

As leituras de AuxTemp podem ser utilizadas em:

- Tabelas de correção (por exemplo, reduzir boost se a temperatura do óleo do câmbio exceder um limite).
- Saídas condicionais (ativar uma ventoinha adicional quando a temperatura auxiliar exceder um threshold).
- Logging e telemetria para análise posterior.
- Scripts Lua para lógica customizada.

4.13.2 Sensores Lineares Auxiliares

As entradas analógicas auxiliares podem ser configuradas para ler qualquer sensor com saída de tensão linear (0–5 V). Exemplos:

- Sensor de posição de suspensão (potenciômetro linear) para telemetria.
- Sensor de pressão de freio para controle de launch.
- Sensor de força no volante (strain gauge amplificado).
- Sensor de corrente da bomba de combustível.
- Acelerômetro analógico para detecção de detonação alternativa.

Configuração:

- Selecione a entrada analógica utilizada.
- Insira a curva de linearização (tensão vs. grandeza física em unidades de engenharia).
- Defina o nome/label do sensor para identificação nos logs e gauges.

4.13.3 Entradas SENT (Single Edge Nibble Transmission)

O protocolo SENT é um padrão digital utilizado por sensores automotivos modernos (SAE J2716). Diferente dos sinais analógicos, o SENT transmite dados digitalmente por um único fio, oferecendo:

- **Maior resolução:** Tipicamente 12 bits (4096 níveis) contra 10–12 bits do ADC analógico, mas sem ruído de fiação.
- **Diagnóstico integrado:** O protocolo inclui bits de status e CRC para detecção de erros.
- **Múltiplos canais:** Um único fio pode transmitir dados de dois canais independentes (por exemplo, TPS + temperatura do sensor).
- **Imunidade a ruído:** Como a informação é codificada em tempo (não em amplitude), o sinal é muito mais imune a interferências eletromagnéticas.

Sensores SENT são comuns em TPS, pedal do acelerador e sensores de pressão de veículos modernos. A ECU evoTech pode decodificar sinais SENT em entradas compatíveis.

Configuração:

- Selecione o pino configurado para SENT.
- Configure o número de nibbles e o formato de dados conforme o datasheet do sensor.
- Verifique a leitura e compare com valores esperados.

Sensores SENT

O protocolo SENT está se tornando cada vez mais comum em sensores automotivos OEM. Se o veículo original utiliza sensores SENT, verifique a compatibilidade com a entrada da evoTech antes de substituir por sensores analógicos. A leitura direta do sensor SENT original é preferível.

4.14 Configurações de Entradas Analógicas

A ECU evoTech possui múltiplas entradas analógicas que podem ser configuradas para diferentes tipos de sensores. Esta subseção aborda as configurações gerais que afetam todas as entradas.

4.14.1 Mapeamento de Pinos

Cada entrada analógica da ECU está associada a um pino físico no conector. O mapeamento entre pinos e funções de sensor é configurável no MotroLink Manager :

- Cada função de sensor (CLT, IAT, MAP, TPS, etc.) deve ser atribuída a um pino específico.
- O mesmo pino **não pode** ser atribuído a duas funções simultaneamente.
- Pinos não utilizados podem ser desabilitados para evitar leituras espúrias.
- Ao trocar a posição de um sensor na fiação, atualize o mapeamento no software.
- Consulte o diagrama de pinagem do chicote específico da sua ECU evoTech para identificar quais pinos estão disponíveis como entradas analógicas.

4.14.2 Pull-ups Internos

As entradas analógicas da ECU podem ter resistores de pull-up internos que podem ser habilitados ou desabilitados conforme a necessidade:

- **Pull-up habilitado:** Necessário para sensores resistivos (termistores NTC como CLT, IAT, AuxTemp). O pull-up fornece a tensão de referência para o divisor de tensão.
- **Pull-up desabilitado:** Necessário para sensores que geram seu próprio sinal de tensão (MAP, MAF, TPS, sensores de pressão). Se o pull-up estiver habilitado em uma entrada com sensor ativo, a tensão lida será incorreta (deslocada para cima).

Pull-up Incorreto

Uma das causas mais comuns de leitura incorreta de sensores é a configuração errada do pull-up. Verifique sempre: sensores resistivos (NTC) necessitam pull-up habilitado; sensores com saída de tensão ativa necessitam pull-up desabilitado. Uma configuração invertida resultará em leituras completamente erradas.

4.14.3 Filtros de Entrada

O MotroLink Manager permite configurar filtros digitais nas entradas analógicas para suavizar ruído:

- **Filtro de média móvel:** Calcula a média das últimas N amostras. Reduz ruído efetivamente, mas introduz atraso proporcional ao número de amostras. Adequado para sensores de variação lenta (temperatura, nível de combustível).

- **Filtro passa-baixa (exponencial):** Aplica um filtro passa-baixa digital de primeira ordem. A constante de tempo determina a frequência de corte. Bom compromisso entre suavização e tempo de resposta.
- **Filtro mediana:** Seleciona a mediana das últimas N amostras. Excelente para eliminar picos espúrios (*spikes*) sem introduzir atraso significativo. Útil para sensores em ambientes com muita interferência eletromagnética (próximos a bobinas de ignição, por exemplo).

Recomendações:

- **Sensores de temperatura (CLT, IAT, óleo):** Filtragem moderada a forte (a temperatura muda lentamente, e ruído causa oscilações indesejáveis nas correções).
- **TPS e pedal:** Filtragem mínima (a resposta deve ser imediata; filtragem excessiva causa sensação de atraso no acelerador).
- **MAP:** Filtragem cuidadosa (deve ser rápido o suficiente para acompanhar transientes de pressão, mas suave o suficiente para eliminar ruído de pulsações).
- **Sensores de pressão (óleo, combustível):** Filtragem moderada (variações são relativamente lentas, exceto em condições transientes).

⚠ Diagnóstico de Ruído

Se uma leitura de sensor apresenta ruído excessivo mesmo com filtragem, investigue a causa raiz antes de simplesmente aumentar a filtragem: verifique a blindagem da fiação, a qualidade dos conectores, o roteamento dos cabos (afastados de bobinas e injetores), e o aterramento do sensor. Um filtro forte pode mascarar problemas reais como mau contato intermitente.

ℹ Verificação Global de Sensores

Antes de iniciar qualquer calibração de combustível ou ignição, faça uma verificação completa de todos os sensores: motor frio ($CLT \approx IAT \approx$ temperatura ambiente), $MAP \approx$ pressão atmosférica, $TPS \approx 0\%$ (borboleta fechada), e nenhum código de erro ativo. Uma base sólida de sensores é o alicerce de toda a calibração.

Parte III

Calibração de Combustível e Ignição

5 Combustível

O sistema de combustível é, sem dúvida, o coração de qualquer calibração de motor a injeção eletrônica. Uma calibração de combustível bem executada garante potência máxima, economia de combustível, emissões controladas e, acima de tudo, proteção mecânica do motor contra condições destrutivas como detonação e temperaturas excessivas.

Esta seção aborda em profundidade todos os parâmetros de calibração de combustível disponíveis na ECU evoTech, desde a configuração básica dos injetores até estratégias avançadas como injeção escalonada, trim por cilindro e modelagem de filme de combustível (wall wetting).

5.1 Fundamentos Teóricos

5.1.1 O Ciclo de 4 Tempos e a Injeção Eletrônica

Em um motor de ciclo Otto a 4 tempos, o cilindro executa quatro cursos completos do pistão para cada ciclo de potência:

1. **Admissão** – O pistão desce com a válvula de admissão aberta, aspirando a mistura ar-combustível para dentro do cilindro.
2. **Compressão** – Ambas as válvulas fecham e o pistão sobe, comprimindo a mistura. A taxa de compressão típica varia de 9:1 a 14:1 em motores aspirados.
3. **Combustão (Expansão)** – A vela de ignição gera uma faísca que inicia a combustão da mistura. A expansão dos gases empurra o pistão para baixo, gerando trabalho mecânico.
4. **Escape** – A válvula de escape abre e o pistão sobe novamente, expulsando os gases queimados.

Em motores com injeção eletrônica, a ECU (Unidade de Controle Eletrônico) é responsável por determinar com precisão **quanto combustível** injetar e **quando** injetar. Para isso, ela precisa conhecer a massa de ar que está entrando no cilindro a cada ciclo. Existem duas abordagens principais para medir ou estimar essa massa de ar:

- **Mass Airflow (MAF)** – Utiliza um sensor de fluxo de massa de ar (hot-wire ou hot-film) posicionado no duto de admissão. A medição é direta, porém o sensor é sensível a contaminação e turbulência, e pode ser restritivo em altas vazões.
- **Speed Density (VE)** – Não utiliza sensor MAF. Em vez disso, a ECU calcula a massa de ar indiretamente a partir da pressão do coletor de admissão (MAP), da temperatura do ar (IAT), da rotação do motor (RPM) e de uma tabela de Eficiência Volumétrica (VE). Esta é a abordagem primária utilizada pela evoTech e será o foco desta seção.

5.1.2 O Modelo Speed Density

O modelo Speed Density baseia-se na equação dos gases ideais combinada com a eficiência volumétrica do motor. O cálculo fundamental pode ser descrito de forma simplificada:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{VE \times MAP \times V_d}{R \times T}$$

Onde:

- $\dot{m}_{ar}$ é a massa de ar aspirada por ciclo (gramas)
- VE é a eficiência volumétrica (adimensional, tipicamente 0,3 a 1,1 ou mais em motores turbo)
- MAP é a pressão absoluta no coletor de admissão (kPa)
- V_d é o volume deslocado por cilindro (litros)
- R é a constante específica do ar (kJ/kg·K)
- T é a temperatura absoluta do ar na admissão (Kelvin)

Uma vez conhecida a massa de ar, a ECU calcula o tempo de injeção necessário para fornecer a quantidade correta de combustível, com base na relação ar-combustível desejada (AFR alvo), na vazão dos injetores e no dead time:

$$t_{inj} = \frac{\dot{m}_{ar}}{AFR_{alvo} \times \dot{m}_{inj}} + t_{dead}$$

Onde $\dot{m}_{inj}$ é a vazão mássica do injetor (g/s) e t_{dead} é o dead time (tempo morto) do injetor em milissegundos.

i A tabela VE como coração da calibração

A tabela de Eficiência Volumétrica (VE) é o elemento central de todo o cálculo de combustível no modelo Speed Density. Ela compensa as características reais do fluxo de ar no motor – incluindo efeitos de ressonância do coletor de admissão, sobreposição de válvulas, restrições do filtro de ar e do corpo de borboleta. Uma tabela VE bem calibrada é a fundação sobre a qual toda a estratégia de combustível se apoia.

5.1.3 Relação Ar-Combustível (AFR) e Lambda

A **relação ar-combustível (AFR)** expressa a proporção de massa de ar para massa de combustível na mistura. Cada combustível possui um valor estequiométrico – a proporção exata em que todo o oxigênio e todo o combustível são consumidos na reação de combustão:

- **Gasolina pura (E0):** AFR estequiométrico $\approx 14,7:1$
- **Gasolina brasileira (E27):** AFR estequiométrico $\approx 13,1:1$
- **Etanol puro (E100):** AFR estequiométrico $\approx 9,0:1$ a $9,8:1$
- **Metanol (M100):** AFR estequiométrico $\approx 6,4:1$

A escala **Lambda** (λ) normaliza a AFR dividindo-a pelo valor estequiométrico do combustível em uso:

$$\lambda = \frac{AFR_{real}}{AFR_{stoich}}$$

Isso permite que o calibrador trabalhe com uma escala universal, independente do tipo de combustível:

- $\lambda = 1,0$ – Mistura **estequiométrica**. Todo o oxigênio e todo o combustível são consumidos. Máxima eficiência catalítica. É o ponto de referência para emissões.
- $\lambda < 1,0$ – Mistura **rica**. Há excesso de combustível em relação ao oxigênio disponível. Exemplo: $\lambda = 0,85$ significa 15% mais combustível que o estequiométrico.
- $\lambda > 1,0$ – Mistura **pobre**. Há excesso de ar. Exemplo: $\lambda = 1,10$ significa 10% menos combustível que o estequiométrico.

⚠ AFR vs Lambda – quando usar cada escala

A ECU evoTech permite trabalhar em ambas as escalas. Recomenda-se **sempre utilizar Lambda** como escala primária, pois os valores são independentes do combustível. Um alvo de $\lambda = 0,85$ em carga plena funciona igualmente para gasolina, etanol ou qualquer mistura – a ECU converte internamente para a AFR correta com base no tipo de combustível configurado.

5.1.4 Por que Mistura Rica Protege o Motor em Plena Carga

Em condições de plena carga (*Wide Open Throttle* – WOT), o motor opera com máxima pressão no cilindro e máxima geração de calor. A mistura rica ($\lambda = 0,82$ a $0,88$) é utilizada como estratégia de proteção por dois mecanismos:

1. **Resfriamento evaporativo:** O combustível excedente (não queimado) absorve calor ao evaporar dentro do cilindro. Este efeito reduz a temperatura dos gases no final da compressão e durante a combustão, reduzindo diretamente o risco de detonação (knock).
2. **Redução de temperatura dos gases de escape:** Menos oxigênio disponível resulta em uma combustão menos completa e com menor temperatura de chama. Isso protege as válvulas de escape, o coletor de escape, o turbo (quando presente) e o catalisador.

⚠ Mistura pobre em plena carga – RISCO DE DANOS

Uma mistura pobre ($\lambda > 1,0$) em plena carga é uma das condições mais destrutivas para um motor. A combustão mais quente eleva dramaticamente a temperatura do pistão e das válvulas de escape, podendo causar detonação severa, pré-ignição, fusão de pistões e queima de válvulas em questão de segundos. **Nunca opere o motor em plena carga com lambda acima de 1,0.**

5.1.5 Mistura Pobre para Economia em Cruzeiro

Em condições de carga parcial (cruzeiro), onde as pressões e temperaturas no cilindro são significativamente menores, é seguro e desejável operar com mistura ligeiramente pobre ($\lambda = 1,05$ a $1,10$). Benefícios:

- **Menor consumo de combustível:** Menos combustível por ciclo, sem perda significativa de torque na faixa de operação de cruzeiro.
- **Melhor eficiência térmica:** A combustão com leve excesso de oxigênio é termodinamicamente mais eficiente.
- **Menores emissões de HC e CO:** Combustão mais completa reduz hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono.

Limite prático de empobrecimento

Em geral, o limite prático de empobrecimento é $\lambda \approx 1,10$ a $1,15$. Além disso, o motor pode apresentar instabilidade de combustão (*misfire*), aumento de emissões de NOx e perda perceptível de dirigibilidade. A sonda lambda wideband é essencial para monitorar com precisão.

5.1.6 Dead Time do Injetor

O **dead time** (também chamado de *offset time*, *battery offset* ou *latência*) é o atraso eletromecânico entre o momento em que a ECU envia o pulso elétrico ao injetor e o momento em que o injetor efetivamente abre e começa a fornecer combustível. Este atraso é causado por:

- **Indutância da bobina do injetor:** A corrente elétrica não se estabelece instantaneamente. A bobina precisa gerar campo magnético suficiente para vencer a mola de retorno e abrir a agulha do injetor.
- **Inércia mecânica:** A massa da agulha do injetor e a força da mola de retorno impõem um atraso mecânico.
- **Variação com tensão da bateria:** Com tensão mais baixa (ex.: 10V durante a partida com motor de arranque acionado), a corrente demora mais para se estabelecer, aumentando o dead time. Com tensão mais alta (ex.: 14,4V com alternador carregando), o dead time diminui.
- **Variação com pressão diferencial:** Quanto maior a pressão de combustível em relação à pressão no coletor, maior a força necessária para abrir o injetor e maior o dead time.

O dead time típico varia de 0,5 ms a 1,5 ms para injetores de alta impedância, podendo chegar a valores maiores em injetores de baixa impedância ou muito grandes. A ECU soma o dead time ao tempo de injeção calculado, garantindo que a quantidade efetiva de combustível entregue corresponda ao valor desejado.

⚡ Dead time incorreto

Um dead time configurado incorretamente causa erros sistemáticos na dosagem de combustível que variam com a tensão da bateria. Se o dead time estiver muito baixo, o motor ficará pobre em baixas tensões (partida, alta carga elétrica). Se estiver muito alto, o motor ficará rico nessas condições. Sempre utilize os dados do fabricante do injetor ou meça o dead time em bancada.

5.2 Hardware de Injeção

A configuração do hardware de injeção define como a ECU evoTech aciona os injetores fisicamente. Esta configuração deve ser realizada antes de qualquer calibração de combustível.

5.2.1 Tipo de Injeção

A ECU evoTech suporta três modos de acionamento dos injetores:

- **Sequencial:** Cada injetor é acionado individualmente, no momento correto do ciclo de cada cilindro. Este é o modo mais preciso e é **obrigatório** para calibrações de alto desempenho. Requer sincronização com o sensor de fase (cam sensor). Permite controle individual do timing de injeção e trim por cilindro.
- **Semi-sequencial (Batch Fire):** Os injetores são acionados em pares – tipicamente os cilindros com pistões em posição oposta no ciclo (ex.: cilindros 1 e 4, 2 e 3 em um 4 cilindros). Cada injetor recebe metade do pulso total a cada revolução do virabrequim. Não requer sensor de fase. Útil quando o sensor de fase não está disponível ou apresenta falha.
- **Simultânea:** Todos os injetores são acionados ao mesmo tempo, uma vez por revolução. Cada injetor recebe metade do combustível total por ciclo. É o modo menos preciso, mas funciona como fallback de emergência.

i Recomendação de modo de injeção

Sempre que possível, utilize o modo **sequencial**. Ele permite o controle mais preciso da dosagem de combustível, possibilita o ajuste individual por cilindro (trim) e otimiza a atomização do combustível ao permitir o controle do ângulo de injeção em relação à abertura da válvula de admissão.

5.2.2 Mapeamento de Pinos

O mapeamento dos pinos dos injetores deve seguir a ordem de ignição do motor. Consulte a Seção 2 (Configuração do Motor) para a atribuição correta de cada saída da ECU ao cilindro correspondente. Certifique-se de que:

- Cada saída de injetor da ECU está conectada ao injetor do cilindro correto.
- A numeração dos cilindros no software corresponde à numeração física no motor.
- Os conectores estão firmemente encaixados e os cabos não apresentam danos no isolamento.

5.2.3 Limitador de Duty Cycle do Injetor

O **duty cycle** do injetor representa a porcentagem do tempo disponível em que o injetor permanece aberto em cada ciclo de injeção. Um duty cycle de 100% significa que o injetor está aberto durante todo o período disponível – uma condição que deve ser evitada.

A ECU evoTech permite configurar um **limitador de duty cycle**, que é um valor máximo permitido (tipicamente 85% a 90%). Quando o duty cycle calculado excede este limite, a ECU limita o tempo de injeção, protegendo contra:

- **Sobreposição de pulsos:** Em altas rotações, se o injetor não tem tempo suficiente para fechar completamente entre pulsos, a dosagem de combustível torna-se imprevisível.
- **Superaquecimento do injetor:** Operação contínua sem tempo de resfriamento pode danificar a bobina do injetor.
- **Pressão de combustível instável:** Injetores constantemente abertos podem causar queda na pressão da linha de combustível.

Duty cycle como indicador de dimensionamento

Se o duty cycle máximo durante a operação em plena carga e rotação máxima excede 80%, é um indicativo de que os injetores estão subdimensionados para a aplicação. Considere a instalação de injetores de maior vazão ou um sistema de injeção escalonada (ver Subseção 5.15).

5.3 Configuração dos Injetores

5.3.1 Vazão Nominal

A vazão nominal do injetor, expressa em **cc/min** (centímetros cúbicos por minuto), é o volume de combustível que o injetor fornece por minuto quando totalmente aberto a uma pressão diferencial de referência (tipicamente 3 bar ou 43,5 psi para injetores de baixa pressão).

- A vazão deve ser informada conforme especificação do fabricante do injetor.
- Se os injetores foram testados em bancada, utilize o valor medido – ele pode diferir do valor nominal em até 5–10%, especialmente em injetores usados.
- A ECU utiliza este valor, combinado com a tabela VE, a pressão do combustível e a temperatura, para calcular o tempo de injeção necessário.

Vazão e tipo de combustível

A vazão nominal é tipicamente especificada com um combustível de referência (n-heptano ou gasolina). A densidade do combustível afeta a conversão de cc/min para g/s. A ECU evoTech permite configurar a densidade do combustível para compensar esta diferença ao trabalhar com etanol ou misturas.

5.3.2 Dead Time (Tabela de Tensão vs Pressão)

A ECU evoTech utiliza uma **tabela bidimensional** de dead time, onde:

- **Eixo horizontal (colunas):** Tensão da bateria em Volts (tipicamente de 6V a 16V).
- **Eixo vertical (linhas):** Pressão diferencial de combustível em kPa (ou bar).

Para cada combinação de tensão e pressão, a tabela contém o dead time correspondente em milissegundos. A ECU interpola entre os pontos da tabela em tempo real.

Fontes de dados para preencher a tabela:

1. **Dados do fabricante:** A maioria dos fabricantes de injetores de qualidade (Bosch, Injector Dynamics, DeatschWerks, FuelTech, etc.) fornece tabelas de dead time completas. Estas são a fonte mais confiável.
2. **Medição em bancada:** Utilizando equipamentos de teste de injetores que medem a resposta do injetor em diferentes tensões.
3. **Comunidade e bancos de dados online:** Existem bases de dados colaborativas com caracterizações de injetores populares. Utilizar com cautela.

5.3.3 Correção de Pequenos Pulsos

Em condições de marcha lenta e carga muito baixa, o tempo de injeção calculado pode ser muito curto – próximo ou inferior ao dead time. Nesta faixa, o comportamento do injetor é altamente não linear: a agulha pode não abrir completamente, e a vazão efetiva é significativamente menor que a nominal.

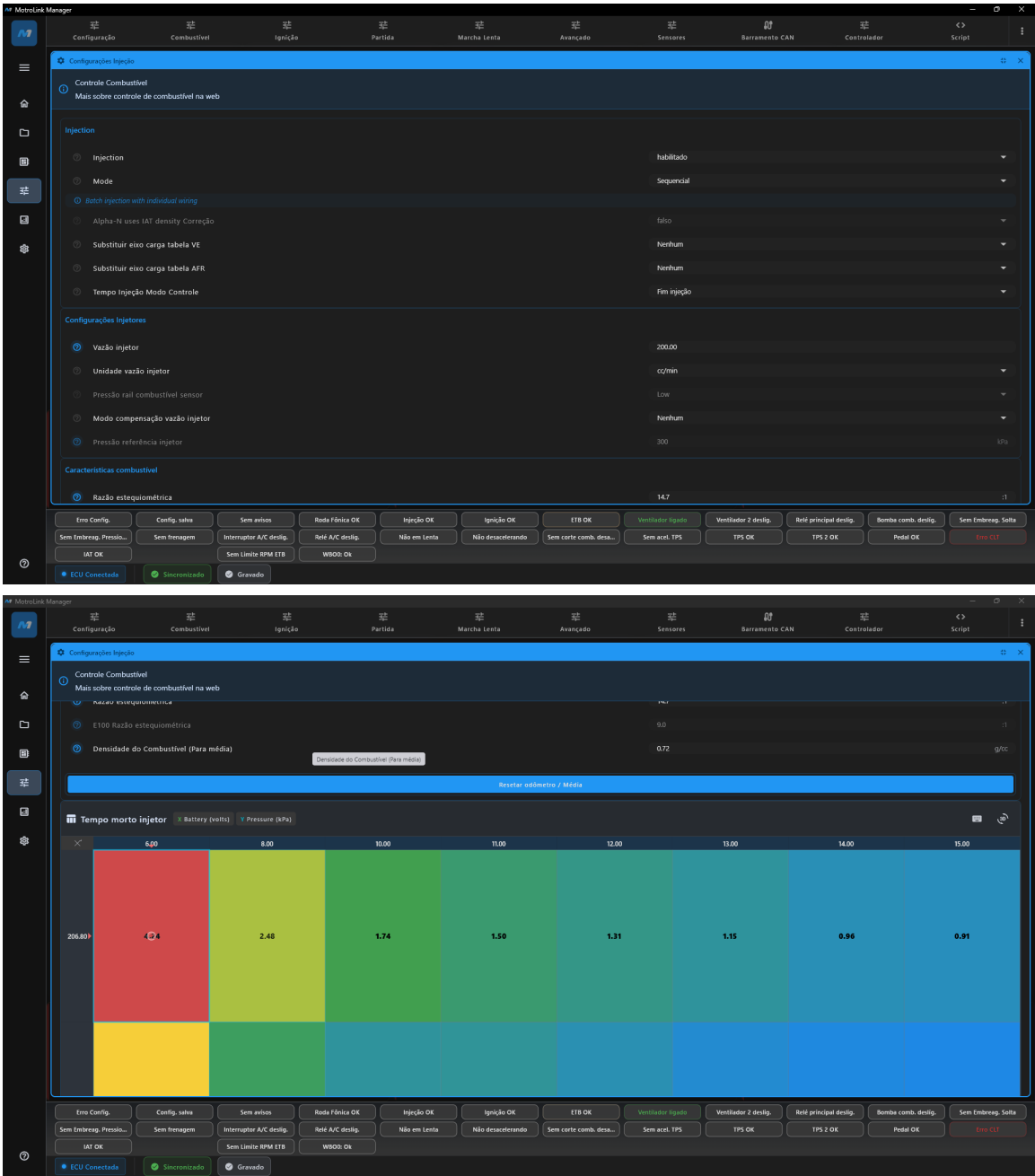
A ECU evoTech oferece uma **tabela de correção de pequenos pulsos** que aplica um fator de compensação para estes pulsos curtos, garantindo dosagem precisa mesmo em condições de baixo fluxo. Esta correção é particularmente importante em:

- Motores com injetores de alta vazão operando em marcha lenta.
- Motores com pressão de combustível muito alta em marcha lenta (ex.: sistemas returnless).
- Calibrações que requerem precisão extrema de AFR em marcha lenta para emissões.

5.3.4 Seleção de Banco

Em configurações com múltiplos bancos de injetores (ex.: motores V6, V8 ou sistemas com injeção escalonada), é necessário atribuir cada injetor ao seu banco correspondente. A configuração de banco permite:

- Aplicar dead times diferentes para cada banco (caso injetores de tipos diferentes sejam usados).
- Aplicar correções de vazão independentes por banco.
- Monitorar e ajustar o trim de combustível (STFT/LTFT) separadamente para cada banco, caso o motor utilize sondas lambda independentes por banco.



Configuração dos injetores: modo de injeção e vazão (topo); tabela de dead time por tensão e pressão diferencial (abaixo).

5.4 Tabela VE – Eficiência Volumétrica

A tabela de Eficiência Volumétrica (VE) é o elemento mais importante de toda a calibração de combustível. Ela representa, para cada combinação de rotação e carga, a eficiência com que o motor aspira ar em relação ao seu volume teórico deslocado.

5.4.1 Estrutura da Tabela

A tabela VE é uma matriz bidimensional:

- **Colunas (eixo X):** Rotação do motor em RPM. Os pontos de quebra típicos vão de 500 RPM (marcha lenta) até a rotação máxima (6000, 8000 ou mais RPM,

dependendo do motor).

- **Linhas (eixo Y):** Carga do motor, tipicamente expressa como pressão absoluta no coletor (MAP) em kPa. Os pontos de quebra vão de 20 kPa (desaceleração com borboleta fechada) até 100 kPa (WOT em aspirado) ou 200–300+ kPa (motores turbo/supercharged).

Cada célula da tabela contém um **valor percentual de VE**. Valores típicos:

- **15–30%** em marcha lenta e carga mínima (borboleta quase fechada, baixa pressão no coletor).
- **70–95%** em plena carga a rotações médias para motores aspirados bem projetados.
- **80–100%+** no pico de torque (onde efeitos de ressonância do coletor maximizam o enchimento).
- **100–180%+** em motores turbo sob pressão positiva (boost), onde a VE efetiva excede 100% porque o turbo força mais ar para dentro do cilindro do que seria aspirado naturalmente.

5.4.2 Como Interpretar os Valores de VE

Um valor de VE de 85% a 3000 RPM e 90 kPa significa que, naquela condição, o motor aspira efetivamente 85% do volume teórico de ar que caberia no cilindro. Os 15% restantes são “perdidos” devido a:

- Restrição do filtro de ar e duto de admissão.
- Restrição do corpo de borboleta (não está 100% aberto a 90 kPa).
- Restrição das válvulas de admissão e portos de cabeçote.
- Gases residuais de escape que permanecem no cilindro.
- Aquecimento do ar ao passar pelo coletor de admissão.
- Efeito de *reversion* em certas faixas de RPM.

VE não é uma medida absoluta de fluxo

Na prática, a tabela VE na ECU funciona como um **fator de escala** que a ECU utiliza para converter a leitura do sensor MAP em massa de ar. Alterar os valores de VE diretamente altera a quantidade de combustível injetado. Portanto, ao calibrar a VE, você está efetivamente calibrando a dosagem de combustível.

5.4.3 Metodologia de Calibração da Tabela VE

A calibração da tabela VE é um processo iterativo que pode ser dividido em três fases:

Fase 1 – Ajuste Grosseiro com Dados de Fábrica

1. Obtenha uma tabela VE base para um motor similar ao seu (mesmo número de cilindros, cilindrada parecida, aspiração similar). Muitas tabelas base estão disponíveis nos fóruns e na comunidade MotroLink .
2. Carregue a tabela base na ECU.
3. Dê partida no motor. Se necessário, faça ajustes grosseiros (multiplicar toda a tabela por um fator) até que o motor funcione de forma estável em marcha lenta.
4. Verifique a leitura da sonda lambda wideband. Ajuste a região de marcha lenta da VE até que o lambda lido corresponda ao lambda alvo configurado.

Fase 2 – Ajuste Fino com Lambda Alvo e Datalogger

1. Configure a tabela de Lambda/AFR Alvo com valores seguros para todas as condições (ver Subseção 5.5).
2. Com o motor funcionando e a sonda lambda wideband conectada, faça datalogging das seguintes variáveis: RPM, MAP, Lambda Alvo, Lambda Medido, VE atual.
3. Percorra **todas** as faixas operacionais do motor: marcha lenta, baixa carga em diversas rotações, carga parcial, e WOT (com cuidado!).
4. Para cada ponto operacional, compare o Lambda medido com o Lambda alvo:
 - Se o Lambda medido é **maior** que o alvo (mistura pobre), a VE naquele ponto está **baixa** – aumente o valor.
 - Se o Lambda medido é **menor** que o alvo (mistura rica), a VE naquele ponto está **alta** – diminua o valor.
5. Repita o processo até que toda a tabela esteja calibrada e o Lambda medido corresponda ao alvo em todas as condições.

Fase 3 – Uso de STFT/LTFT para Identificar Regiões de Correção

1. Ative o controle em malha fechada (STFT) com a sonda lambda wideband.
2. Dirija o veículo em diversas condições (cidade, estrada, subida, plano) por tempo suficiente para que o LTFT acumule dados.
3. Analise a tabela de LTFT: regiões com correções positivas significativas (>3–5%) indicam VE **baixa** demais; correções negativas significativas indicam VE **alta** demais.
4. Incorpore as correções do LTFT na tabela VE (some o % do LTFT ao valor de VE correspondente).
5. Zere o LTFT e repita o processo até que as correções do LTFT fiquem consistentemente abaixo de $\pm 2-3\%$.

Calibração de VE em WOT – SEGURANÇA

Nunca faça ajustes de VE em plena carga (WOT) sem monitoramento em tempo real da sonda lambda wideband e da detonação (knock). Comece sempre com valores de VE mais altos que o esperado (mistura rica) e reduza gradualmente. Tenha sempre um assistente monitorando os dados enquanto outro dirige, ou utilize um sistema de datalog com alarmes configurados para lambda fora da faixa segura.

5.4.4 VE Blend Tables (Tabelas de Mescla)

Em alguns cenários, pode ser útil utilizar mais de uma tabela VE e fazer uma mescla (blend) entre elas. Exemplos:

- **Transição aspirado/turbo:** Uma tabela VE otimizada para a faixa aspirada e outra para a faixa sob pressão positiva.
- **Diferentes perfis de comando de válvulas:** Em motores com VVT, a eficiência volumétrica muda significativamente com o avanço do comando. Uma tabela VE pode ser utilizada para o perfil de baixa rotação e outra para o de alta rotação.
- **Compensação por temperatura:** Em condições extremas de temperatura, um blend pode ajustar a VE sem alterar a tabela principal.

A ECU evoTech permite configurar até duas tabelas VE com um **fator de blend** controlado por um canal de entrada (ex.: posição do VVT, pressão de boost, temperatura). O cálculo final é:

$$VE_{final} = VE_{tabela1} \times (1 - blend) + VE_{tabela2} \times blend$$

Onde *blend* varia de 0,0 (usa 100% da tabela 1) a 1,0 (usa 100% da tabela 2).



Tabela VE em visualização 2D (heatmap): cores quentes indicam regiões de alta eficiência volumétrica.

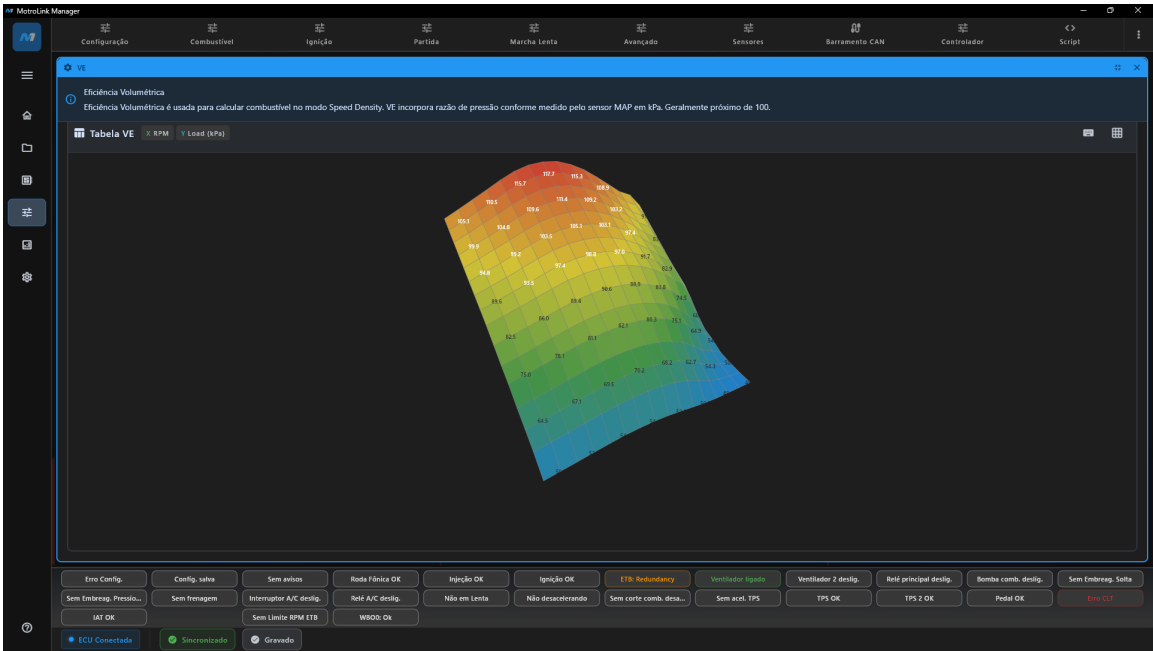


Tabela VE em visualização 3D (superfície): a forma da superfície reflete as características de respiração do motor.

5.5 Lambda/AFR Alvo

A tabela de Lambda (ou AFR) Alvo define a mistura desejada para cada condição operacional do motor. É uma **tabela bidimensional** com RPM nas colunas e carga (MAP) nas linhas.

5.5.1 Estrutura e Interpretação

Cada célula contém o valor de Lambda (ou AFR, dependendo da configuração de exibição) que a ECU deve buscar naquela condição. A tabela VE é responsável por fornecer a quantidade base de combustível; a tabela de Lambda Alvo define **qual** mistura essa quantidade base deve produzir.

5.5.2 Valores Típicos por Região de Operação

- **Marcha lenta:** $\lambda = 1,0$ (estequiométrico). Garante operação estável do catalisador, emissões reduzidas e funcionamento suave do motor. Em alguns motores, um leve enriquecimento ($\lambda = 0,98$) pode melhorar a estabilidade.
- **Cruzeiro / carga parcial:** $\lambda = 1,05$ a $1,10$. Mistura ligeiramente pobre para economia de combustível. É seguro nesta faixa porque as pressões e temperaturas no cilindro são moderadas. Quanto mais pobre, maior a economia, mas pior a dirigibilidade e maiores as emissões de NOx.
- **Transição (carga média):** $\lambda = 1,0$ a $0,95$. Zona de transição entre cruzeiro e plena carga. Comece a enriquecer progressivamente.
- **Plena carga (WOT):** $\lambda = 0,82$ a $0,88$. Mistura rica para proteção do motor (resfriamento evaporativo) e potência máxima. O ponto exato de potência máxima

varia por motor, mas geralmente está entre $\lambda = 0,85$ e $0,88$. Valores mais ricos ($\lambda < 0,82$) desperdiçam combustível sem benefício significativo.

⚠ Consistência entre VE e Lambda Alvo

Lembre-se: a tabela VE define a **massa de ar estimada**, e a tabela de Lambda Alvo define a **mistura desejada**. Se a VE estiver incorreta, o Lambda real não corresponderá ao alvo, independentemente do valor configurado na tabela de Lambda Alvo. Sempre calibre a VE primeiro e em seguida ajuste os alvos de Lambda.

5.5.3 AFR Adder Tables (Tabelas Aditivas de AFR)

As tabelas aditivas de AFR permitem aplicar **correções somativas** ao Lambda/AFR alvo base. Estas tabelas podem ser indexadas por parâmetros adicionais, como:

- **Temperatura do líquido de arrefecimento (CLT):** Para enriquecer a mistura durante o aquecimento, além da correção de warmup principal.
- **Temperatura do ar de admissão (IAT):** Para compensar condições de ar quente.
- **Posição de VVT:** Para ajustar a mistura quando o perfil de comando muda.
- **Teor de etanol (flex fuel):** Para ajustar os alvos automaticamente com base no sensor de etanol.

A AFR final calculada é:

$$\lambda_{final} = \lambda_{tabela\ base} + \lambda_{adder1} + \lambda_{adder2} + \dots$$



Tabela de Lambda/AFR alvo: define a mistura desejada para cada condição de RPM e carga (MAP).

5.6 Correção de Aquecimento (Warmup Enrichment)

5.6.1 Objetivo

Quando o motor está frio, o combustível não vaporiza tão eficientemente quanto em temperatura de operação normal. Uma fração significativa do combustível injetado condensa nas paredes do coletor de admissão e dos portos de admissão, formando um filme líquido que não participa da combustão. Para compensar esta perda, a ECU aplica um **multiplicador de enriquecimento** baseado na temperatura do líquido de arrefecimento (CLT).

5.6.2 Estrutura da Curva

A correção de aquecimento é uma **curva unidimensional**: CLT (eixo X) versus multiplicador (eixo Y). Valores típicos:

- **Acima de 60–70°C**: Multiplicador = 1,0 (sem correção). O motor está em temperatura operacional e a vaporização do combustível é adequada.
- **40°C**: Multiplicador $\approx$ 1,05 a 1,10. Leve enriquecimento.
- **20°C**: Multiplicador $\approx$ 1,10 a 1,20. Enriquecimento moderado.
- **0°C**: Multiplicador $\approx$ 1,20 a 1,30. Enriquecimento significativo.
- **-20°C**: Multiplicador $\approx$ 1,30 a 1,40. Máximo enriquecimento para partida a frio extremo.

O combustível total entregue é multiplicado por este fator:

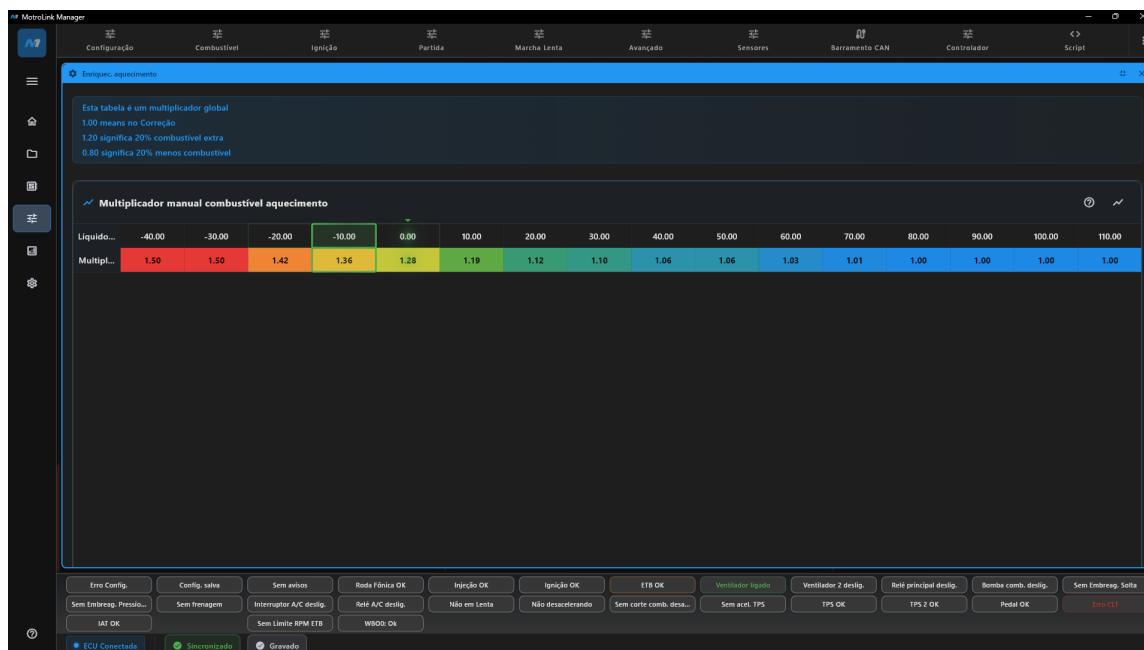
$$t_{inj_final} = t_{inj_base} \times multiplicador_{warmup}$$

5.6.3 Ajuste Prático

1. Dê partida com o motor completamente frio (temperatura ambiente).
2. Monitore a sonda lambda wideband e a temperatura CLT.
3. Se o motor apresenta mistura pobre durante o aquecimento (lambda acima do alvo), aumente o multiplicador nas faixas de temperatura correspondentes.
4. Se a mistura está excessivamente rica (fumaça preta no escape, lambda muito abaixo do alvo), reduza o multiplicador.
5. A transição deve ser suave – evite “degraus” bruscos na curva.

Interação com enriquecimento de partida

A correção de aquecimento atua **após** a partida do motor, durante a fase de aquecimento. O enriquecimento de partida (cranking enrichment) é uma calibração separada, abordada na Seção 6 (Partida). Ambas as correções devem ser calibradas de forma coordenada.



Curva de correção de aquecimento: multiplicador de combustível em função da temperatura do líquido de arrefecimento (CLT).

5.7 Correção por IAT (Temperatura do Ar de Admissão)

5.7.1 Fundamento Físico

A densidade do ar é inversamente proporcional à sua temperatura absoluta (Lei dos Gases Ideais). Quando o ar de admissão está mais quente, sua densidade é menor, e portanto há menos massa de ar por unidade de volume. Sem compensação, o motor receberia a mesma quantidade de combustível para uma massa de ar menor, resultando em mistura rica.

5.7.2 Como a ECU Compensa

A ECU evoTech aplica um **multiplicador de correção por IAT** que ajusta a quantidade de combustível com base na temperatura do ar medida pelo sensor IAT. Este multiplicador é tipicamente uma **curva unidimensional** (IAT versus fator de correção):

- **Na temperatura de referência** (tipicamente 20–25°C): Fator = 1,0 (sem correção).
- **Ar mais frio** (ex.: 0°C): Fator > 1,0 – ar mais denso, mais combustível necessário para manter a AFR alvo.
- **Ar mais quente** (ex.: 50°C): Fator < 1,0 – ar menos denso, menos combustível necessário.

i Modelo Speed Density e IAT

No modelo Speed Density, a temperatura do ar já faz parte da equação principal de cálculo de massa de ar (o termo T no denominador). Portanto, a correção por IAT na ECU evoTech pode atuar como uma **compensação adicional** ou **sobrescrita**.

ao comportamento padrão da equação, dependendo da configuração. Consulte o modo de operação selecionado: se a equação SD já incorpora IAT automaticamente, a tabela de correção por IAT serve para ajustes finos complementares.

5.7.3 Considerações Práticas

- Em motores turbo com intercooler, a temperatura do ar pode variar drasticamente (de 20°C em cruzeiro a 60°C+ em WOT com intercooler ineficiente). A correção por IAT é essencial nestes cenários.
- O posicionamento do sensor IAT influencia a precisão. Sensores posicionados muito próximos ao corpo de borboleta podem ler temperaturas influenciadas pelo calor do motor, não do ar ambiente.
- Em sistemas com injeção direta ou port injection com coletor curto, o sensor de temperatura no coletor pode ser afetado por vapores de combustível e gases de recirculação (EGR).

5.8 Correção Barométrica

5.8.1 Objetivo

A pressão atmosférica (barométrica) diminui com a altitude. Em altitudes elevadas, o ar é menos denso, e o motor aspira menos massa de ar para a mesma abertura de borboleta e mesma pressão relativa no coletor. A correção barométrica ajusta a quantidade de combustível para compensar esta variação.

5.8.2 Estrutura da Tabela

A ECU evoTech utiliza uma **tabela bidimensional** de correção barométrica:

- **Colunas:** RPM do motor.
- **Linhas:** Pressão barométrica em kPa (tipicamente de 60 kPa a 105 kPa).

Cada célula contém um fator multiplicativo. A 101,3 kPa (nível do mar), o fator é 1,0. Em altitudes elevadas (ex.: 85 kPa a 1500m), o fator é menor que 1,0 para reduzir o combustível proporcionalmente.

5.8.3 Obtenção da Pressão Barométrica

A ECU pode obter a pressão barométrica de duas formas:

1. **Sensor barométrico dedicado:** Um sensor de pressão absoluta externo, exposto à pressão atmosférica.
2. **Estimativa pelo sensor MAP:** Ao ligar a ignição (antes de dar partida), o motor não está funcionando e não há vácuo no coletor. A leitura do MAP neste momento corresponde à pressão atmosférica. A ECU armazena este valor como referência barométrica.

Aplicações em altitude

No Brasil, cidades como Belo Horizonte (850m, $\approx$ 91 kPa), Curitiba (930m, $\approx$ 90 kPa), Brasília (1170m, $\approx$ 88 kPa) e localidades na Serra Gaúcha ou Serra Catarinense (até 1800m, $\approx$ 82 kPa) podem apresentar variações significativas em relação ao nível do mar. Veículos que trafegam entre litoral e serra devem ter a correção barométrica devidamente calibrada.

5.9 Estimativa de Temperatura de Carga (Charge Temperature)

5.9.1 Conceito

A temperatura do ar que efetivamente entra no cilindro (**charge temperature**) não é exatamente igual à temperatura lida pelo sensor IAT. O ar é aquecido ao passar pelas paredes do coletor de admissão e dos portos de admissão, e a quantidade de aquecimento depende do tempo de residência do ar no coletor, que por sua vez depende do fluxo (RPM e carga).

5.9.2 Coeficiente de Temperatura de Carga

A ECU evoTech utiliza um **coeficiente de blend** entre a temperatura do ar de admissão (IAT) e a temperatura do líquido de arrefecimento (CLT) para estimar a temperatura real da carga:

$$T_{charge} = IAT + coeficiente \times (CLT - IAT)$$

Onde o coeficiente varia de 0,0 a 1,0:

- **Coeficiente = 0,0:** A temperatura de carga é igual à IAT. Adequado para altas vazões de ar (WOT, alta RPM), onde o ar passa rapidamente pelo coletor e tem pouco tempo para absorver calor.
- **Coeficiente = 1,0:** A temperatura de carga é igual à CLT. Adequado para vazões muito baixas (marcha lenta), onde o ar permanece muito tempo no coletor e se aquece até a temperatura das paredes.

5.9.3 Blend Baseado em Fluxo

O coeficiente pode ser configurado como uma **tabela ou curva** indexada pelo fluxo de ar estimado (ou por RPM $\times$ MAP como proxy de fluxo). Tipicamente:

- Em marcha lenta (baixo fluxo): coeficiente = 0,6 a 0,8.
- Em carga parcial (fluxo moderado): coeficiente = 0,3 a 0,5.
- Em plena carga (alto fluxo): coeficiente = 0,0 a 0,2.

Impacto na calibração

A temperatura de carga estimada é usada no cálculo da densidade do ar (equação Speed Density). Uma estimativa incorreta pode causar erros de dosagem que variam com a temperatura do motor e com a faixa de operação. Se você observa que a mistura fica rica quando o motor está quente em marcha lenta, mas está correta em WOT, verifique o coeficiente de temperatura de carga.

5.10 STFT – Controle em Malha Fechada (Short Term Fuel Trim)

O **Short Term Fuel Trim (STFT)** é o sistema de controle em malha fechada que compara continuamente a leitura da sonda lambda (lambda medido) com o lambda alvo e aplica correções instantâneas ao tempo de injeção para eliminar o erro.

5.10.1 Princípio de Funcionamento

1. A ECU calcula o tempo de injeção base usando a tabela VE, lambda alvo, vazão do injetor e dead time.
2. O combustível é injetado e queimado.
3. A sonda lambda wideband mede o lambda real nos gases de escape.
4. A ECU compara o lambda medido com o lambda alvo.
5. Se há diferença (erro), a ECU aplica uma correção percentual:
 - Lambda medido > alvo (pobre): correção positiva (mais combustível).
 - Lambda medido < alvo (rico): correção negativa (menos combustível).
6. O processo se repete continuamente, centenas de vezes por segundo.

5.10.2 Condições de Ativação

O STFT não deve estar ativo em todas as condições. A ECU permite configurar condições de ativação:

- **RPM mínima:** O STFT só ativa acima de uma rotação mínima (ex.: 800 RPM), para não interferir durante a partida.
- **RPM máxima:** Opcionalmente, desativar o STFT acima de uma rotação (ex.: 6000 RPM), onde a resposta da sonda pode ser insuficientemente rápida.
- **Temperatura mínima (CLT):** O STFT só ativa após o motor atingir uma temperatura mínima (ex.: 40°C), pois durante o aquecimento a correção de warmup deve atuar sem interferência.
- **TPS máximo:** Opcionalmente, desativar o STFT em plena carga (ex.: TPS > 95%), onde a segurança depende de uma calibração VE precisa em malha aberta.
- **Tempo após partida:** Um atraso (ex.: 10 segundos) após a partida antes de ativar o STFT, para que a sonda aqueça e forneça leituras confiáveis.

5.10.3 Limites de Correção

Os limites de correção do STFT definem a faixa máxima de ajuste que o controle em malha fechada pode aplicar. Tipicamente:

- **Limite positivo:** +15% a +25% (máxima adição de combustível).
- **Limite negativo:** -15% a -25% (máxima remoção de combustível).

! Limites de STFT como rede de segurança

Os limites de STFT existem para prevenir que um erro de sonda (ex.: sonda com leitura falsa) cause uma condição catastroficamente rica ou pobre. Se o STFT está constantemente no limite (>15%), a tabela VE está significativamente incorreta naquela região e precisa ser corrigida manualmente. O STFT deve ser um ajuste fino, não uma muleta para uma calibração grosseira.

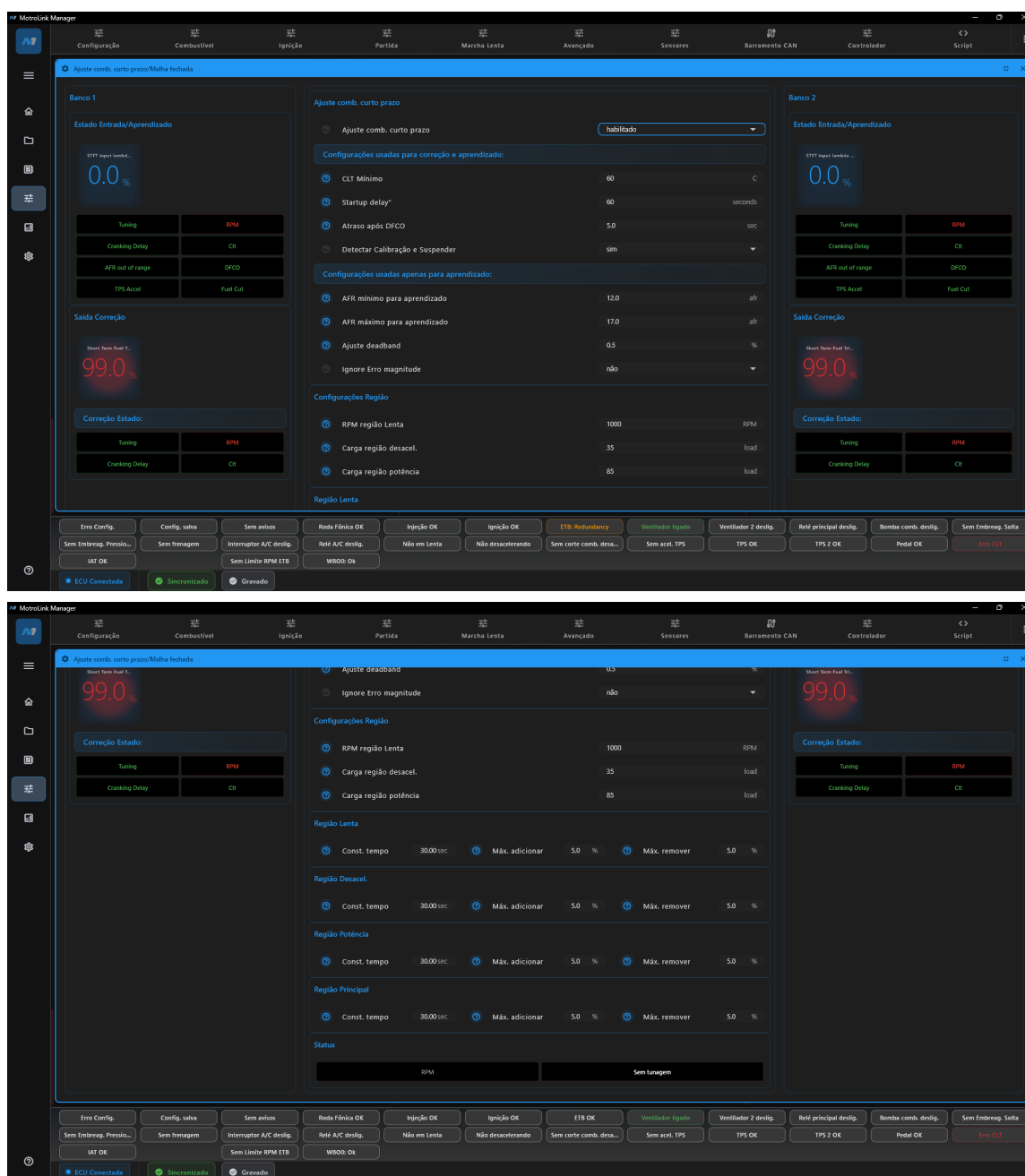
5.10.4 Constantes de Tempo e Limites por Região

O STFT da evoTech utiliza um sistema de correção **baseado em regiões**, e não um controlador PID tradicional. Cada região de operação (definida por faixas de RPM e carga) possui seus próprios parâmetros de ajuste:

- **Constante de tempo (*time constant*):** Define a velocidade de resposta da correção em cada região. Valores menores resultam em resposta mais rápida; valores maiores tornam a correção mais suave e lenta. Valores típicos: 5–30 segundos.
- **Máxima adição (*max add*):** Limite superior de enriquecimento que o STFT pode aplicar naquela região. Valores típicos: +10% a +25%.
- **Máxima remoção (*max remove*):** Limite superior de empobrecimento que o STFT pode aplicar naquela região. Valores típicos: -10% a -25%.
- **Deadband:** Faixa ao redor do lambda alvo na qual o STFT não atua (evita micro-correções desnecessárias). Valores típicos: 0,5–2,0%.

Ajuste prático dos parâmetros por região:

1. Comece com constantes de tempo conservadoras (15–20 s), max add/remove de $\pm 15\%$ e deadband de 1%.
2. Monitore o STFT em marcha lenta. Se a correção demora para convergir ao alvo, reduza a constante de tempo.
3. Se a correção oscila ao redor do alvo, aumente a constante de tempo ou o deadband.
4. Ajuste os limites de max add/remove conforme necessário — limites maiores dão mais margem de correção, mas também mais risco caso a sonda falhe.
5. Teste em transientes (aceleração/desaceleração brusca). O STFT deve reagir suavemente, sem overshoots excessivos.



Configuração do STFT: bancos de sonda e medidores (topo); regiões de ativação e parâmetros de correção (abaixo).

5.11 LTFT – Ajustes de Longo Prazo (Long Term Fuel Trim)

O **Long Term Fuel Trim (LTFT)** é um sistema de aprendizado que acumula as correções do STFT ao longo do tempo e as armazena em uma tabela permanente. O objetivo é compensar erros sistemáticos na tabela VE sem que o STFT precise trabalhar constantemente.

5.11.1 Princípio de Funcionamento

1. O STFT opera continuamente, aplicando correções instantâneas.
2. Quando o STFT mantém uma correção consistente em uma determinada região de

RPM $\times$ carga por um período prolongado, o sistema LTFT “absorve” parte dessa correção.

3. A correção absorvida é armazenada na tabela de LTFT correspondente à célula de RPM $\times$ carga.
4. O STFT é “aliviado” e retorna para mais próximo de zero.
5. Na próxima vez que o motor operar naquela região, a correção LTFT é aplicada automaticamente, e o STFT precisa fazer apenas ajustes finos residuais.

5.11.2 Estrutura da Tabela de Aprendizado

A tabela de LTFT é uma **matriz bidimensional** com:

- **Colunas:** RPM (tipicamente com menos pontos de quebra que a tabela VE – ex.: 8 a 16 colunas).
- **Linhas:** Carga/MAP (também com menos pontos de quebra que a VE – ex.: 4 a 8 linhas).

Cada célula armazena um valor percentual de correção, que pode ser positivo (adição de combustível) ou negativo (remoção de combustível).

5.11.3 Banco 1 e Banco 2

Em motores com configuração em V ou com duas sondas lambda (uma por banco de cilindros), o LTFT opera com tabelas separadas para Banco 1 e Banco 2. Isso permite compensar diferenças entre os bancos, como:

- Comprimento diferente dos dutos de admissão.
- Desgaste desigual dos injetores.
- Diferenças de temperatura entre bancos.

5.11.4 Reset de Trims

A ECU permite resetar (zerar) a tabela de LTFT. Isso deve ser feito:

- Após modificações significativas na tabela VE (pois os trims antigos não são mais válidos).
- Após substituição de injetores, sonda lambda ou alteração na pressão de combustível.
- Após alteração no tipo de combustível (ex.: mudança de gasolina para etanol).
- Periodicamente, como parte do processo de incorporação dos trims na tabela VE.

Incorporando LTFT na tabela VE

Uma prática recomendada é, após acumular dados de LTFT suficientes, **incorporar as correções na tabela VE** e resetar o LTFT. Isso melhora a precisão da calibração em malha aberta e reduz a dependência do controle em malha fechada. Repita o processo iterativamente até que as correções de LTFT fiquem consistentemente próximas de zero ($\pm 2\%$).

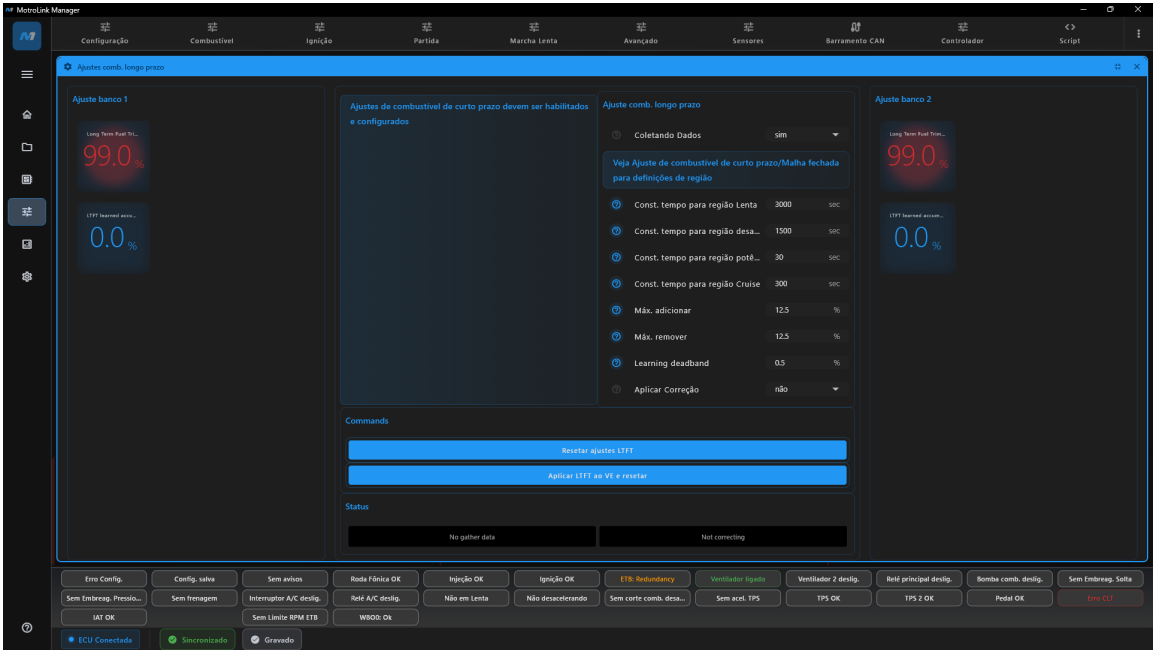


Tabela de aprendizado LTFT: cada célula mostra a correção percentual acumulada para a região correspondente de RPM e carga.

5.12 DFCO – Corte de Combustível em Desaceleração

O **Deceleration Fuel Cut-Off (DFCO)** é uma estratégia que corta completamente a injeção de combustível quando o motorista tira o pé do acelerador e o motor está sendo arrastado pelas rodas (freio motor). Isso economiza combustível e reduz emissões.

5.12.1 Condições de Ativação

O DFCO é ativado quando **todas** as seguintes condições são simultaneamente verdadeiras:

- **RPM acima do limiar de ativação:** Tipicamente 1500 a 2000 RPM. Abaixo deste valor, o corte de combustível poderia causar o motor a morrer.
- **TPS abaixo do limiar:** Tipicamente 1–3%. O acelerador está completamente solto.
- **Motor em temperatura operacional:** CLT acima do limiar (ex.: 60°C). Em motor frio, o DFCO é desabilitado para evitar instabilidade.

5.12.2 Condições de Desativação (Reativação da Injeção)

A injeção de combustível é reativada quando **qualquer** das seguintes condições é verdadeira:

- **RPM cai abaixo do limiar de desativação:** Tipicamente 200–500 RPM abaixo do limiar de ativação (histerese). Exemplo: ativação em 1800 RPM, desativação em 1400 RPM.
- **TPS sobe acima do limiar:** O motorista voltou a pressionar o acelerador.

5.12.3 Temporização de Reativação

A ECU permite configurar um **tempo de reativação** que suaviza a transição de volta para injeção ativa. Este tempo pode incluir:

- **Atraso de ativação:** Um tempo mínimo (ex.: 0,5 a 1,0 s) que as condições de DFCO devem permanecer satisfeitas antes de cortar o combustível. Evita cortes intermitentes em condução urbana.
- **Rampa de reativação:** Ao reativar a injeção, a ECU pode usar uma rampa progressiva (ex.: 0 a 100% em 200 ms) em vez de reativar instantaneamente. Isso evita o “tranco” que o motorista sentiria com a retomada brusca do torque.

Histerese adequada

A histerese entre RPM de ativação e desativação do DFCO é crucial. Se a diferença for muito pequena, o sistema pode ficar ligando e desligando rapidamente em desacelerações lentas, causando uma sensação desagradável de “empurrões”. Recomenda-se uma histerese mínima de 300–500 RPM.

5.13 Timing de Injeção (Ângulo de Injeção)

O **timing de injeção** define *quando*, no ciclo do motor, o combustível é injetado. Em injeção sequencial, este parâmetro é altamente relevante para a atomização e homogeneização da mistura.

5.13.1 Conceito de Ângulo de Injeção

O timing é expresso em **graus do virabrequim**, referenciado a um ponto específico do ciclo (tipicamente o PMS de admissão ou PMS de escape do cilindro em questão). A ECU pode ser configurada para referenciar o ângulo ao **fim do pulso de injeção** (End of Injection – EOI) ou ao **início do pulso** (Start of Injection – SOI):

- **EOI (End of Injection):** O ângulo define onde o injetor *fecha*. É o modo mais comum, pois garante que o combustível termine de ser injetado em um ponto específico, independentemente da duração do pulso.
- **SOI (Start of Injection):** O ângulo define onde o injetor *abre*. Útil quando se deseja controlar exatamente quando o spray de combustível atinge a válvula de admissão.

5.13.2 Estrutura da Tabela

A tabela de timing de injeção é uma **matriz bidimensional**:

- **Colunas:** RPM.
- **Linhas:** Carga (MAP ou TPS).

Cada célula contém o ângulo em graus BTDC (Before Top Dead Center) ou ATDC (After Top Dead Center).

5.13.3 Efeito na Atomização

O objetivo principal do timing de injeção é garantir que o combustível atinja a parte traseira da válvula de admissão enquanto ela está **fechada** (em motores port injection). A válvula quente funciona como um vaporizador, quebrando as gotículas de combustível em partículas menores. Quando a válvula abre, a mistura vaporizada é aspirada para o cilindro.

Se o timing de injeção faz com que o combustível seja injetado com a válvula **aberta**, o spray líquido pode entrar diretamente no cilindro sem vaporizar adequadamente, resultando em:

- Combustão incompleta e aumento de emissões de HC.
- Diluição do filme de óleo nas paredes do cilindro.
- Possível acúmulo de depósitos de carbono.
- Variação na AFR entre ciclos.

Valores iniciais recomendados

Como ponto de partida, configure o fim da injeção (EOI) para ocorrer entre 300° e 360° BTDC de admissão. Isso garante que o combustível atinja a válvula fechada e tenha tempo para vaporizar antes da abertura. Ajuste fino pode ser feito monitorando a estabilidade de lambda e as emissões.

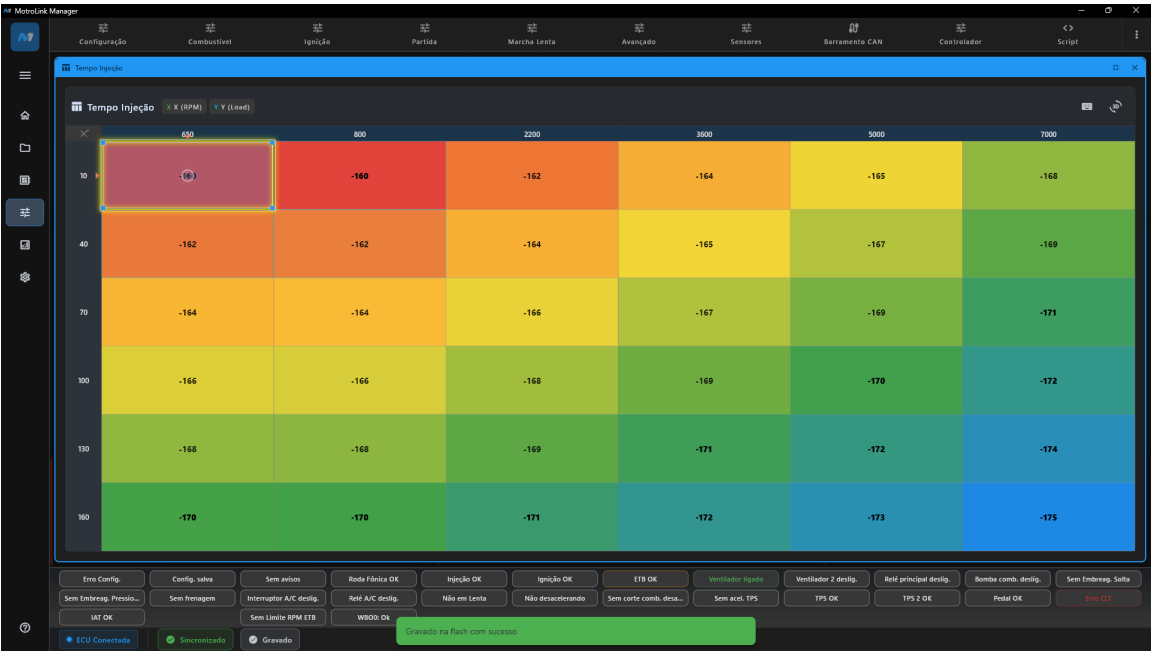


Tabela de timing de injeção: ângulo de injeção em função de RPM e carga.

5.14 Enriquecimento de Aceleração (Acceleration Enrichment – AE)

O **enriquecimento de aceleração (AE)** é uma correção transitória que adiciona combustível extra durante aberturas rápidas da borboleta. Sem esta correção, o motor apresentaria uma hesitação momentânea (“flat spot”) durante a aceleração.

5.14.1 Por que o AE é Necessário

Quando a borboleta abre rapidamente, a pressão no coletor de admissão sobe abruptamente. Este aumento de pressão causa dois efeitos que empobrecem a mistura transitoriamente:

- 1. **Atraso na resposta do sensor MAP:** O sensor MAP leva alguns milissegundos para registrar a nova pressão, e a ECU calcula o combustível com base em uma pressão defasada.
- 2. **Efeito de filme de combustível (wall wetting):** O aumento de fluxo de ar e a queda de vácuo alteram o equilíbrio do filme de combustível nas paredes do coletor. Parte do combustível injetado é “absorvido” pelo filme em crescimento, em vez de chegar ao cilindro. Até que o filme atinja um novo equilíbrio, a mistura no cilindro é mais pobre que o desejado.

5.14.2 Tabela TPS/TPS (From/To)

A ECU evoTech utiliza uma tabela bidimensional de AE indexada por **TPS atual (“from”)** e **TPS destino (“to”)**:

- **Linhas:** TPS antes da aceleração (posição de onde partiu).
- **Colunas:** TPS após a aceleração (posição para onde foi).

Cada célula contém a quantidade de combustível extra a ser adicionada (em ms ou como multiplicador). A diagonal principal da tabela é zero (sem mudança de TPS = sem AE). Valores acima da diagonal (TPS destino > TPS origem) representam aceleração; valores abaixo podem representar desaceleração (geralmente zero ou negativo).

Exemplo de interpretação: a célula TPS from = 10%, TPS to = 80% define quanto combustível extra injetar quando o motorista pisa rapidamente de 10% para 80% de borboleta.

5.14.3 Correção por RPM

O AE pode ser modulado pela rotação do motor. Em geral:

- Em baixas rotações (marcha lenta), o fluxo de ar é baixo e o efeito de wall wetting é mais pronunciado – mais AE é necessário.
- Em altas rotações, o fluxo de ar é alto e a atomização é melhor – menos AE é necessário.

A ECU permite configurar um **multiplicador de AE por RPM** que escala a quantidade de enriquecimento.

5.14.4 Correção por Temperatura (CLT)

Motor frio requer mais AE porque a vaporização do combustível é pior. A ECU aplica um multiplicador adicional baseado na temperatura CLT, tipicamente:

- CLT > 70°C: multiplicador = 1,0.
- CLT = 20°C: multiplicador = 1,5 a 2,0.
- CLT = -10°C: multiplicador = 2,0 a 3,0.

5.14.5 Rate Multiplier (Multiplicador de Taxa)

O **rate multiplier** modula o AE com base na **velocidade** de abertura da borboleta (taxa de variação do TPS em %/s). Aberturas mais rápidas requerem mais enriquecimento:

- Abertura lenta (<50%/s): multiplicador baixo ou nulo – a tabela VE e o STFT conseguem acompanhar.
- Abertura moderada (50–200%/s): multiplicador crescente.
- Abertura rápida (>200%/s): multiplicador máximo.

5.14.6 Modelo de Wall Wetting (Filme de Combustível)

Para calibrações avançadas, a ECU evoTech implementa o **modelo de wall wetting** baseado em dois parâmetros fundamentais:

- **Tau (τ) – Constante de tempo do filme:** Representa quanto tempo leva para o filme de combustível nas paredes do coletor atingir equilíbrio após uma mudança no fluxo de combustível. Valores típicos: 0,1 a 2,0 segundos. Valores maiores indicam que o combustível demora mais para evaporar das paredes (motor frio, combustível de baixa volatilidade).

- **Beta (β) – Fração de filme:** Representa a fração do combustível injetado que se deposita nas paredes do coletor em vez de entrar diretamente no cilindro como vapor. Valores típicos: 0,1 a 0,7 (10% a 70%). Valores maiores indicam pior vaporização (motor frio, baixas rotações).

O modelo calcula dinamicamente a quantidade de combustível que precisa ser injetada a mais (ou a menos) para compensar a absorção ou liberação do filme de parede durante transientes.

Wall wetting vs AE baseado em TPS

O modelo de wall wetting é mais sofisticado e fisicamente correto que o AE simples baseado em tabela TPS/TPS. Porém, é mais difícil de calibrar. Para a maioria das aplicações, o AE baseado em TPS/TPS com correções de RPM e temperatura é suficiente. O modelo de wall wetting é recomendado para calibrações de emissões ou quando se busca dirigibilidade perfeita.

5.14.7 Ajuste Prático do AE

1. Aqueça o motor à temperatura operacional.
2. Configure o datalogger para gravar: RPM, TPS, Lambda medido, Lambda alvo, pulso de AE.
3. Com o motor em marcha lenta, faça aberturas rápidas de borboleta (“tip-in”) de diferentes magnitudes.
4. Observe a leitura de lambda durante o transiente:
 - Se há um “pico pobre” (lambda sobe momentaneamente acima do alvo): aumente o AE.
 - Se há um “pico rico” (lambda cai momentaneamente abaixo do alvo): reduza o AE.
5. Teste em diferentes RPMs e temperaturas.
6. Um AE bem calibrado resulta em lambda praticamente constante durante acelerações, sem hesitação perceptível.



Tabela de enriquecimento de aceleração TPS/TPS: cada célula define o combustível extra ao transicionar de uma posição de TPS (linha) para outra (coluna).

5.15 Injeção Escalonada (Staged Injection)

5.15.1 Quando Utilizar

A injeção escalonada é necessária quando o motor requer mais combustível do que os injetores primários conseguem fornecer sozinhos. Cenários típicos:

- Motores altamente turbinados com injetores primários originais que atingem duty cycle elevado.
- Motores com injetores primários pequenos (para precisão em marcha lenta) e injetores secundários grandes (para plena carga com boost alto).
- Conversões para E85/E100 em motores originalmente projetados para gasolina, onde o consumo de combustível é 30–40% maior.

5.15.2 Princípio de Operação

O sistema utiliza dois conjuntos de injetores:

- **Injetores primários:** Operam em todas as condições. Dimensionados para fornecer combustível suficiente em marcha lenta e carga parcial com boa resolução.
- **Injetores secundários:** Ativados progressivamente conforme a demanda de combustível excede a capacidade dos primários. Tipicamente são de maior vazão.

5.15.3 Tabela de Percentual de Staging (RPM × Carga)

A ECU evoTech utiliza uma **tabela bidimensional** para definir a contribuição dos injetores secundários:

- **Colunas:** RPM.
- **Linhas:** Carga (MAP).
- **Valores:** Porcentagem de staging (0% a 100%).

Interpretação dos valores:

- **0%:** Somente injetores primários ativos. Todo o combustível vem dos primários.
- **50%:** Os injetores secundários fornecem metade da demanda total de combustível.
- **100%:** Os injetores secundários fornecem o máximo definido pela sua configuração.

❗ Transição suave de staging

A transição entre 0% e 100% de staging deve ser **gradual** e bem calibrada. Uma ativação brusca dos injetores secundários causa um pico rico momentâneo, perceptível como um “tropeço” na aceleração. Recomenda-se que a transição ocorra ao longo de uma faixa de carga de pelo menos 10–20 kPa no eixo MAP.

5.15.4 Configuração de Saídas

Os injetores secundários devem ser atribuídos às saídas corretas da ECU. Em geral, a ECU evoTech utiliza saídas auxiliares para os injetores secundários. Deve-se configurar:

- A atribuição de cada saída secundária ao cilindro correspondente.
- A vazão e dead time dos injetores secundários (que podem diferir dos primários).
- O modo de acionamento (sequencial é altamente recomendado para staging).

i Calibração VE com staging

Ao utilizar injeção escalonada, a tabela VE principal continua a definir a demanda total de combustível. A tabela de staging define apenas como essa demanda é **dividida** entre primários e secundários. Portanto, a VE deve ser calibrada considerando a vazão total (primários + secundários) em cada região.

5.16 Trim por Cilindro (Per-Cylinder Trim)

5.16.1 Objetivo

Em um motor ideal, todos os cilindros receberiam exatamente a mesma massa de ar e produziriam a mesma AFR. Na prática, diferenças de:

- Comprimento e geometria dos runners de admissão.
- Desgaste individual das válvulas e sedes.
- Variação de vazão entre injetores (mesmo do mesmo lote).
- Distribuição desigual de temperatura no bloco.
- Diferenças no padrão de fluxo do coletor de escape.

... resultam em variações de AFR entre cilindros. O trim por cilindro permite compensar essas diferenças individualmente.

5.16.2 Estrutura da Tabela

Para cada cilindro, a ECU mantém uma **tabela bidimensional** de trim:

- **Colunas:** RPM.
- **Linhas:** Carga (MAP).
- **Valores:** Percentual de correção (−20% a +20% tipicamente).

O valor de trim é somado (ou multiplicado) ao tempo de injeção base para o cilindro específico:

$$t_{inj_cil} = t_{inj_base} \times \left(1 + \frac{trim_{cil}}{100}\right)$$

5.16.3 Metodologia com Datalog por Cilindro

1. **Instrumentação:** Instale sondas lambda wideband individuais no coletor de escape, uma por cilindro (ou por par de cilindros em motores com escape siamês). Alternativamente, monitore a variação de lambda no coletor unificado por janela de tempo sincronizada com cada cilindro.
2. **Datalog:** Grave o lambda individual de cada cilindro em diversas condições de RPM e carga.
3. **Análise:** Compare o lambda de cada cilindro com o lambda médio ou com o alvo.
4. **Correção:**
 - Cilindro com lambda acima da média (mais pobre): aplique trim positivo (mais combustível).
 - Cilindro com lambda abaixo da média (mais rico): aplique trim negativo (menos combustível).
5. **Validação:** Repita o datalog e verifique que os lambdas estão equalizados.



Quando usar trim por cilindro

O trim por cilindro é uma calibração avançada que requer instrumentação adicional (sondas por cilindro) e tempo de dinamômetro. Na maioria das aplicações de rua, a variação entre cilindros é pequena (<3%) e pode ser ignorada. Utilize trim por cilindro em:

- Motores de competição que buscam potência máxima.
- Motores com configurações de coletor de admissão assimétrico (ex.: V8 com carburador adaptado).
- Motores onde a detonação ocorre sempre em um cilindro específico.
- Diagnóstico de problemas mecânicos ou de injeção.

5.17 Tabela MAP Estimado (Estimated MAP)

5.17.1 Conceito

Em alguns cenários, a leitura direta do sensor MAP pode não estar disponível ou pode não ser a escolha ideal como eixo de carga para a tabela VE. A tabela de MAP estimado fornece um **mapa de RPM $\times$ TPS $\rightarrow$ MAP estimado**, permitindo que a ECU calcule um valor de MAP sintético a partir da posição da borboleta.

5.17.2 Modos de Operação de Carga

A ECU evoTech suporta diferentes modos de cálculo de carga:

- **Speed Density (MAP):** Modo padrão. A carga é determinada diretamente pelo sensor MAP. A tabela de MAP estimado não é utilizada.
- **Alpha-N (TPS):** A carga é determinada pela posição do TPS. Útil em motores com perfis de comando de válvulas muito agressivos (Individual Throttle Bodies – ITBs), onde a pressão no coletor de admissão é muito instável e o sinal MAP não é confiável. Neste modo, a tabela de MAP estimado converte TPS em MAP para uso no cálculo Speed Density.
- **Blend (MAP + TPS):** Modo híbrido que combina a leitura do MAP com a do TPS usando um fator de blend. A tabela de MAP estimado pode ser usada para suavizar transientes ou como fallback em faixas de RPM onde o sinal MAP é instável.

5.17.3 Estrutura da Tabela

A tabela de MAP estimado é uma **matriz bidimensional**:

- **Colunas:** RPM.
- **Linhas:** TPS (%).
- **Valores:** Pressão estimada no coletor em kPa.

Exemplo de valores típicos para um motor aspirado:

- TPS = 0%, qualquer RPM: MAP $\approx$ 20–30 kPa (alto vácuo, borboleta fechada).
- TPS = 100%, baixa RPM: MAP $\approx$ 95–100 kPa (WOT, pouca velocidade de ar).
- TPS = 100%, alta RPM: MAP $\approx$ 85–95 kPa (WOT, alguma restrição do sistema de admissão a altas vazões).
- TPS = 50%, RPM médio: MAP $\approx$ 60–75 kPa (depende do motor).

5.17.4 Preenchimento da Tabela

1. **Método empírico:** Com o motor funcionando e o sensor MAP operacional, faça datalog de RPM, TPS e MAP em todas as condições operacionais.
2. Preencha a tabela com os valores de MAP correspondentes a cada combinação de RPM e TPS observada no datalog.
3. Interpole suavemente entre os pontos medidos.
4. **Validação:** Compare o MAP estimado pela tabela com o MAP real do sensor e verifique que a diferença é mínima ($<3-5$ kPa) em regime estacionário.

Quando usar Alpha-N ou Blend

O modo Alpha-N (ou blend com peso em TPS) é necessário em motores com:

- **ITBs (Individual Throttle Bodies):** O volume do coletor é mínimo, e o sinal MAP é dominado por pulsos de pressão. O sensor MAP mostra leituras muito instáveis.
- **Perfis de comando muito agressivos:** Sobreposição de válvulas extrema causa reversion e oscilações de MAP que confundem o cálculo Speed Density.
- **Motores de competição de alta rotação:** Onde a resposta rápida do TPS é preferível à resposta filtrada do MAP.

Para motores de rua com coletor de admissão convencional, o modo Speed Density (MAP puro) é quase sempre a melhor escolha.

Resumo: Ordem de Calibração de Combustível

Para uma calibração de combustível bem-sucedida, siga esta ordem:

1. Configure o hardware de injeção (tipo, pinos, duty cycle).
2. Configure os injetores (vazão, dead time, banco).
3. Carregue uma tabela VE base e dê partida.
4. Configure a tabela de Lambda Alvo com valores seguros.
5. Calibre a VE em marcha lenta até lambda correto.
6. Calibre a VE em toda a faixa de carga parcial.
7. Calibre a VE em WOT (com monitoramento de segurança).
8. Calibre a correção de aquecimento (partida a frio).
9. Ative e configure o STFT/LTFT.

10. Calibre o enriquecimento de aceleração (AE).
11. Ajuste o timing de injeção.
12. Ajustes finos: correção IAT, barométrica, temperatura de carga.
13. Se necessário: injeção escalonada, trim por cilindro.

Sempre trabalhe com uma sonda lambda wideband funcional e datalogger ativo. Nunca faça ajustes em WOT sem monitoramento em tempo real.

6 Ignição

O sistema de ignição é responsável por iniciar a combustão da mistura ar/combustível no interior do cilindro, no momento exato e com a energia adequada. Uma calibração de ignição bem executada é determinante para a potência, a eficiência, a durabilidade e a segurança do motor. Erros nesta seção — especialmente excesso de avanço — podem destruir um motor em segundos.

Este capítulo aborda desde os fundamentos teóricos da ignição até a configuração detalhada de cada parâmetro disponível nas centralinas evoTech, passando pela construção da tabela de avanço, correções de temperatura, dwell, multi-centelha, controle de detonação e ajustes por cilindro.

Seção de segurança crítica

A ignição é o parâmetro com maior potencial destrutivo em uma calibração de motor. Avanço excessivo causa detonação (*knock*), que pode perfurar pistões, quebrar anéis, danificar bielas, destruir cabeçotes e, em casos extremos, causar falha catastrófica do bloco do motor. Leia esta seção integralmente antes de realizar qualquer ajuste. Na dúvida, **sempre erre para o lado conservador** — menos avanço é sempre mais seguro que mais avanço.

6.1 Teoria da Ignição

Antes de configurar qualquer parâmetro no MotroLink Manager, é fundamental compreender os princípios físicos que regem o sistema de ignição. Este entendimento é o que separa uma calibração tecnicamente correta de uma tentativa baseada em tentativa e erro — e tentativa e erro com ignição pode custar um motor.

6.1.1 O processo da centelha

O sistema de ignição de um motor a ciclo Otto opera em três fases distintas:

1. **Carga da bobina (*dwell*)** — A centralina ativa o circuito primário da bobina de ignição, permitindo que a corrente elétrica flua pelo enrolamento primário. A energia é armazenada no campo magnético do núcleo da bobina. O tempo durante o qual a corrente flui é chamado de *dwell time* (tempo de carga). Um dwell insuficiente resulta em centelha fraca; um dwell excessivo causa superaquecimento da bobina e pode danificá-la permanentemente.
2. **Descarga na vela (*spark*)** — No momento programado, a centralina interrompe abruptamente a corrente do circuito primário. O colapso súbito do campo magnético induz uma alta tensão no enrolamento secundário da bobina (tipicamente 20.000 a 40.000 volts), que rompe a resistência dielétrica do gap da vela de ignição, criando um arco elétrico (centelha) entre os eletrodos.
3. **Início da combustão (*flame front*)** — A centelha inflama a mistura ar/combustível nas imediações dos eletrodos da vela. A partir desse ponto de ignição, uma frente de chama se propaga esfericamente em todas as direções dentro da câmara de combustão, queimando progressivamente a mistura. A velocidade de propagação da frente

de chama depende da composição da mistura, da turbulência, da temperatura e da pressão dentro do cilindro.

i Tempo de queima não é instantâneo

A combustão da mistura não é instantânea — ela leva tipicamente de 1 a 3 milissegundos para se completar, dependendo das condições dentro do cilindro. É por esse motivo que a centelha precisa ocorrer *antes* do ponto morto superior (PMS): para que o pico de pressão da combustão ocorra no momento ideal do curso de expansão.

6.1.2 Avanço de ignição

O **avanço de ignição** é o ângulo de virabrequim, medido antes do ponto morto superior (PMS ou TDC — *Top Dead Center*), no qual a centelha é disparada. Por exemplo, um avanço de 28° significa que a centelha ocorre quando o pistão está a 28 graus de virabrequim antes de atingir o PMS.

O objetivo do avanço é **antecipar o disparo da centelha** para que, considerando o tempo finito de propagação da frente de chama, o pico de pressão da combustão ocorra no momento ideal do curso de expansão — tipicamente entre 12° e 18° após o PMS (ATDC — *After Top Dead Center*). Quando o pico de pressão ocorre nessa janela, a eficiência de conversão da energia térmica em trabalho mecânico é maximizada.

- **Avanço insuficiente (atrasado):** O pico de pressão ocorre tarde demais no curso de expansão. O pistão já está descendo quando a pressão atinge seu máximo. Resultado: perda de torque, aumento da temperatura dos gases de escape (EGT), desperdício de energia térmica.
- **Avanço excessivo (adiantado):** O pico de pressão ocorre cedo demais — próximo ao PMS ou até antes dele. O pistão ainda está subindo quando a pressão é máxima, gerando cargas mecânicas extremas no pistão, biela e virabrequim. Além disso, as condições de altíssima pressão e temperatura favorecem fortemente a detonação.
- **Avanço ideal:** O pico de pressão ocorre na janela ótima (12–18° ATDC), gerando o máximo torque sem ultrapassar os limites de detonação.

6.1.3 MBT — *Maximum Brake Torque*

O ponto de avanço **MBT** (*Maximum Brake Torque*) é o ângulo de avanço que produz o máximo torque efetivo no eixo do motor para uma dada condição de rotação, carga, temperatura e composição da mistura. É o “ponto ótimo” teórico de avanço.

Na prática, o MBT é determinado experimentalmente em dinamômetro: para uma rotação e carga fixas, avança-se progressivamente a ignição em incrementos pequenos (0,5–1°) enquanto se monitora o torque. O torque aumenta com o avanço até atingir um platô — esse platô é o MBT. Avançar além do MBT não gera mais torque; apenas aumenta o risco de detonação.

i MBT nem sempre é alcançável

Em muitas condições de operação — especialmente em alta carga, motores turbo e com combustíveis de baixa octanagem — o avanço MBT não pode ser utilizado

porque a detonação aparece *antes* de atingi-lo. Nesses casos, o avanço é limitado pelo *borderline knock*, e não pelo MBT. A calibração deve sempre respeitar o limite mais restritivo entre os dois.

6.1.4 Detonação (*knock*)

A **detonação** (também chamada de *knock*, *pinging* ou *grilagem*) é o fenômeno de autoignição espontânea de uma porção da mistura ar/combustível que ainda não foi atingida pela frente de chama normal. Enquanto a combustão normal se propaga de forma controlada a partir da vela, a detonação ocorre quando a mistura remanescente (chamada de *end gas*) atinge condições de pressão e temperatura tão extremas que se inflama espontaneamente, sem a ação da centelha.

A detonação gera ondas de pressão de altíssima frequência (tipicamente 5–15 kHz) que se propagam dentro da câmara de combustão e colidem com as paredes do cilindro, pistão e cabeçote. O som metálico característico (“batida de pino”) é o resultado acústico dessas ondas de choque.



Danos causados pela detonação

A detonação é o inimigo número um da integridade mecânica do motor. Os danos incluem:

- **Erosão e perfuração de pistões** — as ondas de choque erodem a superfície do pistão, podendo perfurá-lo em questão de segundos sob detonação severa.
- **Quebra de anéis** — os anéis de pistão sofrem cargas cíclicas anormais e podem fraturar ou perder a vedação.
- **Falha de bielas** — os picos de pressão anormais sobrecarregam as bielas, podendo causar deformação ou fratura.
- **Danos ao cabeçote e válvulas** — as ondas de pressão danificam sedes de válvulas e a superfície da câmara de combustão.
- **Destruição de casquilhos** — as cargas de impacto são transmitidas ao virabrequim e destroem os casquilhos das bielas e mancais.
- **Falha catastrófica** — em casos extremos, a detonação severa pode destruir o motor inteiro em poucos ciclos de combustão, com biela atravessando o bloco.

A detonação em alta carga e alta rotação é especialmente perigosa porque o ruído do motor pode mascarar o som característico, tornando-a “silenciosa” para o calibrador desatento. **Utilize sempre sensor de knock e monitoramento via datalogger.**

6.1.5 *Borderline knock*

O *borderline knock* (ou KLSA — *Knock Limited Spark Advance*) é o ponto de avanço no qual a detonação começa a ocorrer de forma detectável. É o limite absoluto de avanço para uma dada condição de operação.

Na calibração, o avanço final nunca deve atingir o *borderline knock*. Sempre se aplica uma **margem de segurança** (tipicamente 2–4°) abaixo do *borderline*, para absorver variações de condição de operação:

- Variação na qualidade do combustível (octanagem real pode ser inferior à nominal).
- Variações de temperatura ambiente e do motor.
- Variações de carga e acelerações transitórias.
- Acúmulo de depósitos de carbono na câmara de combustão ao longo do tempo.
- Tolerâncias de fabricação entre cilindros.

! Margem de segurança obrigatória

Nunca calibre o avanço no limite do *borderline knock*. Aplique no mínimo 2° de margem em motores aspirados com combustível de alta octanagem, e no mínimo 3–4° em motores turbo ou com combustível de octanagem variável. Lembre-se: o combustível que você usou no dinamômetro pode ser diferente do que o usuário abastecerá no dia a dia.

6.1.6 Por que motores turbo precisam de menos avanço

Motores turboalimentados (ou com qualquer forma de sobrealimentação) operam com pressão de admissão significativamente superior à atmosférica. Essa maior pressão na câmara de combustão tem consequências diretas:

- **Maior densidade da mistura** — mais moléculas de ar e combustível comprimidas no cilindro, resultando em pressões de combustão proporcionalmente maiores.
- **Maior pressão e temperatura no final da compressão** — a mistura já entra comprimida no cilindro, e a compressão pelo pistão eleva a pressão e a temperatura a níveis muito superiores aos de um motor aspirado.
- **Maior tendência à detonação** — as condições de alta pressão e temperatura favorecem fortemente a autoignição espontânea da mistura (*end gas*), reduzindo dramaticamente a margem entre o avanço ideal e o *borderline knock*.
- **Velocidade de queima mais rápida** — a maior densidade e turbulência resultam em propagação mais rápida da frente de chama, exigindo menos antecipação da centelha.

Na prática, enquanto um motor aspirado de alta taxa de compressão pode operar com 30–38° de avanço em rotações intermediárias, um motor turbo com 1,5 bar de pressão de boost pode exigir apenas 10–18° nas mesmas rotações, sob carga plena.

! Boost e avanço são inversamente relacionados

À medida que a pressão de boost aumenta, o avanço de ignição seguro diminui. A tabela de avanço de um motor turbo deve refletir essa relação. Utilize o eixo de carga (MAP ou TPS) da tabela de avanço para mapear a redução de avanço com

o aumento da pressão de boost. Não cometa o erro de calibrar o avanço apenas em pressão atmosférica e depois ligar o turbo sem recalibrar.

6.1.7 Efeito da temperatura na detonação

A temperatura é um fator crítico na tendência à detonação:

- **Temperatura do ar de admissão (IAT)** — Ar mais quente é menos denso, mas entra na câmara de combustão com mais energia térmica. O resultado líquido é que ar quente aumenta a temperatura da mistura no final da compressão, favorecendo a detonação. Em dias quentes ou com intercooler ineficiente, é necessário **retirar avanço**.
- **Temperatura do líquido de arrefecimento (CLT)** — Um motor mais quente tem câmaras de combustão com paredes mais quentes, que transferem mais calor para a mistura durante a compressão. Motor superaquecido é sinônimo de detonação iminente. Da mesma forma, é necessário **retirar avanço** com CLT elevado.
- **Motor frio** — Com o motor frio, as paredes da câmara absorvem calor da mistura, reduzindo a temperatura no final da compressão. Além disso, a vaporização do combustível é pior, resultando em combustão mais lenta. Nesses casos, é comum **adicionar avanço** para compensar a queima mais lenta e melhorar a estabilidade do motor durante o aquecimento.

6.1.8 Wasted spark vs. ignição individual

Existem dois modos principais de disparo de ignição:

- **Ignição individual (*coil-on-plug* ou COP):** Cada cilindro possui sua própria bobina de ignição, e a centralina dispara cada bobina individualmente no momento exato. Este é o sistema mais preciso e eficiente, permitindo controle individual de dwell e avanço por cilindro. É o modo recomendado sempre que o hardware permitir.
- **Wasted spark (centelha perdida):** Uma única bobina atende dois cilindros que estão defasados em 360° de virabrequim (ou seja, quando um está no tempo de compressão, o outro está no tempo de escape). A centelha é disparada simultaneamente em ambos os cilindros — no cilindro em compressão, ela inicia a combustão normalmente; no cilindro em escape, a centelha é “desperdiçada” (daí o nome), pois não há mistura combustível a ser inflamada. Este sistema exige metade do número de bobinas e saídas de ignição, mas não permite ajustes individuais de dwell ou avanço entre os cilindros do par.

Quando usar *wasted spark*

O modo *wasted spark* é adequado para motores que utilizam bobinas duplas (uma bobina para cada par de cilindros), como muitos motores 4 cilindros originais dos anos 1990 e 2000. Se o motor utiliza bobinas individuais sobre a vela (*coil-on-plug*), use sempre o modo de ignição individual. O modo *wasted spark* também pode ser útil quando o número de saídas de ignição da centralina é inferior ao número de

cilindros — por exemplo, uma evoTech4 controlando um motor 4 cilindros com apenas 2 saídas de ignição disponíveis.

6.2 Configurações de Ignição

Esta subseção aborda as configurações fundamentais do sistema de ignição no MotroLink Manager, que devem ser definidas corretamente antes de se iniciar a construção da tabela de avanço.

6.2.1 Modo de ignição

O primeiro parâmetro a ser configurado é o **modo de disparo das bobinas**. As opções disponíveis são:

- **Individual (*Coil-on-Plug*)** — Cada cilindro possui sua própria bobina e saída dedicada na centralina. A centralina dispara cada bobina individualmente com base na posição angular do virabrequim e na ordem de ignição. Este é o modo mais preciso e flexível, permitindo ajustes individuais de dwell e avanço por cilindro (trim).
- **Wasted Spark** — A centralina dispara uma bobina que atende simultaneamente dois cilindros defasados em 360°. É necessário configurar corretamente os pares de cilindros. O número de saídas de ignição utilizadas é metade do número de cilindros.

! Compatibilidade hardware–modo

Certifique-se de que o modo de ignição selecionado é compatível com o hardware instalado. Se o motor possui bobinas individuais (*coil-on-plug*), o modo deve ser Individual. Se possui bobinas duplas (*wasted spark*), selecione *Wasted Spark*. Configurar o modo errado pode resultar em disparo de centelha no momento incorreto, causando falhas de combustão, contrafogo e potencial dano mecânico.

6.2.2 Mapeamento de pinos das bobinas

Após selecionar o modo de ignição, é necessário **atribuir cada bobina (ou par de bobinas) à saída física correspondente na centralina**. O MotroLink Manager apresenta uma lista de saídas de ignição disponíveis (IGN1, IGN2, IGN3, etc.) e o calibrador deve mapear cada uma ao cilindro correto.

A atribuição depende de:

- A **ordem de ignição** do motor (definida na seção de configuração do motor).
- A **fiação física** — qual pino do conector da centralina está conectado a qual bobina.
- O **modo de ignição** — no modo individual, cada saída corresponde a um cilindro; no modo *wasted spark*, cada saída corresponde a um par.

Verifique a atribuição com bench test

Antes de dar partida no motor, utilize a função de **bench test** do MotroLink Manager (descrita na Seção 18) para acionar cada saída de ignição individualmente e confirmar visualmente (ou com uma lâmpada de centelha) que cada bobina está disparando no cilindro correto. Uma atribuição incorreta pode causar disparo fora de ordem, com consequências graves: contrafogo no coletor de admissão, pós-queima no escapamento e possível dano mecânico.

6.2.3 Offset por cilindro (ângulo de referência)

Em alguns motores, especialmente aqueles com configurações em V, boxer ou com irregularidades no espaçamento angular dos cilindros, pode ser necessário configurar um **offset angular por cilindro**. Este offset define a defasagem de cada cilindro em relação à posição de referência do virabrequim.

Na maioria dos motores em linha com espaçamento regular (4 cilindros em linha, por exemplo, com espaçamento de 180°), os offsets são calculados automaticamente pela centralina com base na ordem de ignição e no número de cilindros. Motores com espaçamentos irregulares (como V6 com ângulo de 60° e virabrequim de pino compartilhado, ou motores flat-plane vs. cross-plane) exigem configuração manual.

Motores em linha com espaçamento regular

Para motores 4 cilindros em linha com ordem de ignição 1-3-4-2 ou 1-2-4-3, e motores 6 em linha com espaçamento uniforme de 120°, os offsets padrão são calculados automaticamente. Verifique apenas se a ordem de ignição configurada corresponde ao motor real.

6.3 Tabela de Avanço

A **tabela de avanço de ignição** é, sem exagero, o parâmetro mais crítico de toda a calibração do motor. É esta tabela que define, para cada combinação de rotação (RPM) e carga (MAP ou TPS), quantos graus antes do PMS a centelha será disparada.

Uma tabela de avanço bem calibrada extrai o máximo de torque e potência do motor com segurança. Uma tabela mal calibrada pode, no melhor cenário, desperdiçar potência e aumentar o consumo; no pior cenário, destruir o motor.

Parâmetro mais perigoso da calibração

A tabela de avanço é o parâmetro com maior potencial de dano ao motor. Cada grau de avanço a mais em alta carga pode ser a diferença entre operação segura e detonação destrutiva. Trate cada célula desta tabela com o máximo respeito e rigor técnico. **Nunca copie tabelas de avanço de outros motores ou da internet sem validação completa no seu motor específico** — cada motor, com sua taxa de compressão, câmara de combustão, combustível e condições de operação, tem limites próprios.

6.3.1 Estrutura da tabela: RPM × Carga

A tabela de avanço é uma **tabela tridimensional (3D)**, onde:

- **Eixo horizontal (X):** Rotação do motor em RPM. Tipicamente de 500 a 8000+ RPM, dependendo do motor.
- **Eixo vertical (Y):** Carga do motor, expressa em pressão absoluta do coletor (MAP em kPa) ou posição da borboleta (TPS em %). A escolha entre MAP e TPS depende do tipo de motor e da estratégia de carga adotada.
- **Valores das células (Z):** Ângulo de avanço de ignição em graus antes do PMS (BTDC).

Cada célula da tabela contém o valor de avanço base que será utilizado como ponto de partida. A este valor, as diversas correções (temperatura, knock, blend, trim) são somadas ou subtraídas para calcular o avanço final aplicado.



Tabela de avanço de ignição no MotroLink Manager — visualização 2D (RPM × carga).

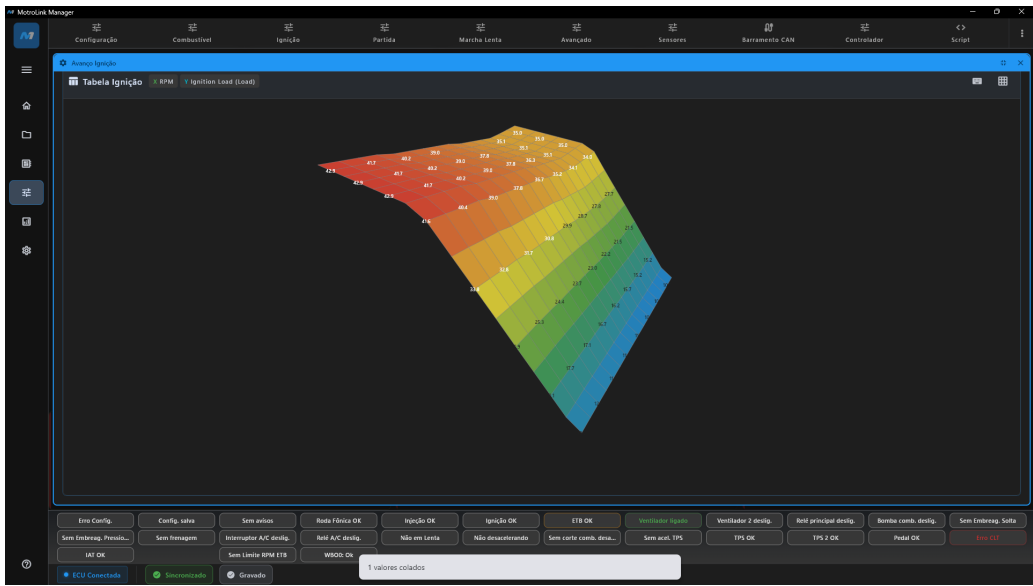


Tabela de avanço de ignição — visualização 3D. Observe a forma típica: avanço maior em cargas parciais e menores em carga plena.

6.3.2 Conceitos fundamentais da tabela

A tabela de avanço deve refletir os seguintes princípios:

- **Cargas baixas (vácuo alto, MAP baixo):** A mistura é mais rarefeita, a velocidade de queima é mais lenta, e a tendência à detonação é baixa. Por isso, regiões de carga parcial geralmente exigem **mais avanço** (30–45° ou mais em aspirados) para otimizar o torque e a eficiência.
- **Cargas altas (MAP próximo à atmosférica ou acima):** A mistura é densa, a velocidade de queima é rápida, e a tendência à detonação é alta. O avanço deve ser **reduzido significativamente** (15–25° em aspirados, 5–18° em turbos) para manter a operação dentro dos limites de detonação.
- **Rotações baixas:** O tempo disponível para a combustão é maior (mais milissegundos por ciclo), mas a turbulência no cilindro é menor. Geralmente exige-se avanço intermediário.
- **Rotações altas:** O tempo disponível é menor, mas a turbulência é maior (queima mais rápida). O avanço tende a se manter estável ou aumentar ligeiramente nas altas rotações em relação às intermediárias.

6.3.3 Forma típica da superfície de avanço

Uma tabela de avanço bem calibrada apresenta uma superfície suave e contínua, sem descontinuidades abruptas entre células vizinhas. A forma típica é:

- Uma “crista” de avanço alto na região de carga parcial e rotações intermediárias.
- Uma “descida” progressiva em direção à carga plena (linhas inferiores no caso de MAP como carga), onde o avanço é menor.

- Transições suaves — variações abruptas entre células vizinhas (por exemplo, 35° em uma célula e 20° na adjacente) indicam erro de calibração e causam instabilidade no funcionamento do motor.



Suavidade da tabela

Após calibrar a tabela de avanço, verifique a superfície 3D no MotroLink Manager. Procure por “picos” ou “vales” abruptos. Use a função de suavização (*smooth*) para eliminar descontinuidades. Uma superfície irregular causa variações bruscas de torque que o motorista percebe como engasgos, trancos e instabilidade.

6.3.4 Metodologia de calibração da tabela de avanço

A construção da tabela de avanço deve seguir uma metodologia rigorosa e progressiva. O procedimento recomendado é:

Passo 1 — Tabela inicial conservadora

Comece com uma tabela de avanço **conservadora**, com valores deliberadamente baixos em toda a faixa de operação. Valores iniciais sugeridos:

- Cargas parciais (aspiração natural): 20–25° como ponto de partida.
- Carga plena (aspirado): 15–20°.
- Carga plena (turbo, 1 bar de boost): 8–12°.
- Carga plena (turbo, 1,5+ bar de boost): 5–8°.



Comece conservador, avance progressivamente

É infinitamente melhor começar com avanço insuficiente (motor produz menos potência, mas está seguro) do que começar com avanço excessivo (motor pode detonar e sofrer dano irreversível). A potência “perdida” por avanço conservador é recuperada nos passos seguintes. Um motor danificado por detonação não é recuperado.

Passo 2 — Avanço progressivo com monitoramento de detonação

Com o motor em dinamômetro e todos os canais de monitoramento ativos (knock, AFR, EGT, temperaturas), avance progressivamente a ignição:

1. Selecione uma faixa de rotação e carga para trabalhar (por exemplo, 3000 RPM em carga plena).
2. Estabilize o motor nessa condição.
3. Avance a ignição em incrementos de 1° (máximo 2° por vez).
4. A cada incremento, observe:
 - O torque no dinamômetro — está aumentando?
 - O sinal do sensor de knock — há indicação de detonação?
 - O som do motor — há batida metálica audível?
 - A temperatura dos gases de escapamento — está subindo ou caindo?

5. Continue avançando até que:
 - O torque pare de subir (atingiu o MBT), ou
 - O sensor de knock detecte detonação (atingiu o *borderline knock*).
6. Registre o valor de avanço no qual ocorreu o limite.
7. Aplique a **margem de segurança**: subtraia 2–4° do limite encontrado.
8. Repita para todas as combinações de RPM e carga relevantes.

Passo 3 — Validação com datalogger

Após preencher toda a tabela, realize passagens completas em dinamômetro (varreduras de RPM em carga plena e parcial) enquanto grava o datalogger. Analise:

- Canal de knock — nenhum evento de detonação deve aparecer durante operação normal.
- Avanço final efetivo — verifique que as correções (CLT, IAT, knock retard) não estão atuando excessivamente, o que indicaria que a tabela base está próxima demais do limite.
- Temperaturas — CLT e EGT dentro dos limites seguros.
- Suavidade do torque — a curva de torque deve ser suave, sem saltos ou quedas abruptas entre as células da tabela.

Nunca avance a ignição sem monitoramento

Avançar a ignição “no ouvido” ou sem sensor de knock e dinamômetro é uma prática extremamente perigosa. A detonação em alta carga e alta rotação pode ser imperceptível ao ouvido humano, mascarada pelo ruído mecânico do motor e do escapamento. Quando a detonação se torna audível nessas condições, o dano já pode estar em andamento. **Utilize sempre sensor de knock, datalogger e, preferencialmente, dinamômetro com medição de torque.**

6.4 Correção por CLT (Temperatura do Líquido de Arrefecimento)

A tabela de avanço base é calibrada para uma condição específica de temperatura do motor (tipicamente com o motor na temperatura normal de operação, 85–95°C). Quando a temperatura do líquido de arrefecimento (CLT) se desvia dessa condição, é necessário aplicar uma **correção ao avanço de ignição**.

6.4.1 Estrutura da tabela de correção CLT

A correção por CLT é definida em uma tabela bidimensional com os eixos:

- **Eixo X:** Temperatura do líquido de arrefecimento (CLT) em °C.
- **Eixo Y:** Carga do motor (MAP em kPa ou TPS em %).

- **Valores das células:** Correção de avanço em graus. Valores positivos adicionam avanço; valores negativos retiram avanço.

O valor de correção é **somado** ao avanço base da tabela principal para calcular o avanço final.

6.4.2 Lógica de correção

- **Motor frio (CLT abaixo de 60–70°C):** As paredes da câmara de combustão estão frias e absorvem calor da mistura. A vaporização do combustível é incompleta e a velocidade de queima é mais lenta. Para compensar, **adiciona-se avanço** (valores positivos na tabela), tipicamente +3° a +8° dependendo da temperatura e do motor.
- **Motor na temperatura normal de operação (80–95°C):** A correção deve ser **zero** ou próxima de zero nesta faixa, pois a tabela base foi calibrada para esta condição.
- **Motor superaquecido (CLT acima de 100–105°C):** As paredes da câmara estão excessivamente quentes, transferindo calor adicional para a mistura e aumentando drasticamente a tendência à detonação. **Retira-se avanço** (valores negativos), tipicamente –3° a –8° dependendo da gravidade do superaquecimento.

! Proteção contra superaquecimento

A correção de avanço por CLT elevado é uma camada de proteção importante contra detonação em condições de superaquecimento. Configure valores agressivos de retardo (por exemplo, –5° a –10°) para temperaturas acima de 110°C. Lembre-se: se o motor está nessa faixa de temperatura, algo já está errado (ventoinha, radiador, nível de líquido), e a prioridade é proteger o motor até que o problema seja resolvido.

⚠ Não compense calibração ruim com correção de CLT

Se o motor apresenta tendência à detonação na temperatura normal de operação (85–95°C), o problema está na tabela de avanço base ou na mistura, e não na correção de CLT. Corrija a causa raiz primeiro. A correção de CLT existe para compensar desvios *normais* de temperatura, não para mascarar uma calibração agressiva demais.

6.4.3 Valores típicos de correção CLT

Faixa de CLT	Correção típica
Abaixo de 20°C	+5° a +8°
20–40°C	+3° a +5°
40–60°C	+1° a +3°
60–80°C	0° a +1°
80–95°C	0° (referência)
95–105°C	–1° a –3°
105–115°C	–3° a –6°
Acima de 115°C	–6° a –10°

i Valores são ponto de partida

Os valores acima são referências genéricas. Cada motor tem comportamento térmico diferente. Motores com câmaras de combustão mais quentes (altas taxas de compressão, câmaras abertas) podem exigir correções mais agressivas. Valide sempre com o sensor de knock ativo.

6.5 Correção por IAT (Temperatura do Ar de Admissão)

A temperatura do ar de admissão (IAT — *Intake Air Temperature*) influencia diretamente a tendência à detonação. Ar mais quente resulta em temperatura mais elevada no final da compressão, aproximando a mistura das condições de autoignição. A correção por IAT atua para proteger o motor em condições de ar quente.

6.5.1 Estrutura da tabela de correção IAT

A correção por IAT é definida de forma análoga à correção por CLT:

- **Eixo X:** Temperatura do ar de admissão (IAT) em °C.
- **Eixo Y:** Carga do motor (MAP em kPa ou TPS em %).
- **Valores das células:** Correção de avanço em graus. Tipicamente valores negativos (retardo) para temperaturas acima da referência.

6.5.2 Lógica de correção

- **Ar frio (IAT abaixo de 20–25°C):** A mistura entra mais fria no cilindro, reduzindo a tendência à detonação. Pode-se manter a correção em 0° ou adicionar um pequeno avanço (+1° a +2°), embora muitos calibradores prefiram não adicionar avanço com ar frio (a tabela base já deve cobrir esse cenário).
- **Ar na temperatura de referência (25–35°C):** Correção zero — esta é a condição para a qual a tabela base foi calibrada.
- **Ar quente (IAT acima de 40°C):** Retirar avanço progressivamente. Quanto mais quente o ar, maior a correção negativa.

- **Ar muito quente (IAT acima de 60°C):** Situação comum em motores turbo com intercooler subdimensionado ou em dias muito quentes. Retirar avanço agressivamente (−3° a −8° ou mais).

! IAT é especialmente crítico em motores turbo

Em motores turbo, o ar de admissão pode atingir 60–80°C ou mais após a compressão pelo turbo, mesmo com intercooler. A correção por IAT é a principal defesa contra detonação por ar quente em aplicações turbo. Configure valores de retardo agressivos para IAT alto. Um motor turbo com intercooler ineficiente e sem correção de IAT adequada é uma bomba-relógio.

6.5.3 Valores típicos de correção IAT

Faixa de IAT	Correção típica
Abaixo de 20°C	0° a +1°
20–35°C	0° (referência)
35–45°C	−1° a −2°
45–55°C	−2° a −4°
55–65°C	−4° a −6°
65–80°C	−6° a −10°
Acima de 80°C	−10° ou mais

! Cuidado com a dependência de carga

O efeito da temperatura do ar sobre a detonação é mais pronunciado em cargas altas. Considere utilizar a dimensão de carga da tabela de correção para aplicar retardo mais agressivo em carga plena do que em carga parcial. Em carga parcial com borboleta pouco aberta, o ar quente tem menos impacto porque a carga geral no cilindro é menor.

6.6 Dwell (Tempo de Carga da Bobina)

O **dwell** (ou tempo de carga) é o intervalo de tempo, em milissegundos, durante o qual a centralina mantém a corrente fluindo pelo circuito primário da bobina de ignição antes de interrompê-la para gerar a centelha. O dwell determina a quantidade de energia armazenada na bobina e, conseqüentemente, a intensidade da centelha.

6.6.1 Importância do dwell correto

- **Dwell insuficiente:** A bobina não carrega completamente. A centelha resultante é fraca, com menor energia e menor duração. Em condições adversas (mistura rica, alta pressão no cilindro, gap de vela amplo), uma centelha fraca pode não ser capaz de inflamar a mistura, causando falhas de ignição (*misfires*).
- **Dwell excessivo:** A bobina atinge sua carga máxima antes do momento do disparo e a corrente continua fluindo desnecessariamente. O excesso de corrente é dissipado

como calor no enrolamento primário e no módulo de potência (driver). Isso causa **superaquecimento da bobina**, podendo danificá-la permanentemente, além de sobrecarregar a saída de ignição da centralina.

- **Dwell correto:** A bobina atinge a carga máxima especificada pelo fabricante com uma pequena margem de segurança, garantindo centelha consistente e forte sem desperdício de energia ou superaquecimento.

Dwell excessivo destrói bobinas e pode danificar a centralina

Nunca configure um dwell significativamente acima do especificado pelo fabricante da bobina. Bobinas modernas (*smart coils* e *coil-on-plug*) são projetadas para tempos de carga específicos (tipicamente 2,0–4,0 ms). Valores muito acima disso (por exemplo, 6–8 ms) causam superaquecimento interno, degradação do isolamento do enrolamento e falha prematura. Em casos extremos, a sobrecarga pode danificar a saída de ignição da própria centralina evoTech. Consulte **sempre** o datasheet da bobina.

6.6.2 Curva de dwell base por RPM

O dwell base é definido como uma **curva 2D** em função da rotação do motor:

- **Eixo X:** Rotação do motor em RPM.
- **Eixo Y:** Tempo de dwell em milissegundos.

Na maioria dos casos, o dwell é **constante** ou ligeiramente decrescente ao longo da faixa de RPM. Em rotações muito altas, o tempo disponível entre os eventos de ignição é menor, e pode ser necessário reduzir ligeiramente o dwell para garantir que a bobina tenha tempo de se recuperar (descarregar e recarregar) entre disparos consecutivos.

Dwell constante na maioria dos casos

Para a maioria das bobinas modernas e motores de até 8000 RPM, um dwell constante (por exemplo, 3,0 ms em toda a faixa de RPM) é adequado. A redução de dwell em alta rotação só é necessária em motores de altíssima rotação (acima de 10.000 RPM) ou com bobinas de carga lenta.

6.6.3 Correção de dwell por tensão de bateria

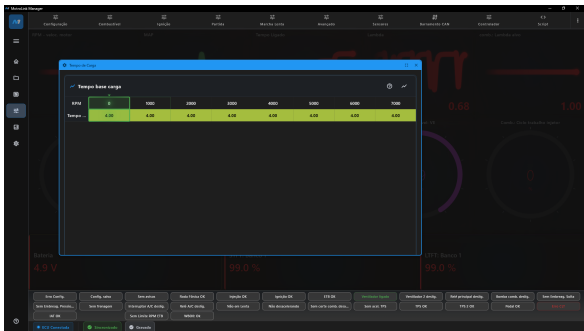
A velocidade de carregamento da bobina depende diretamente da tensão disponível no circuito primário. Quando a tensão da bateria cai (por exemplo, durante a partida com o motor de arranque acionado, ou com alternador fraco), a bobina leva mais tempo para atingir a carga completa.

A **tabela de correção de dwell por tensão** compensa esse efeito:

- **Eixo X:** Tensão da bateria em volts.
- **Eixo Y:** Fator multiplicador aplicado sobre o dwell base.

Tipicamente:

- Em **14,0 V** (tensão normal com alternador carregando): multiplicador 1,00 (dwell nominal).
- Em **12,0 V** (bateria sem alternador): multiplicador 1,10–1,15.
- Em **10,0 V** (partida, bateria fraca): multiplicador 1,25–1,40.
- Em **8,0 V** (bateria muito fraca): multiplicador 1,50–1,80.



Curva de dwell base por RPM.

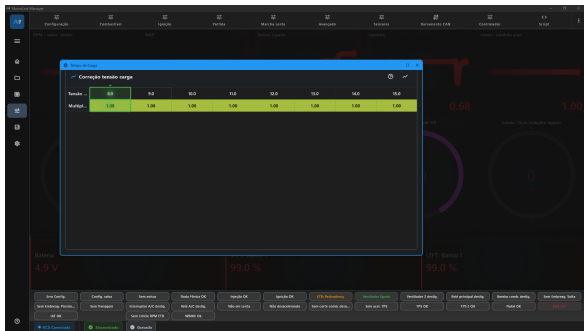


Tabela de correção de dwell por tensão de bateria.

Configuração de dwell no MotroLink Manager : curva base (esquerda) e correção por tensão (direita).

6.6.4 Dwell máximo (proteção)

O MotroLink Manager permite configurar um **dwell máximo** como limite de segurança. Independentemente do que a curva base e a correção por tensão calculem, o dwell efetivo nunca excederá este valor.

Este parâmetro é uma proteção contra:

- Erros de configuração na curva de dwell base.
- Leituras errôneas de tensão de bateria que causariam cálculo de dwell excessivo.
- Condições anormais de operação.

O valor de dwell máximo deve ser configurado conforme a especificação da bobina. Um valor típico para bobinas modernas do tipo *coil-on-plug* é de 4,0–5,0 ms. Para bobinas mais antigas ou de centelha perdida, pode ser necessário permitir até 6,0 ms.

❗ Consulte o fabricante da bobina

O dwell correto (base e máximo) deve ser obtido no datasheet ou nas especificações técnicas do fabricante da bobina. Se essas informações não estiverem disponíveis, inicie com valores conservadores (2,5–3,0 ms) e aumente gradualmente, monitorando a temperatura da bobina e a qualidade da centelha. Fabricantes renomados como Bosch, Denso, Delphi e NGK/NTK publicam especificações detalhadas de dwell para cada modelo de bobina.

6.7 Multi-Centelha (*Multi-Spark*)

O recurso de **multi-centelha** permite que a centralina dispare múltiplas centelhas em sequência rápida durante um único evento de ignição. Em vez de uma única centelha, a bobina é carregada e disparada várias vezes em rápida sucessão, aumentando a probabilidade de inflamação da mistura.

6.7.1 Quando usar multi-centelha

A multi-centelha é útil em situações onde a inflamação da mistura é difícil:

- **Partida a frio:** Com o motor frio, a vaporização do combustível é precária e a mistura pode estar mal homogeneizada. Múltiplas centelhas aumentam a chance de ignição bem-sucedida, reduzindo o tempo de partida e o número de tentativas.
- **Marcha lenta instável:** Em baixas rotações e carga muito baixa, a quantidade de mistura no cilindro é pequena e a turbulência é mínima. A centelha pode “falhar” com mais frequência. Multi-centelha melhora a estabilidade de combustão nessa condição.
- **Mistura muito pobre ou muito rica:** Em condições de mistura fora da estequiometria, a velocidade de queima é mais lenta e a ignição é mais difícil. Multi-centelha pode compensar parcialmente.
- **Velas de ignição desgastadas:** Com o gap ampliado pelo desgaste, a tensão necessária para romper a centelha aumenta. Múltiplas tentativas compensam eventuais falhas de centelhamento.

6.7.2 Configuração no MotroLink Manager

Os parâmetros de configuração de multi-centelha são:

- **Habilitação:** Ativa ou desativa o recurso de multi-centelha.
- **RPM máximo:** A rotação acima da qual a multi-centelha é automaticamente desativada. Em rotações altas, o tempo disponível entre os eventos de ignição é insuficiente para múltiplas cargas e disparos da bobina. Valores típicos: 1500–3000 RPM.
- **Dwell de cada centelha:** O tempo de carga da bobina para cada centelha individual no trem de centelhas. Geralmente menor que o dwell normal (por exemplo, 1,0–2,0 ms por centelha), pois a bobina não precisa atingir carga máxima em cada disparo.
- **Gap entre centelhas:** O intervalo de tempo entre o fim de uma centelha e o início da carga para a próxima, em milissegundos. Tipicamente 0,5–1,5 ms.

O número total de centelhas por evento é calculado automaticamente pela centralina com base no tempo disponível (determinado pela rotação do motor) e nos valores de dwell e gap configurados. Em baixas rotações, mais centelhas cabem na janela disponível; à medida que a rotação sobe, o número diminui até que, no RPM máximo configurado, o recurso é desativado.

⚠ Multi-centelha não substitui calibração correta

Não utilize multi-centelha como “muleta” para compensar uma calibração de combustível ou ignição deficiente. Se o motor apresenta falhas de combustão (*misfires*) em condições normais de operação (motor quente, marcha lenta estável), investigue a causa raiz: mistura incorreta, velas inadequadas, bobinas defeituosas, compressão insuficiente. Multi-centelha é uma ferramenta para melhorar condições de contorno difíceis, não para mascarar problemas.

ℹ Vida útil da bobina e multi-centelha

A multi-centelha aumenta o número de ciclos de carga e descarga por evento de ignição, o que pode reduzir a vida útil das bobinas se utilizada continuamente em regimes prolongados. Em aplicações de uso diário (*street*), limite o uso de multi-centelha às rotações de partida e marcha lenta. Em aplicações de competição, a vida útil das bobinas é menos prioritária.

6.8 Controle de Detonação (*Knock Control*)

O sistema de **controle de detonação** (knock control) é um mecanismo de proteção ativo que monitora a ocorrência de detonação em tempo real, através de um sensor de vibração (sensor de knock), e retira avanço automaticamente quando detonação é detectada. É a última linha de defesa entre o avanço calibrado e a destruição do motor.

⚡ O controle de knock não substitui calibração correta

O sistema de controle de knock é uma **rede de segurança**, não uma estratégia de calibração. Seu objetivo é proteger o motor contra eventos esporádicos e imprevisíveis de detonação (combustível de qualidade inferior, dia excepcionalmente quente, falha momentânea de intercooler). Se o sistema de knock está constantemente retirando avanço durante a operação normal, isso indica que a **tabela de avanço base está agressiva demais** e deve ser corrigida. Operar permanentemente no limite, “confiando” no knock control para salvar o motor, é uma prática perigosa e inaceitável. Sensores falham. Algoritmos têm limitações. Calibre a tabela base com margem e use o knock control como segurança adicional, nunca como substituto.

6.8.1 Habilitação e sensibilidade

O controle de detonação deve ser habilitado sempre que houver um sensor de knock funcional instalado no motor. Os parâmetros principais são:

- **Habilitação:** Ativa o sistema de knock control. Quando desabilitado, nenhum retardo automático será aplicado, independentemente do que o sensor detectar.
- **Sensibilidade:** Ajusta o limiar de detecção. Uma sensibilidade alta detecta eventos menores de detonação (mais proteção, mas maior chance de falsos positivos); uma sensibilidade baixa só detecta eventos fortes (menos falsos positivos, mas menos proteção).

Falsos positivos e negativos

Ajustar a sensibilidade do knock control é um equilíbrio delicado. Sensibilidade excessiva causa retardo desnecessário de avanço (perda de potência) por interpretar vibrações mecânicas normais como detonação. Sensibilidade insuficiente permite que eventos reais de detonação passem despercebidos. O ajuste ideal é feito em dinamômetro, comparando a resposta do sensor com detonação real induzida (avanzando além do borderline em condição controlada e breve).

6.8.2 Curva de threshold por RPM

O **threshold** (limiar) de detecção de knock define o nível de sinal do sensor acima do qual a centralina interpreta como detonação. Este limiar varia com a rotação do motor:

- Em **rotações baixas**, o ruído mecânico de base é menor, permitindo um threshold mais baixo (maior sensibilidade).
- Em **rotações altas**, o ruído mecânico de base aumenta significativamente (válvulas, corrente de comando, injetores, acessórios), exigindo um threshold mais alto para evitar falsos positivos.

A curva de threshold por RPM é uma tabela 2D (RPM × nível de threshold) que deve ser calibrada com base no nível de ruído de base do motor específico. O procedimento recomendado é:

1. Registrar o datalogger com o canal de knock em condições onde se tem certeza de que não há detonação (avanço conservador).
2. Analisar o nível de sinal do sensor de knock em toda a faixa de RPM.
3. Configurar o threshold com uma margem acima do nível de ruído de base (tipicamente 1,5–2,5× o nível de ruído) para cada faixa de RPM.

6.8.3 Tabela de retardo máximo por knock

Quando detonação é detectada, a centralina retira avanço automaticamente. A **tabela de retardo máximo por knock** define o limite de avanço que pode ser retirado para cada condição de operação:

- **Eixo X:** Rotação do motor em RPM.
- **Valores:** Máximo retardo em graus que o sistema pode aplicar.

Valores típicos de retardo máximo são 5–15°. O valor deve ser suficiente para eliminar a detonação, mas não tão alto a ponto de causar problemas de operação (perda excessiva de potência, aumento perigoso de EGT por atraso excessivo).

O retardo é aplicado **incrementalmente**: a cada evento de detonação detectado, a centralina retira uma **porcentagem** do avanço atual (configurada pelo parâmetro *knock retard aggression*, tipicamente 5–20%). Por exemplo, com agressividade de 10% e avanço atual de 30°, cada evento retira 3°. Quando a detonação cessa, o avanço é gradualmente restaurado ao valor original da tabela base, a uma taxa configurável.

6.8.4 Janela de detecção (ângulo de amostragem)

O sensor de knock gera sinal continuamente, mas nem toda vibração é detonação. A detonação ocorre em uma **janela angular específica** do ciclo do motor — tipicamente entre 10° e 70° após o PMS, dependendo do motor e das condições de operação.

O MotroLink Manager permite configurar a **janela de amostragem** (*knock window*):

- **Ângulo de início:** O ângulo de virabrequim (ATDC) no qual a centralina começa a amostrar o sinal do sensor de knock. Valor típico: 5–15° ATDC.
- **Ângulo de fim:** O ângulo no qual a amostragem termina. Valor típico: 60–80° ATDC.

Sinais detectados fora desta janela são ignorados, o que reduz drasticamente os falsos positivos causados por ruídos mecânicos que ocorrem em outros momentos do ciclo (como fechamento de válvulas ou acionamento de injetores).

Ajuste fino da janela de knock

A janela de detecção ideal depende do motor. Motores com câmaras de combustão grandes (cilindros de grande diâmetro) tendem a ter detonação mais tardia no ciclo. Motores com câmaras compactas apresentam detonação mais cedo. Se disponível, utilize análise de espectro do sinal de knock para determinar com precisão quando a detonação ocorre no motor específico.

6.8.5 Frequência do sensor de knock

Sensores de knock piezoelétricos são projetados para serem sensíveis a uma frequência característica, que corresponde à frequência de ressonância da câmara de combustão durante a detonação. Essa frequência depende do **diâmetro do cilindro (bore)**:

- Cilindros de bore grande (90+ mm): frequência mais baixa (tipicamente 5–7 kHz).
- Cilindros de bore médio (75–90 mm): frequência intermediária (6–9 kHz).
- Cilindros de bore pequeno (abaixo de 75 mm): frequência mais alta (8–12 kHz).

Uma fórmula aproximada é:

$$f_{knock} \approx \frac{900.000}{D}$$

onde D é o diâmetro do cilindro em milímetros e f_{knock} é a frequência em Hz.

O MotroLink Manager permite configurar a **frequência central** do filtro passa-banda aplicado ao sinal do sensor de knock. Configure este valor de acordo com o bore do motor para maximizar a sensibilidade à detonação real e minimizar a interferência de ruídos em outras frequências.

Frequência errada anula a proteção

Se a frequência do filtro de knock estiver configurada muito distante da frequência real de detonação do motor, o sistema será incapaz de detectar detonação. Isso

equivale a não ter controle de knock algum. Calcule a frequência com base no bore do motor e, se possível, valide com análise de espectro em dinamômetro.

6.9 Tabelas de *Blend* de Ignição (*Ignition Blend Tables*)

As **tabelas de blend de ignição** permitem adicionar ou subtrair avanço com base em variáveis auxiliares, complementando a tabela de avanço base e as correções fixas de CLT e IAT. São tabelas adicionais de correção cujos eixos podem ser configurados livremente pelo calibrador.

6.9.1 Conceito e estrutura

Cada tabela de blend é uma tabela 2D ou 3D que:

- Utiliza **eixos configuráveis** — o calibrador escolhe quais variáveis serão os eixos X e Y (RPM, MAP, TPS, velocidade do veículo, marcha, teor de etanol, pressão de óleo, qualquer canal disponível).
- Contém valores de **correção aditiva** em graus de avanço (positivos adicionam, negativos retiram).
- Possui uma **curva de bias** que determina o peso (0–100%) da contribuição da tabela de blend no avanço final, geralmente em função de uma variável selecionável.

O avanço final é calculado como:

$$\theta_{final} = \theta_{base} + \theta_{CLT} + \theta_{IAT} + (\theta_{blend1} \times bias_1) + (\theta_{blend2} \times bias_2) + \theta_{trim} - \theta_{knock}$$

6.9.2 Aplicações típicas

Correção por marcha (velocidade vs. carga):

Em veículos com transmissão manual, a marcha engrenada afeta a taxa de aceleração do motor e o tempo de permanência em cada célula da tabela de avanço. Em marchas baixas (1ª, 2ª), o motor acelera rapidamente e passa menos tempo em cada célula, o que pode mascarar detonação. Uma tabela de blend pode retirar 1–3° de avanço nas marchas mais baixas como medida de segurança.

Correção por teor de etanol (flex fuel):

O etanol tem octanagem significativamente superior à gasolina (RON 108–130 vs. RON 87–98). Motores flex-fuel podem se beneficiar de avanço adicional proporcionalmente ao teor de etanol na mistura. Uma tabela de blend com eixo X = teor de etanol e valores positivos de avanço (por exemplo, +3° a +8° com etanol puro) permite explorar a octanagem superior do etanol.

i Blend de etanol e potência

A adição de avanço com etanol é uma das formas mais eficazes de extrair potência adicional em motores flex-fuel. O etanol permite operar com avanço mais próximo do MBT em condições onde a gasolina já estaria no limite de detonação. A tabela de blend é a ferramenta ideal para implementar essa estratégia sem modificar a

tabela de avanço base.

Correção por pressão barométrica (altitude):

Em altitudes elevadas, a pressão atmosférica é menor, reduzindo a densidade do ar e a carga efetiva no cilindro. Uma tabela de blend pode adicionar um pequeno avanço em altitudes elevadas para compensar a queima mais lenta.

Outras aplicações:

- Correção por pressão de óleo (retirar avanço se a pressão de óleo estiver baixa, indicando problema mecânico).
- Correção por temperatura de óleo.
- Correção por velocidade do veículo (segurança em limitadores de velocidade).

6.9.3 Curva de bias

A **curva de bias** é uma curva 2D que multiplica o valor da tabela de blend por um fator de 0% a 100%. Ela permite controlar *quando* e *quanto* a tabela de blend contribui para o avanço final.

Por exemplo, em uma tabela de blend para correção por etanol:

- A curva de bias pode ter o eixo X = teor de etanol (%).
- Bias = 0% quando o teor de etanol é 0% (gasolina pura — a tabela de blend não contribui).
- Bias = 100% quando o teor de etanol é 100% (etanol puro — a tabela de blend contribui integralmente).
- Interpolação linear entre os extremos para misturas intermediárias.



Cuidado com a soma de correções

Lembre-se de que todas as correções (CLT, IAT, blend, trim) são somadas ao avanço base. Se múltiplas correções estiverem adicionando avanço simultaneamente (por exemplo, ar frio + motor frio + etanol puro), o avanço final pode exceder significativamente o valor da tabela base. Monitore sempre o avanço final efetivo no datalogger e certifique-se de que, na pior combinação de condições, o avanço total ainda esteja dentro dos limites seguros.

6.10 Trim por Cilindro

O **trim de ignição por cilindro** permite aplicar uma correção individual de avanço para cada cilindro, somada ao avanço base já calculado (tabela principal + correções). Este recurso possibilita equalizar diferenças entre cilindros que compartilham a mesma tabela de avanço, mas possuem características ligeiramente diferentes.

6.10.1 Estrutura do trim por cilindro

O trim é definido como uma **tabela 2D por cilindro**, com:

- **Eixo X:** Rotação do motor em RPM (ou carga, dependendo da configuração).
- **Valores:** Correção em graus para o cilindro específico. Valores positivos adicionam avanço; negativos retiram.

Cada cilindro possui sua própria tabela de trim. O avanço final para o cilindro n é:

$$\theta_{final,n} = \theta_{base} + \theta_{CLT} + \theta_{IAT} + \theta_{blend} + \theta_{trim,n} - \theta_{knock}$$

6.10.2 Quando usar trim por cilindro

Equalização de temperaturas de escape (EGT):

Em motores com múltiplos cilindros, é comum que as temperaturas dos gases de escapamento variem entre cilindros, mesmo com mistura uniforme. Diferenças de avanço entre cilindros podem ser a causa. Se um cilindro apresenta EGT consistentemente mais alta que os demais, retirar 1–2° de avanço desse cilindro pode equalizar as temperaturas.

Compensação de diferenças de câmara de combustão:

Tolerâncias de fabricação, diferenças no acabamento superficial das câmaras, depósitos de carbono irregulares e variações de volume de câmara podem resultar em diferenças na velocidade de queima e na tendência à detonação entre cilindros. O trim permite compensar essas diferenças individualmente.

Compensação de resfriamento desigual:

Em motores com sistema de arrefecimento mal distribuído (comum em blocos longos de 6 ou mais cilindros), os cilindros da extremidade oposta à entrada de água tendem a operar mais quentes. Retirar avanço nesses cilindros protege contra detonação localizada.

Deteção de detonação por cilindro:

Se o sistema de knock control identificar que um cilindro específico é consistentemente mais propenso à detonação, o trim permite retirar avanço permanentemente desse cilindro, em vez de penalizar todos os cilindros com uma tabela base mais conservadora.



Trim requer modo de ignição individual

O trim por cilindro só está disponível no modo de ignição **individual** (*coil-on-plug*). No modo *wasted spark*, como cada saída de ignição atende dois cilindros simultaneamente, não é possível aplicar correções independentes. Se o seu motor utiliza *wasted spark* e necessita de correção por cilindro, considere converter para ignição individual.

6.10.3 Valores típicos de trim

Na maioria dos motores bem montados e em bom estado, os trims por cilindro são **pequenos** — tipicamente $\pm 1^\circ$ a $\pm 3^\circ$. Trims maiores que $\pm 5^\circ$ indicam que há uma diferença significativa entre cilindros que deveria ser investigada mecanicamente (diferença de compressão, vazamento, injetor com vazão divergente, problema de arrefecimento).

! Trim grande indica problema mecânico

Se for necessário aplicar trim de avanço superior a $\pm 5^\circ$ em algum cilindro para equalizar EGT ou eliminar detonação localizada, investigue a causa mecânica antes de aceitar o trim como solução. Diferenças tão grandes entre cilindros frequentemente indicam: compressão baixa (anel ou válvula), junta de cabeçote comprometida, injetor com vazão diferente, problema de arrefecimento localizado ou depósitos excessivos de carbono. Corrija o problema mecânico e refaça a calibração.

7 Partida do Motor

A partida de um motor de combustão interna é, do ponto de vista da calibração, um dos momentos mais desafiadores de todo o ciclo de operação. Durante os primeiros instantes — desde o acionamento do motor de arranque até a estabilização em marcha lenta — as condições são radicalmente diferentes daquelas encontradas em regime permanente. O combustível precisa ser entregue em quantidade muito superior ao estequiométrico, a ignição precisa ser cuidadosamente posicionada e o sistema deve lidar com variáveis que mudam a cada fração de segundo.

Compreender a física por trás da partida a frio (e a quente) é fundamental para construir uma calibração que funcione em todas as condições climáticas e com diferentes combustíveis.

7.1 Teoria da Partida a Frio e a Quente

7.1.1 Desafios da partida a frio

Quando um motor está frio, diversas condições conspiram contra uma combustão eficiente:

- **Condensação de combustível nas paredes do coletor** — em temperaturas baixas, uma parcela significativa do combustível injetado não se vaporiza e, em vez disso, forma um filme líquido nas paredes do coletor de admissão e nas costas das válvulas de admissão. Esse combustível líquido não participa da combustão até que se evapore, o que significa que a mistura efetiva que chega à câmara é muito mais pobre do que o injetado. Em motores com injeção no pórtilo (PFI), esse efeito é particularmente severo — até 40–60% do combustível injetado pode se condensar em condições de partida a frio extremo (-10°C a 0°C).
- **Ar mais denso** — o ar frio é mais denso, contendo mais moléculas de oxigênio por unidade de volume. Para manter a relação ar/combustível desejada, é necessário injetar mais combustível proporcionalmente.
- **Maior atrito interno** — o óleo lubrificante está mais viscoso quando frio, aumentando o atrito nos mancais, pistões e anéis. Isso exige mais torque do motor de arranque e reduz a rotação de cranking, tornando cada ciclo mais lento e a aspiração de ar mais irregular.
- **Menor volatilidade do combustível** — a pressão de vapor do combustível diminui com a temperatura. Tanto gasolina quanto etanol vaporizam-se com mais dificuldade em baixas temperaturas, prejudicando a formação da mistura homogênea necessária para uma combustão estável.
- **Folgas maiores** — com o motor frio, as folgas entre pistão e cilindro são maiores (o alumínio do pistão ainda não dilatou), o que aumenta o *blow-by* e reduz a compressão efetiva.

7.1.2 Fases da partida

O processo de partida pode ser dividido em três fases distintas, cada uma com requisitos próprios de calibração:

1. **Priming (pré-molhamento)** — antes mesmo do motor girar, um pulso de combustível é entregue aos injetores para “molhar” as paredes do coletor e as costas das válvulas. Esse pulso inicial garante que, quando o motor começar a girar, já haverá combustível parcialmente vaporizado disponível para os primeiros ciclos de combustão.
2. **Cranking (partida propriamente dita)** — enquanto o motor de arranque gira o motor (tipicamente entre 150 e 500 RPM), o sistema injeta uma quantidade de combustível substancialmente maior que a normal. A duração de cada pulso de injeção durante o cranking é determinada por tabelas específicas que consideram temperatura do motor (CLT), número de ciclos do motor e, opcionalmente, posição do acelerador (TPS).
3. **Transição cranking → funcionamento** — quando a rotação ultrapassa o limiar de cranking (tipicamente 500 RPM), o motor “pegou” e o sistema precisa transicionar suavemente da lógica de cranking para a lógica de funcionamento normal. Essa transição é gerenciada pelo enriquecimento pós-partida (*afterstart enrichment*), que decai gradualmente ao longo de dezenas ou centenas de ciclos do motor.

7.1.3 Etanol e a partida — o desafio dos 40%

O etanol (E100) e misturas com alto teor de etanol (E85) apresentam um desafio adicional severo na partida a frio. O calor latente de vaporização do etanol é aproximadamente 2,4 vezes maior que o da gasolina (840 kJ/kg contra 350 kJ/kg). Isso significa que o etanol absorve muito mais energia térmica do ambiente para se vaporizar, resfriando o ar de admissão e as superfícies do coletor durante o processo.

Na prática, um motor alimentado com etanol necessita de aproximadamente 30–40% mais combustível na partida a frio em comparação com gasolina pura, dependendo da temperatura ambiente. Esse fator é aplicado tanto no pulso de priming quanto na tabela de combustível base de cranking e no enriquecimento pós-partida.

Partida a frio com etanol abaixo de 15°C

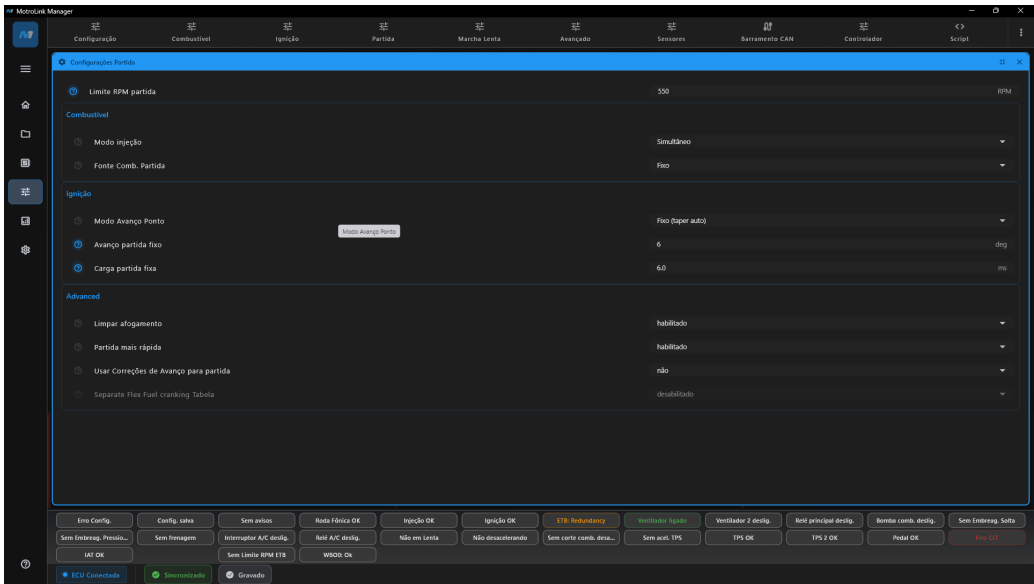
Em regiões com temperaturas abaixo de 15 °C, motores alimentados exclusivamente com etanol podem apresentar extrema dificuldade de partida. Algumas estratégias complementares incluem: uso de sistema de partida a frio auxiliar (tanquinho de gasolina), aquecedores de combustível no rail ou aumento agressivo do pulso de priming. A centralina evoTech suporta a configuração de partida assistida por tanque auxiliar de gasolina via saída auxiliar dedicada.

Não confunda enriquecimento de partida com warm-up

O enriquecimento de cranking e pós-partida são estratégias de curta duração (segundos a dezenas de segundos) que visam garantir o pegamento do motor. As correções de aquecimento (*warm-up enrichment*), abordadas em outro capítulo, são estratégias de média duração que compensam a operação com motor ainda não completamente aquecido. Apesar de ambas adicionarem combustível, suas tabelas, gatilhos e lógicas são independentes.

7.2 Configurações de Partida

As configurações de partida definem os parâmetros fundamentais que a ECU utiliza para detectar e gerenciar o processo de cranking. Esses parâmetros determinam quando o sistema considera que o motor está em modo de partida, quantos ciclos são utilizados para a lógica de cranking e como a detecção de rotação é tratada durante os primeiros giros.



Tela de configurações de partida (cranking) e priming no MotroLink Manager .

7.2.1 RPM de limiar de cranking

O parâmetro mais importante das configurações de partida é o **limiar de RPM de cranking** (*cranking RPM threshold*). Esse valor define a fronteira entre o modo de cranking e o modo de funcionamento normal:

- Enquanto a rotação do motor estiver **abaixo** desse limiar, a ECU utiliza as tabelas de combustível e ignição específicas de cranking.
- Quando a rotação **ultrapassa** esse limiar, o sistema transiciona para o modo de funcionamento normal, aplicando as tabelas VE e de avanço principais, juntamente com o enriquecimento pós-partida.

Valor típico do limiar de cranking

O firmware sugere **350–450 RPM** como faixa típica, enquanto valores de **500 RPM** funcionam igualmente bem para a grande maioria dos motores e proporcionam margem adicional. Em aplicações com motor de arranque de alta potência (motores de competição com baterias de 16V, por exemplo), o motor de arranque pode girar o motor acima de 500 RPM mesmo sem combustão — nesses casos, pode ser necessário elevar o limiar para 600–700 RPM.

7.2.2 Contagem de ciclos de cranking

A ECU conta o número de ciclos completos do motor (cada ciclo = 720° de virabrequim em um motor 4 tempos) desde o início do cranking. Essa contagem é utilizada como eixo da tabela de combustível base de cranking (Seção 7.4) e permite que a quantidade de combustível varie ao longo dos primeiros ciclos.

Tipicamente, os primeiros 1–3 ciclos recebem mais combustível (pois o coletor ainda está seco), e a quantidade vai reduzindo conforme o filme de combustível nas paredes se estabiliza.

7.2.3 Detecção de sincronismo durante cranking

Durante os primeiros giros do motor, a ECU precisa sincronizar-se com a roda fônica para determinar a posição angular do virabrequim. Até que o sincronismo seja estabelecido:

- A injeção opera em modo *batch* (todos os injetores simultaneamente) até que a posição do virabrequim e do comando sejam confirmadas, quando então passa para modo sequencial.
- A ignição pode disparar em modo *wasted spark* até que o sincronismo completo (com sensor de fase) seja obtido.

! Sincronismo e sensor de fase

Se a aplicação utiliza sensor de fase (sensor de comando de válvulas), o sincronismo completo — que permite injeção sequencial verdadeira desde o cranking — pode levar de 1 a 3 revoluções adicionais do virabrequim. Durante esse período, a ECU opera em modo semi-sequencial ou batch. Para partidas mais rápidas e limpas, especialmente em motores com catalisador, certifique-se de que o sinal do sensor de fase está limpo e corretamente configurado.

7.3 Pulso de Priming

O pulso de priming é uma injeção de combustível que ocorre **antes** do motor começar a girar, no momento em que a chave de ignição é ligada (ou o botão de partida é acionado, antes de engatar o motor de arranque). Seu objetivo é “molhar” as paredes do coletor de admissão e as costas das válvulas, criando um filme de combustível que estará parcialmente vaporizado quando os primeiros ciclos de aspiração ocorrerem.

7.3.1 Curva de priming: massa vs. CLT

A quantidade de combustível no pulso de priming é definida por uma curva unidimensional que relaciona a **temperatura do líquido de arrefecimento (CLT)** com a **massa de combustível** (em miligramas). A lógica é simples: quanto mais frio o motor, maior a massa de priming.

Valores típicos de referência para motor aspirado 1.6L, 4 cilindros (regra prática: ~60 mg por litro de cilindrada por cilindro como base):

CLT (°C)	Priming (mg)
-10	70-110
0	50-80
10	30-60
20	20-40
40	10-20
60	5-10
80	2-5
90+	0-2

i Priming com motor já quente

Quando o motor está na temperatura normal de operação ($\geq 80^{\circ}\text{C}$), o pulso de priming deve ser mínimo ou zero. Em motores com injeção direta ou com injetores posicionados muito próximos à válvula, o priming pode até ser desabilitado acima de certa temperatura. No entanto, se o motor foi desligado recentemente e ainda está quente, uma pequena massa de priming (2-5 mg) pode ajudar a compensar a evaporação do combustível residual no coletor que ocorreu enquanto o motor estava desligado.

7.3.2 Comportamento do priming

O pulso de priming é disparado uma única vez, no momento da energização da ECU (chave ligada). Se o motor não der partida e a chave for desligada e religada, um novo pulso de priming será emitido. É importante considerar esse comportamento na calibração: se o motorista tem o hábito de dar várias “chaveadas” seguidas, cada uma gerará um pulso de priming, podendo encharcar o motor (condição de *flood*).

⚠ Cuidado com o encharcamento

Se o motor não pegar após 3-4 tentativas de cranking, é provável que as velas estejam encharcadas de combustível. A estratégia padrão de “limpeza de encharcamento” (*flood clear*) consiste em acionar o motor de arranque com o acelerador totalmente pressionado (TPS > 95%), momento em que a ECU corta a injeção, permitindo que o ar limpe o excesso de combustível. Essa função deve ser habilitada nas configurações de partida.

7.3.3 Priming para etanol

Para motores calibrados com etanol (E85 ou E100), o pulso de priming deve ser aumentado em 30-50% em relação à gasolina, seguindo a mesma lógica do calor latente de vaporização discutida na teoria. A ECU evoTech permite configurar o multiplicador de priming por teor de etanol quando um sensor flex fuel está instalado, ou utilizar uma tabela de priming separada para etanol.

7.4 Combustível Base de Cranking

A tabela de combustível base de cranking é o coração da estratégia de partida. Essa tabela bidimensional define a **massa de combustível** (em miligramas) por cilindro para cada combinação de **ciclos do motor** (eixo X) e **temperatura do líquido de arrefecimento** (eixo Y).

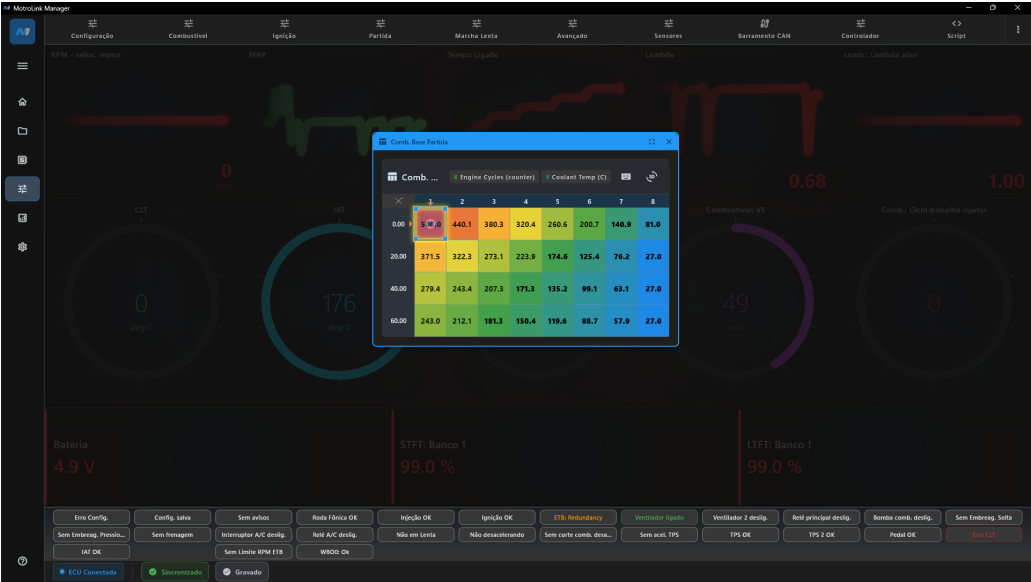


Tabela de combustível base de cranking: ciclos do motor (eixo horizontal) × temperatura CLT (eixo vertical).

7.4.1 Lógica da tabela

A tabela funciona da seguinte forma:

- **Eixo horizontal — ciclos do motor:** representa o número de ciclos completos desde o início do cranking. Tipicamente vai de 0 (primeiro ciclo) até 10–20 ciclos. Os primeiros ciclos recebem mais combustível, e a quantidade decresce à medida que o coletor se “molha” e a combustão se estabiliza.
- **Eixo vertical — temperatura CLT:** representa a temperatura do líquido de arrefecimento no momento da partida. Quanto mais frio o motor, maior a quantidade de combustível necessária. Tipicamente cobre de −20 °C a 100 °C.

7.4.2 Valores típicos

Para um motor aspirado 4 cilindros 1.6L (400 cc por cilindro), valores típicos de massa de combustível de cranking são (regra prática do firmware: ~60 mg por litro de cilindrada por cilindro como base):

CLT (°C)	Ciclo 1 (mg)	Ciclo 3 (mg)	Ciclo 6 (mg)	Ciclo 10+ (mg)
-10	50	38	27	19
0	38	30	22	15
20	22	18	14	10
40	14	11	10	7
60	10	8	7	5
80	7	6	5	5

Esses valores são pontos de partida

Os valores acima servem como referência inicial. A calibração real deve ser feita empiricamente, partindo desses valores e ajustando com base no comportamento real do motor. O objetivo é que o motor pegue no menor número de ciclos possível, sem excesso de combustível (fumaça preta, velas encharcadas) nem falta (motor gira mas não pega).

7.4.3 Estratégia de preenchimento da tabela

A abordagem recomendada para preencher a tabela de combustível base de cranking é:

1. **Comece com o motor quente** ($\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ajuste os valores de cranking fuel até que o motor pegue consistentemente em 1–3 ciclos.
2. **Deixe o motor esfriar parcialmente** (40–60°C) e repita o teste, ajustando a linha correspondente da tabela.
3. **Repita para temperaturas mais baixas**, aguardando o motor esfriar completamente entre os testes. Para temperaturas abaixo da ambiente, será necessário testar em dias mais frios ou utilizar câmara climática.
4. **Os primeiros ciclos (1–3) devem ter valores mais altos** que os ciclos subsequentes. A redução ao longo dos ciclos deve ser suave e gradual.

Teste de partida a frio real

O teste definitivo da calibração de partida é desligar o motor completamente frio (após uma noite parado), em um dia representativo da condição climática mais severa esperada, e verificar se o motor pega na primeira tentativa. Esse teste deve ser repetido múltiplas vezes em diferentes temperaturas para validar toda a extensão da tabela.

7.5 Multiplicador de Cranking por CLT

Além da tabela de combustível base, a ECU evoTech oferece um **multiplicador de enriquecimento por temperatura do líquido de arrefecimento (CLT)** que atua durante todo o período de cranking. Esse multiplicador é uma curva unidimensional (CLT → fator multiplicador) que é aplicada sobre o valor base da tabela de combustível de cranking.

7.5.1 Quando usar o multiplicador

O multiplicador de CLT é útil quando se deseja um ajuste global de combustível de cranking sem alterar toda a tabela base. Por exemplo:

- Se o motor pega bem em todas as temperaturas mas precisa de um pouco mais de combustível abaixo de 0 °C, basta aumentar o multiplicador nessa faixa em vez de reescrever a tabela inteira.
- Se um veículo foi transferido para uma região de clima diferente, o multiplicador permite um ajuste rápido sem refazer a calibração de cranking.

Valores típicos do multiplicador:

CLT (°C)	Multiplicador
-20	1,50
-10	1,35
0	1,20
10	1,10
20	1,05
40	1,00
60	1,00
80	1,00
100	0,95

7.5.2 Variante para E85/E100

Para motores com sensor flex fuel, a ECU permite configurar um multiplicador de cranking adicional baseado no teor de etanol do combustível. Esse multiplicador é aplicado em cascata sobre o multiplicador de CLT. Para E85, o multiplicador típico varia de 1,30 (motor quente) a 1,50 (motor frio). Para E100, os valores podem chegar a 1,40–1,60.

 Não exagere no multiplicador de etanol

Um excesso de combustível durante o cranking com etanol pode encharcar as velas rapidamente, especialmente em temperaturas abaixo de 10 °C. Se o motor não pega com etanol puro em baixas temperaturas mesmo com multiplicadores altos, considere o uso de sistema de partida a frio auxiliar (tanquinho de gasolina) ou aquecedor de combustível no rail. Forçar o cranking com excesso de etanol apenas agravará o encharcamento.

7.6 Multiplicador de Cranking por TPS

O **multiplicador de cranking por TPS** (posição da borboleta do acelerador) permite ajustar a quantidade de combustível durante a partida com base na abertura do acelerador. Essa funcionalidade tem dois propósitos principais:

7.6.1 Enriquecimento por abertura de borboleta

Se o motorista pressiona levemente o acelerador durante a partida (prática comum em motores mais antigos ou com carburador), o multiplicador pode adicionar combustível para compensar o aumento de fluxo de ar. Valores típicos:

TPS (%)	Multiplicador
0	1,00
10	1,05
20	1,10
30	1,15
50	1,20

7.6.2 Estratégia de *flood clear* (limpeza de encharcamento)

Quando o TPS ultrapassa 95%, o multiplicador cai para valores muito baixos (0,0 a 0,1), efetivamente cortando a injeção durante o cranking. Essa é a estratégia de “limpeza de encharcamento”: o motorista pressiona o acelerador a fundo e aciona o motor de arranque, permitindo que o ar passe pelos cilindros e seque as velas encharcadas.

TPS (%)	Multiplicador
80	1,00
90	0,50
95	0,10
100	0,00

i Combinando os dois comportamentos

A curva completa de multiplicador por TPS geralmente tem formato de “U invertido”: valores crescentes de 0% a 50% de TPS (enriquecimento) e valores decrescentes de 90% a 100% de TPS (flood clear). Entre 50% e 90%, o multiplicador permanece constante. O firmware ativa o flood clear quando o TPS excede 95%.

7.7 Avanço de Ignição na Partida

Durante o cranking, o avanço de ignição é controlado por uma curva dedicada, separada da tabela de avanço principal utilizada em funcionamento normal. A lógica por trás disso é que as condições de combustão durante o cranking são muito diferentes: a rotação é baixa e irregular, a mistura é rica e a turbulência dentro da câmara é mínima.

7.7.1 Curva de avanço de cranking

A curva de avanço durante o cranking é tipicamente uma função simples de **RPM** (ou, em alguns casos, de **CLT**). Os valores são geralmente fixos ou variam muito pouco:

RPM de cranking	Avanço (° APMS)
0–100	0
100–200	5
200–350	8
350–500	10

7.7.2 Por que o avanço de cranking é baixo

O avanço de ignição durante o cranking é intencionalmente conservador (tipicamente entre 0° e 10° APMS — Antes do Ponto Morto Superior) por várias razões:

- **Velocidade do motor de arranque:** em baixas rotações, a frente de chama tem mais tempo para percorrer a câmara de combustão, e não é necessário adiantar a centelha tanto quanto em rotações mais altas.
- **Contrapressão sobre o pistão:** se o avanço for excessivo durante o cranking, a pressão de combustão pode se opor ao movimento ascendente do pistão (o motor “bate para trás”), o que pode danificar o motor de arranque, a correia/engrenagem de acionamento e até o virabrequim.
- **Estabilidade:** valores fixos e baixos de avanço garantem uma partida previsível e consistente.

 Avanço excessivo no cranking pode danificar o motor

Nunca configure valores de avanço superiores a 15° durante o cranking sem justificativa técnica comprovada. Avanço excessivo em baixa rotação gera picos de pressão enquanto o pistão ainda sobe, criando forças que atuam no sentido contrário à rotação. Isso pode causar danos mecânicos ao motor de arranque, à roda fônica, à correia dentada ou ao virabrequim. Valores entre 0° e 10° são seguros e eficazes para a grande maioria dos motores.

 Avanço fixo vs. variável

Para a maioria das aplicações, um avanço fixo de **5° a 10° APMS** durante todo o cranking funciona perfeitamente. A variação por RPM descrita na tabela acima é um refinamento que raramente faz diferença prática na qualidade da partida. Comece com um valor fixo de 8° e ajuste apenas se necessário.

7.8 Enriquecimento Pós-Partida

O enriquecimento pós-partida (*afterstart enrichment*) é a estratégia que faz a ponte entre o modo de cranking (partida) e o funcionamento normal do motor. Quando a rotação do motor ultrapassa o limiar de cranking e o motor “pegou”, o sistema não pode simplesmente saltar para os valores normais da tabela VE — o motor ainda está frio, o coletor ainda está parcialmente molhado e a combustão ainda é instável.

7.8.1 Tabela de enriquecimento pós-partida

O enriquecimento pós-partida é definido por uma tabela bidimensional:

- **Eixo horizontal — ciclos do motor após o fim do cranking:** tipicamente de 0 a 500–1000 ciclos (ou equivalentemente, um tempo de 0 a 30–120 segundos dependendo da rotação).
- **Eixo vertical — temperatura CLT no momento da partida:** a temperatura registrada quando o motor deu partida (não a temperatura atual, que começa a subir imediatamente).

O valor de cada célula é um **fator multiplicador** aplicado sobre o combustível calculado pelas tabelas VE normais. Por exemplo, um valor de 1,30 significa que a ECU injeta 30% a mais de combustível que o normal.

7.8.2 Perfil típico de decaimento

O enriquecimento pós-partida segue um perfil de decaimento:

CLT partida (°C)	Ciclo 0 (fator)	Ciclo 100 (fator)	Ciclo 500 (fator)
−10	1,50	1,30	1,05
0	1,40	1,25	1,03
20	1,25	1,15	1,00
40	1,15	1,08	1,00
60	1,08	1,03	1,00
80	1,02	1,00	1,00

7.8.3 Transição suave

A chave para um bom enriquecimento pós-partida é a **suavidade da transição**. O motor não deve apresentar:

- **Queda de rotação** logo após pegar — indica que o enriquecimento pós-partida é insuficiente ou que o decaimento é rápido demais.
- **Pico de rotação seguido de oscilação** — indica que o enriquecimento é excessivo nos primeiros ciclos e insuficiente nos seguintes.
- **Fumaça preta e cheiro forte de combustível** — indica excesso de enriquecimento pós-partida, especialmente com motor quente.

Usando o datalogger para ajustar a transição

A ferramenta mais útil para ajustar o enriquecimento pós-partida é o datalogger do MotroLink Manager . Grave um log desde o momento do cranking até pelo menos 30 segundos após o motor pegar. Observe os canais de RPM, lambda (se a sonda já estiver aquecida), pulso de injeção e fator de enriquecimento pós-partida. O objetivo é que a rotação suba suavemente após o pegamento e se estabilize sem

oscilações na marcha lenta, enquanto o fator de enriquecimento decai gradualmente até 1,00.

❗ O enriquecimento pós-partida usa a CLT do momento da partida

É fundamental entender que a tabela de enriquecimento pós-partida é indexada pela temperatura do motor **no momento em que o motor pegou**, não pela temperatura atual. Isso garante que o perfil de decaimento seja consistente e previsível. Se a tabela usasse a temperatura instantânea, o enriquecimento poderia “saltar” de uma linha para outra conforme o motor aquece, causando descontinuidades na mistura.

⚠ Relação com o controle de marcha lenta

O enriquecimento pós-partida afeta diretamente a estabilidade da marcha lenta nos primeiros segundos após a partida. Um enriquecimento pós-partida bem calibrado facilita enormemente o trabalho do sistema de controle de marcha lenta (abordado no Capítulo 8). Se a marcha lenta é instável logo após a partida, ajuste primeiro o enriquecimento pós-partida antes de mexer nos parâmetros de idle.

8 Marcha Lenta

A marcha lenta (*idle*) é a condição de operação em que o motor funciona sem carga externa solicitada pelo motorista — o acelerador está liberado e o motor gira apenas o suficiente para manter-se em funcionamento e alimentar os sistemas auxiliares do veículo. Apesar de parecer um estado “simples”, a marcha lenta é uma das condições mais difíceis de calibrar com perfeição, pois o motor opera no limite inferior de torque e qualquer perturbação pode causar oscilações ou até o apagamento.

Este capítulo aborda todos os aspectos do controle de marcha lenta na família evoTech, desde a configuração do tipo de controle e hardware até as tabelas avançadas de compensação e ajuste fino.

8.1 Teoria do Controle de Marcha Lenta

8.1.1 O equilíbrio de torque na marcha lenta

Em marcha lenta, o motor precisa gerar torque suficiente **apenas** para vencer as perdas internas e manter os acessórios funcionando:

- **Atrito interno** — mancais do virabrequim, pistões e anéis nos cilindros, comando de válvulas, bomba de óleo. Em um motor frio, o atrito pode ser 2–3 vezes maior que em um motor na temperatura de operação.
- **Alternador** — a demanda elétrica do veículo (faróis, rádio, módulos eletrônicos, ventiladores) é convertida em carga mecânica pelo alternador. Um alternador carregando uma bateria descarregada pode consumir 5–10 Nm de torque.
- **Compressor do ar-condicionado** — quando o A/C está ligado, o compressor adiciona uma carga significativa (5–15 Nm dependendo do sistema), causando uma queda imediata de RPM se não houver compensação.
- **Bomba de direção hidráulica** — em veículos com direção hidráulica (não elétrica), manobras com o volante em marcha lenta geram carga adicional.
- **Ventilador do radiador** — ventiladores mecânicos (acionados por correia) ou elétricos de alta potência.

Se o torque gerado pelo motor cair abaixo do torque consumido pelas cargas parasitas, a rotação cairá. Se a queda for grande o suficiente, o motor apaga. O sistema de controle de marcha lenta existe para evitar isso, ajustando continuamente a quantidade de ar admitida para manter a rotação no alvo desejado.

8.1.2 Malha aberta vs. malha fechada

Existem duas abordagens fundamentais para o controle de marcha lenta:

Malha aberta (*open loop*): a ECU posiciona a válvula de ar de marcha lenta (IAC) ou o corpo de borboleta eletrônico (ETB) em uma posição fixa, previamente calibrada para cada condição de temperatura e carga. Não há realimentação — a ECU não “sabe” se a rotação está acima ou abaixo do alvo. **Vantagem:** simplicidade e previsibilidade. **Desvantagem:** qualquer perturbação não prevista (carga elétrica, A/C, temperatura diferente) causa desvio da rotação alvo.

Malha fechada (*closed loop* — PID): a ECU mede continuamente a rotação do motor e a compara com a rotação alvo. A diferença (erro) é processada por um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que ajusta a posição da válvula IAC ou ETB em tempo real para zerar o erro. **Vantagem:** compensação automática de perturbações, marcha lenta estável em todas as condições. **Desvantagem:** requer calibração cuidadosa dos ganhos PID; ganhos inadequados causam oscilação (“*hunting*”).

i A abordagem recomendada: malha aberta + malha fechada

A estratégia mais robusta, e a recomendada pela MotroLink, é utilizar **ambas as malhas simultaneamente**. A malha aberta fornece a posição base da válvula (que coloca a rotação “perto” do alvo), e a malha fechada faz o ajuste fino (corrigindo os desvios residuais). Essa abordagem combina a estabilidade da malha aberta com a precisão da malha fechada, e é a configuração padrão da família evoTech.

8.1.3 Controle por timing (avanço de ignição)

Além do controle por ar (IAC/ETB), a ECU pode utilizar o **avanço de ignição** como ferramenta complementar de controle de marcha lenta. A lógica é simples: mais avanço gera mais torque, menos avanço gera menos torque. Como a resposta da ignição ao torque é praticamente instantânea (o efeito é sentido no próximo ciclo de combustão), ela é muito mais rápida que o controle por ar (que depende do tempo de transporte do ar pelo coletor).

O controle por timing é particularmente útil para:

- Compensar perturbações rápidas e transitórias (ligar farol, desligar A/C).
- Estabilizar a marcha lenta durante o aquecimento, quando a rotação tende a oscilar.
- Ajuste fino em situações onde a resolução da válvula IAC não é suficiente.

8.1.4 Dashpot (anti-stall em desaceleração)

O *dashpot* é uma funcionalidade anti-stall que atua durante desacelerações rápidas. Quando o motorista solta o acelerador abruptamente (por exemplo, passando de 5000 RPM para marcha lenta), a borboleta fecha rapidamente mas o motor mantém inércia rotacional. O problema ocorre quando a rotação cai abaixo do alvo de marcha lenta antes que o sistema de controle consiga reagir — o motor pode apagar.

O dashpot monitora a taxa de queda da rotação e, quando detecta uma desaceleração rápida em direção à região de marcha lenta, abre parcialmente a válvula IAC ou o ETB para “amortecer” a queda, evitando que a rotação caia abaixo do limiar de funcionamento.

8.1.5 Por que a marcha lenta precisa ser mais alta quando o motor está frio

Com o motor frio, vários fatores exigem uma rotação de marcha lenta mais elevada:

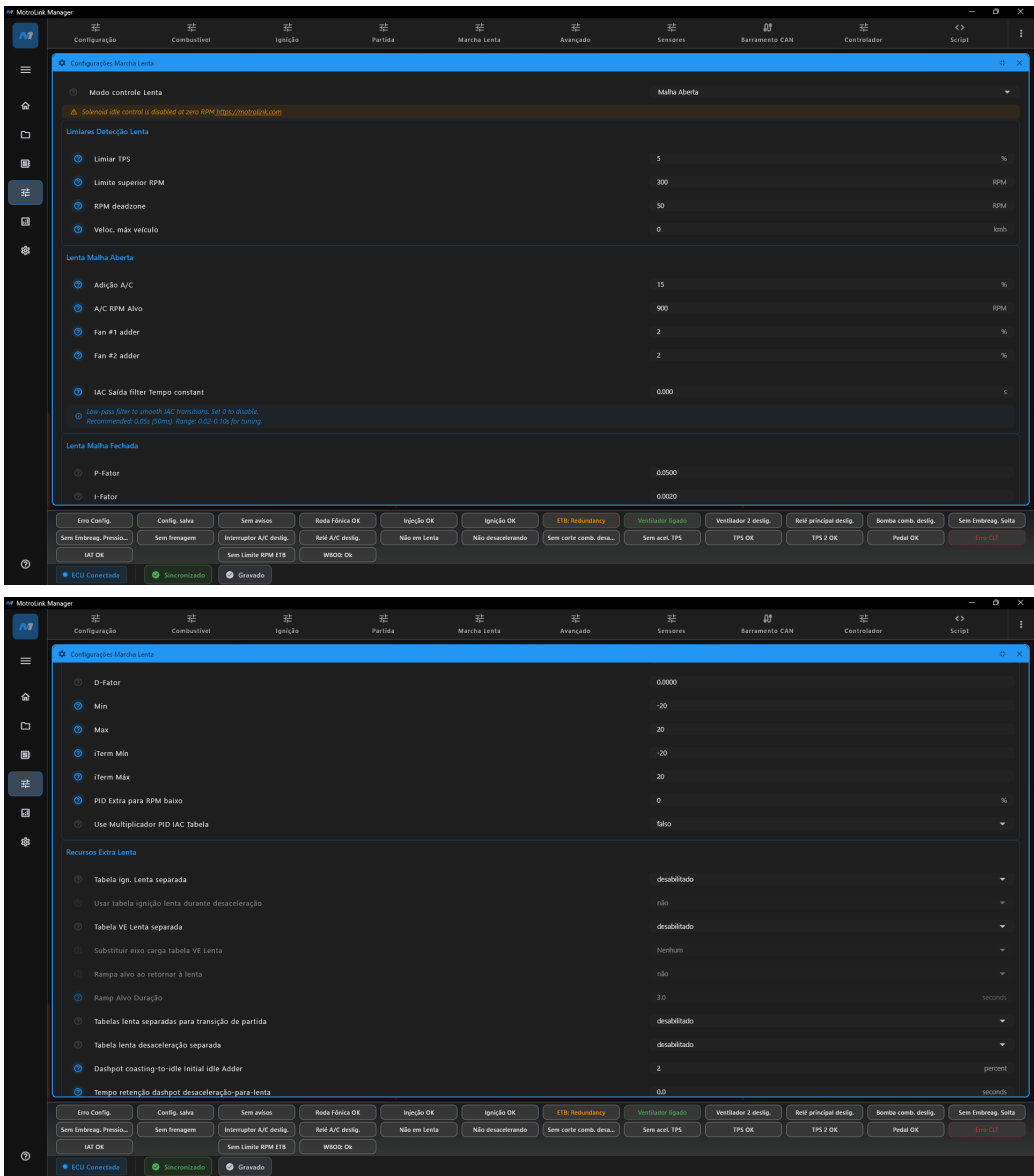
- O atrito interno é muito maior (óleo viscoso), exigindo mais torque para manter o motor girando.
- A combustão é menos eficiente (mistura parcialmente condensada, câmara fria), gerando menos torque por ciclo.

- O motor precisa de mais fluxo de ar para manter a rotação, o que por sua vez requer mais combustível e mais calor para aquecer o motor mais rapidamente.
- A estabilidade rotacional é menor — com menos torque produzido por ciclo, qualquer variação cilindro a cilindro causa mais oscilação.

Valores típicos de rotação alvo: 850–950 RPM com o motor quente ($\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$), subindo para 1200–1500 RPM com o motor frio ($< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Motores de competição podem utilizar valores mais altos em todas as faixas.

8.2 Configurações

A tela de configurações de marcha lenta no MotroLink Manager concentra os parâmetros fundamentais que definem o tipo de controle, o atuador utilizado, os limiares de detecção e os recursos complementares como dashpot.



Configurações de marcha lenta no MotroLink Manager : detecção e malha aberta (acima), PID e recursos extras (abaixo).

8.2.1 Tipo de controle

A ECU evoTech suporta três modos de controle de marcha lenta:

1. **Malha aberta apenas** — a posição da válvula IAC ou ETB é determinada exclusivamente pelas tabelas de posição base. Não há correção automática por PID. Indicado para testes iniciais ou aplicações muito simples.
2. **Malha fechada (PID) apenas** — o PID controla integralmente a posição da válvula. Não há tabela de posição base. Pode funcionar bem quando o PID é bem calibrado, mas tende a ser mais lento para atingir a estabilidade após perturbações grandes.
3. **Malha aberta + malha fechada (recomendado)** — a tabela de posição base fornece o ponto de partida, e o PID corrige os desvios. Essa combinação oferece o melhor compromisso entre resposta rápida e estabilidade.

8.2.2 Tipo de atuador

O tipo de atuador de marcha lenta deve ser configurado de acordo com o hardware instalado:

Motor de passo (stepper) — válvula IAC do tipo stepper motor, comum em motores GM, Fiat e muitos japoneses. Controlada por número de passos (0 a 255 típico). Oferece posicionamento preciso e repetível, mas resposta relativamente lenta.

Válvula PWM 2 fios — válvula solenoide controlada por sinal PWM (*Pulse Width Modulation*). Comum em motores Ford, VW/Audi e alguns japoneses. Resposta mais rápida que stepper, mas pode apresentar histerese.

Válvula PWM 3 fios — similar à de 2 fios, com um fio adicional de feedback de posição.

Corpo de borboleta eletrônico (ETB) — o próprio corpo de borboleta motorizado atua como controle de ar de marcha lenta. Ver Capítulo 9 para detalhes do controle ETB.

8.2.3 Detecção de marcha lenta

A ECU precisa determinar quando o motor está em condição de marcha lenta para ativar o controlador. A detecção é baseada em:

- **TPS abaixo de um limiar** — tipicamente $< 1\%$ a 2% de abertura (acelerador completamente liberado).
- **RPM abaixo de um limiar** — tipicamente RPM alvo + margem (ex.: se o alvo é 900 RPM, a detecção pode ser ativada abaixo de 1200 RPM).
- **Velocidade do veículo** (opcional) — em veículos com sensor de velocidade, a marcha lenta pode ser detectada apenas quando o veículo está parado ou em velocidade muito baixa.

8.2.4 Dashpot

Os parâmetros de dashpot incluem:

- **RPM de ativação** — rotação abaixo da qual o dashpot começa a atuar (ex.: 1500 RPM).
- **Taxa de decaimento** — velocidade com que a abertura extra do dashpot é removida, em passos/segundo ou %/segundo.
- **Abertura máxima de dashpot** — limite superior da abertura adicional aplicada pelo dashpot.

Dashpot e câmbio automático

Em veículos com câmbio automático ou CVT, o dashpot é particularmente importante. A mudança de marchas, especialmente ao reduzir para a primeira ao parar o veículo, pode causar uma queda abrupta de rotação que apaga o motor. Nessas aplicações, o dashpot deve ser mais agressivo (RPM de ativação mais alto, taxa de decaimento mais lenta).

8.3 Hardware de Marcha Lenta

A configuração correta do hardware de marcha lenta é essencial para o funcionamento do controle. Uma válvula mal configurada pode parecer um problema de calibração quando na verdade é um problema de hardware ou pinagem.

8.3.1 Válvula IAC tipo stepper (motor de passo)

Válvulas stepper são controladas por 4 fios (2 bobinas, cada uma com 2 fios). Os parâmetros de configuração incluem:

- **Pinos de controle** — atribuição dos 4 pinos da ECU às 4 fios da válvula. A ordem dos fios determina o sentido de rotação do motor de passo.
- **Número total de passos** — o range total da válvula (tipicamente 128, 160 ou 255 passos). Esse valor deve corresponder à especificação da válvula utilizada.
- **Frequência de stepping** — a velocidade com que os passos são enviados (tipicamente 100–300 Hz). Frequências muito altas podem causar perda de passos; muito baixas tornam a resposta lenta.
- **Homing na partida** — na energização, a ECU move a válvula até o batente mecânico (posição zero) para calibrar a referência de posição. Isso causa um breve ruído do motor de passo e é um comportamento normal.

Inversão de fios no stepper

Se os fios do motor de passo estiverem invertidos, a válvula pode girar no sentido contrário ao esperado — abrindo quando deveria fechar e vice-versa. O sintoma é uma marcha lenta que “dispara” em vez de estabilizar. Se isso ocorrer, inverta um

par de fios de uma das bobinas. Nunca inverta os 4 fios simultaneamente.

8.3.2 Válvula IAC tipo PWM

Válvulas PWM são controladas por um sinal de modulação por largura de pulso. Os parâmetros incluem:

- **Pino de controle** — saída auxiliar PWM da ECU atribuída à válvula.
- **Frequência PWM** — frequência do sinal PWM. Valores típicos variam de 100 Hz a 1000 Hz, dependendo do modelo da válvula. A frequência incorreta causa vibração audível ou controle errático.
- **Duty cycle mínimo e máximo** — limites operacionais do ciclo de trabalho. Tipicamente 5–10% (mínimo) a 90–95% (máximo). Limitar o range evita operação em zonas não lineares da válvula.
- **Polaridade** — define se duty cycle alto significa válvula aberta ou fechada. Depende do modelo da válvula.

Determinando a frequência PWM correta

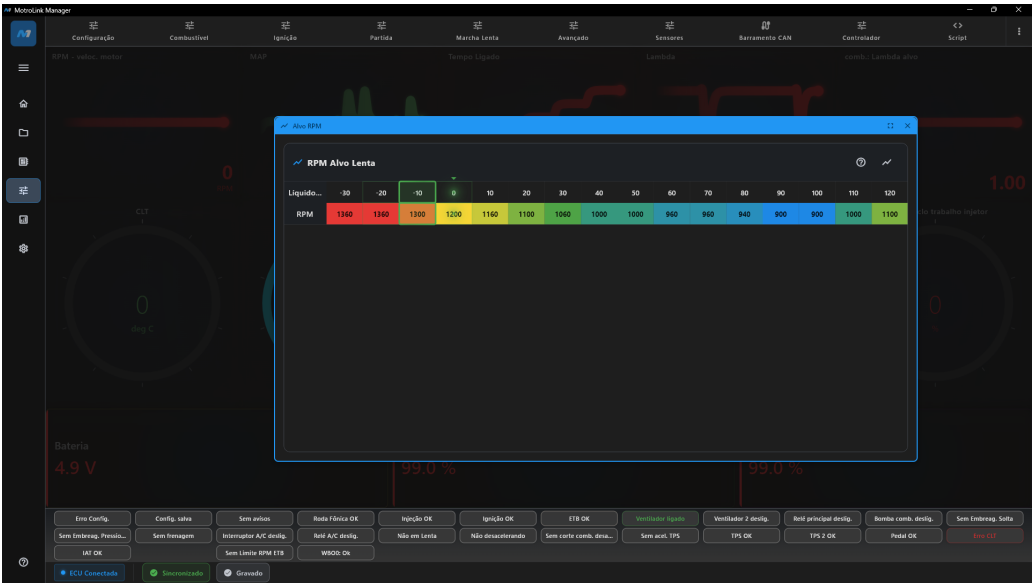
Se você não conhece a frequência PWM da válvula IAC, comece com 300 Hz e ajuste. Uma frequência correta resulta em operação silenciosa e suave da válvula. Frequência incorreta causa: vibração audível (muito baixa), aquecimento excessivo do solenoide (muito alta) ou controle instável (muito longe do ideal). Consulte o datasheet do fabricante da válvula sempre que possível.

8.3.3 Corpo de borboleta eletrônico (ETB) como atuador de idle

Quando o sistema utiliza corpo de borboleta eletrônico, não há válvula IAC separada — o próprio ETB controla o fluxo de ar em marcha lenta através de aberturas muito pequenas (tipicamente 2–8% de abertura). O controle é feito pelo mesmo atuador e PID do ETB, mas com um alvo de posição determinado pelo sistema de idle. Consulte o Capítulo 9 para detalhes sobre a configuração do ETB.

8.4 RPM Alvo

A curva de RPM alvo de marcha lenta define a rotação desejada em função da temperatura do líquido de arrefecimento (CLT). Essa é uma das curvas mais intuitivas da calibração: com o motor frio, a rotação alvo é mais alta; com o motor quente, a rotação alvo é mais baixa.



Curva de RPM alvo de marcha lenta em função da temperatura do líquido de arrefecimento (CLT).

8.4.1 Valores típicos

CLT (°C)	RPM alvo
-20	1500
-10	1400
0	1300
10	1200
20	1100
30	1000
40	950
50	920
60	900
70	880
80	850
90	850
100	850

i RPM alvo para motores de competição

Motores preparados com perfis de comando agressivos (maior cruzamento de válvulas) frequentemente necessitam de RPM de marcha lenta mais elevada — tipicamente 950–1100 RPM mesmo com o motor quente. Isso ocorre porque a sobreposição de válvulas causa reversão de gases na admissão em baixas rotações, reduzindo o torque efetivo e a estabilidade rotacional. Se o motor “sacoleja” ou apresenta marcha lenta irregular com 850 RPM, aumente o alvo para 950–1000 RPM e observe a melhoria.

8.4.2 Histerese de RPM

A ECU aplica uma banda de histerese ao redor do RPM alvo para evitar oscilações do controle. Tipicamente, a banda é de ± 25 a ± 50 RPM. Dentro dessa banda, o controlador PID não atua (ou atua com ganho reduzido), permitindo pequenas variações naturais sem intervenção constante.

8.4.3 Compensação por carga elétrica e A/C

A curva de RPM alvo pode ser elevada automaticamente quando determinadas cargas são detectadas:

- **A/C ligado** — aumento típico de 50–100 RPM no alvo para compensar a carga do compressor.
- **Tensão de bateria baixa** — se a tensão cair abaixo de um limiar (ex.: $< 13,0$ V), a ECU pode aumentar a rotação para que o alternador carregue mais rapidamente.
- **Ventilador do radiador ligado** — em sistemas com ventilador elétrico de alta potência, o acionamento do ventilador pode disparar um aumento no RPM alvo.

8.5 Posição Base da Válvula

A tabela de posição base da válvula IAC (ou duty cycle base para válvulas PWM, ou abertura base do ETB) é o componente de **malha aberta** do sistema de controle de marcha lenta. Ela define a posição “de partida” do atuador para cada condição de temperatura e rotação.



Tabela de posição base da válvula IAC: temperatura CLT (eixo vertical) × RPM (eixo horizontal) → posição da válvula.

8.5.1 Lógica da tabela

A tabela bidimensional relaciona:

- **Eixo vertical** — CLT: temperatura do líquido de arrefecimento.

- **Eixo horizontal — RPM:** rotação alvo (ou faixa de rotação próxima ao alvo).
- **Valores — posição da válvula:** expressa em passos (stepper), % de duty cycle (PWM) ou % de abertura (ETB).

O objetivo é que os valores dessa tabela coloquem a rotação “perto” do alvo para cada temperatura, sem a necessidade de intervenção do PID. Quanto melhor calibrada estiver a tabela de posição base, menos o PID precisará trabalhar e mais estável será a marcha lenta.

8.5.2 Procedimento de calibração

O procedimento para calibrar a tabela de posição base é:

1. **Desabilite temporariamente o PID** (opere apenas em malha aberta).
2. **Com o motor na temperatura desejada**, ajuste manualmente a posição da válvula até que a rotação fique próxima do alvo. Anote o valor.
3. **Repita para cada faixa de temperatura** disponível.
4. **Interpole** os valores para temperaturas intermediárias.
5. **Reabilite o PID** e verifique que a marcha lenta estabiliza rapidamente, com o PID fazendo apenas pequenos ajustes ao redor da posição base.

 **Uma boa malha aberta reduz o trabalho do PID**

Se o PID precisa fazer correções grandes e constantes, significa que a tabela de posição base está mal calibrada. O PID deve atuar apenas como ajuste fino — correções de $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$ ao redor da posição base. Se as correções do PID ultrapassam $\pm 20\%$, revise a tabela de posição base antes de ajustar os ganhos PID.

8.6 IAC durante Cranking

Durante o cranking (partida), a válvula IAC precisa estar em uma posição suficientemente aberta para permitir a passagem de ar necessária para os primeiros ciclos de combustão. Essa posição é definida por uma curva unidimensional:

- **Eixo — CLT:** temperatura do líquido de arrefecimento.
- **Valores — posição da válvula:** abertura em passos, duty cycle ou %.

Valores típicos para um motor aspirado com IAC stepper (range 0–255 passos):

CLT (°C)	Posição IAC (passos)
–10	180
0	160
20	120
40	90
60	70
80	50

i Posição de cranking vs. posição base

A posição da IAC durante o cranking deve ser **igual ou ligeiramente superior** à posição base para a mesma temperatura. Se for muito menor que a posição base, o motor pode não aspirar ar suficiente durante a partida. Se for muito maior, o motor pode “disparar” ao pegar e oscilar até que o controle assuma.

8.7 Taper Cranking → Funcionamento

Quando o motor transiciona do modo de cranking para funcionamento (RPM ultrapassa o limiar de cranking), a posição da válvula IAC precisa transicionar suavemente da posição de cranking para a posição base de marcha lenta. Essa transição é chamada de *taper* (decaimento).

A curva de taper define a **duração da transição em ciclos do motor** em função da temperatura CLT:

CLT (°C)	Duração do taper (ciclos)
-10	300–400
0	200–300
20	100–150
40	50–80
60	30–50
80	10–20

A unidade é **ciclos do motor** (cada ciclo corresponde a duas rotações do virabrequim em um motor 4 tempos). Isso garante que a transição se adapta automaticamente à rotação — em RPMs mais altos o taper se completa mais rapidamente em tempo real, e em RPMs mais baixos a transição é mais lenta, o que é o comportamento desejado.

Durante o período de taper, a posição da válvula interpola linearmente entre a posição de cranking e a posição base. O PID pode começar a atuar durante ou após o taper, dependendo da configuração.

⚠ Taper muito curto causa queda de RPM

Se o taper for muito curto (especialmente com o motor frio), a válvula IAC fechará rapidamente demais, e a rotação pode cair abaixo do alvo ou até apagar o motor. Sintoma típico: motor pega, rotação sobe brevemente, depois cai e apaga. Aumente o número de ciclos do taper para a faixa de temperatura correspondente.

8.8 Timing em Malha Fechada

O controle de marcha lenta por timing (avanço de ignição) é uma ferramenta complementar ao controle por ar (IAC/ETB). Enquanto o controle por ar ajusta a quantidade de ar admitida (resposta lenta, na ordem de centenas de milissegundos a segundos), o controle por timing ajusta o torque produzido por ciclo de combustão (resposta imediata, no próximo ciclo).

8.8.1 Princípio de funcionamento

O controlador de timing em malha fechada funciona da seguinte forma:

1. A ECU compara a rotação atual com a rotação alvo de marcha lenta.
2. Se a rotação estiver **abaixo** do alvo, o controlador **avança** a ignição (mais torque).
3. Se a rotação estiver **acima** do alvo, o controlador **atrasa** a ignição (menos torque).
4. O ajuste é limitado por valores máximos de avanço e atraso.

8.8.2 Ganhos PID de timing

O controle por timing utiliza um PID independente do PID da IAC. Os parâmetros são:

- **Ganho Proporcional (P)** — determina a resposta imediata ao erro de RPM. Valores típicos: 0,5–2,0 graus por 100 RPM de erro.
- **Ganho Integral (I)** — acumula o erro ao longo do tempo e elimina erros estacionários. Valores típicos: 0,1–0,5. Valores altos causam overshoot.
- **Ganho Derivativo (D)** — responde à taxa de variação do erro, amortecendo oscilações. Valores típicos: 0,0–0,3. Geralmente mantido baixo ou zero para timing.

8.8.3 Limites de avanço e atraso

É fundamental definir limites para o ajuste de timing:

- **Avanço máximo adicional** — tipicamente +5° a +15° acima do avanço base. Limitar o avanço máximo evita condições de detonação em marcha lenta.
- **Atraso máximo** — tipicamente –5° a –15° abaixo do avanço base. Atraso excessivo pode causar superaquecimento do catalisador e alto consumo de combustível.

Timing como indicador de calibração da malha aberta

Se o controle de timing está constantemente no limite de avanço ou atraso, isso indica que a posição base da IAC está incorreta. Se o timing está sempre avançando ao máximo, a IAC está muito fechada (pouco ar). Se está sempre atrasando, a IAC está muito aberta (excesso de ar). Use a correção de timing como diagnóstico para refinar a tabela de posição base.

8.9 Multiplicador PID IAC

O **multiplicador PID IAC** é uma tabela bidimensional que permite ajustar os ganhos do controlador PID de marcha lenta em função das condições de operação. Os eixos são:

- **Eixo horizontal** — **RPM**: rotação atual do motor.
- **Eixo vertical** — **carga (MAP ou TPS)**: indicador de carga do motor.
- **Valores** — **fator multiplicador**: aplicado sobre os ganhos P, I e D configurados.

O multiplicador permite que o PID seja mais agressivo em determinadas condições e mais suave em outras. Por exemplo:

- Em rotações muito próximas ao alvo (ex.: 830–870 RPM com alvo de 850), o multiplicador pode ser reduzido (0,5–0,8) para evitar micro-oscilações.
- Em rotações significativamente afastadas do alvo (ex.: < 700 RPM ou > 1100 RPM), o multiplicador pode ser aumentado (1,5–2,0) para uma correção mais rápida.
- Em condições de carga alta (A/C ligado, muita carga elétrica), o multiplicador pode ser aumentado para compensar as perturbações mais rapidamente.

! Ajuste fino com o multiplicador

O multiplicador PID é uma ferramenta de ajuste avançado. Antes de utilizá-lo, certifique-se de que os ganhos PID base estão razoavelmente calibrados e que a tabela de posição base (malha aberta) está correta. O multiplicador deve ser o último recurso para resolver problemas pontuais, não uma compensação para uma calibração base ruim.

8.10 IAC em Desaceleração

A tabela de IAC em desaceleração define a posição da válvula IAC quando o motor está desacelerando em direção à marcha lenta (condição de *coasting* — borboleta fechada, RPM caindo). Essa tabela é distinta da posição base de marcha lenta e funciona em conjunto com o dashpot.

Os eixos da tabela são:

- **Eixo horizontal — RPM:** rotação atual durante a desaceleração.
- **Eixo vertical — CLT:** temperatura do líquido de arrefecimento.
- **Valores — posição da válvula:** abertura em passos, duty cycle ou %.

A ideia é que, durante a desaceleração, a válvula IAC vá gradualmente assumindo uma posição maior conforme o RPM se aproxima do alvo de marcha lenta, preparando-se para sustentar o motor quando a rotação chegar ao regime de idle. Isso evita a situação em que o RPM cai abruptamente e a IAC precisa “correr” para abrir, causando um *undershoot* momentâneo.

i Desaceleração com câmbio manual vs. automático

Em veículos com câmbio manual, a desaceleração com o motorista soltando o acelerador com a marcha engrenada é mais severa (o motor é “freado” pelas rodas). Nesses casos, a IAC de desaceleração deve ser mais agressiva (posições mais altas). Em veículos com câmbio automático, o conversor de torque absorve parte da desaceleração, e a IAC pode ser menos agressiva.

8.11 VE de Marcha Lenta

A ECU evoTech permite configurar uma **tabela VE (Eficiência Volumétrica) dedicada para a região de marcha lenta**. Essa tabela separada é utilizada exclusivamente quando a ECU detecta que o motor está em condição de idle, substituindo os valores da tabela VE principal nessa faixa.

8.11.1 Por que uma VE separada

A tabela VE principal é tipicamente calibrada com foco nas regiões de carga parcial e plena carga, onde a resolução dos eixos é otimizada para essas faixas. A região de marcha lenta ocupa uma área muito pequena da tabela principal (geralmente 1–4 células), o que não oferece resolução suficiente para um ajuste fino.

A VE de marcha lenta permite:

- **Resolução mais fina** na faixa de RPM e carga de idle.
- **Ajuste independente** sem afetar a tabela VE principal.
- **Melhor controle de emissões** na marcha lenta, onde os motores tendem a ser menos eficientes.

8.11.2 Transição VE idle → VE principal

A ECU transiciona suavemente entre a VE de marcha lenta e a VE principal com base nos limiares de detecção de idle (TPS e RPM). A transição é interpolada para evitar descontinuidades na mistura.

Mantenha coerência entre as tabelas

Os valores nas bordas da tabela VE de marcha lenta devem ser próximos dos valores correspondentes na tabela VE principal. Uma diferença grande nas bordas causa um “salto” na mistura durante a transição entre idle e fora-de-idle, perceptível como um engasgo ou oscilação ao sair da marcha lenta.

8.12 Avanço na Marcha Lenta

A curva de avanço de ignição na marcha lenta define o avanço base em função da rotação do motor na região de idle. Essa curva é separada da tabela de avanço principal e permite um controle mais preciso do ponto de ignição nessa faixa crítica.

8.12.1 Valores típicos

RPM	Avanço (° APMS)
600	8
700	10
800	14
850	15
900	16
1000	18
1100	20
1200	22
1500	25

O avanço na marcha lenta tem impacto direto na:

- **Estabilidade rotacional** — mais avanço gera mais torque, mas avanço excessivo pode causar combustão irregular.
- **Temperatura de funcionamento** — menos avanço aumenta a temperatura dos gases de escapamento e pode aquecer o motor e o catalisador mais rapidamente (útil na fase de aquecimento).
- **Consumo de combustível** — o avanço ótimo (MBT) na marcha lenta minimiza o consumo. Atrasar a ignição em relação ao MBT aumenta o consumo.
- **Emissões** — o avanço afeta diretamente as emissões de HC, CO e NOx na marcha lenta.

! Interação com o controle de timing em malha fechada

A curva de avanço na marcha lenta define o valor **base** sobre o qual o controle de timing em malha fechada (Seção 8.8) opera. O controlador de timing adiciona ou subtrai graus em relação a esse base. Portanto, o valor base deve ser calibrado para uma condição “neutra” — nem muito avançado (sem margem para avançar mais) nem muito atrasado (sem margem para atrasar). Uma boa prática é calibrar o avanço base 5–8° abaixo do MBT, deixando margem para o PID avançar quando necessário.

Parte IV

Controles Avançados

9 Corpo de Borboleta Eletrônico (ETB)

O corpo de borboleta eletrônico (*Electronic Throttle Body* — ETB), também conhecido como *drive-by-wire* ou acelerador eletrônico, substitui o cabo mecânico do acelerador por um sistema totalmente eletrônico. O pedal do acelerador é um sensor de posição que envia um sinal elétrico à ECU, e a ECU comanda um motor DC acoplado ao corpo de borboleta para posicionar a borboleta na abertura desejada.

Essa tecnologia, onipresente em veículos modernos desde meados dos anos 2000, oferece vantagens significativas em termos de controle, segurança e integração de sistemas. No entanto, sua calibração exige atenção redobrada, pois erros podem causar desde comportamento errático do acelerador até condições potencialmente perigosas.

As centralinas **evoTech8** e **evoTech12** oferecem suporte completo a controle de ETB. A evoTech4 não possui saída dedicada para drive-by-wire.

❗ Recurso exclusivo evoTech8/12

O controle de corpo de borboleta eletrônico está disponível apenas nas centralinas **evoTech8** e **evoTech12**. A evoTech4 não possui o hardware de ponte H necessário para acionar o motor DC do ETB. Se a sua aplicação utiliza evoTech4, o controle de borboleta deve ser feito por cabo mecânico convencional.

9.1 Teoria do Controle ETB

9.1.1 Arquitetura drive-by-wire

Em um sistema drive-by-wire, a cadeia de comando é:

1. **Pedal do acelerador (APP — Accelerator Pedal Position)** — contém dois sensores de posição redundantes (APP1 e APP2). Cada sensor gera um sinal analógico proporcional à posição do pedal. Os dois sinais têm relação conhecida entre si (tipicamente $APP2 = APP1/2$ ou $APP2 = APP1 \times \text{constante}$) para permitir verificação cruzada.
2. **ECU (processamento)** — lê os sinais do pedal, verifica a coerência entre APP1 e APP2, aplica a tabela de mapeamento pedal → borboleta, calcula a posição alvo do ETB e comanda o motor DC.
3. **Corpo de borboleta eletrônico (ETB)** — contém o motor DC que movimenta a borboleta, uma mola de retorno (*default spring*) que mantém a borboleta em uma posição intermediária de segurança (tipicamente 5–7% de abertura, suficiente para o modo “limp home”), e dois sensores TPS redundantes (TPS1 e TPS2) para feedback de posição.

9.1.2 Vantagens do drive-by-wire

O sistema eletrônico permite funcionalidades impossíveis com cabo mecânico:

- **Controle de tração** — a ECU pode limitar a abertura da borboleta independentemente do pedal para reduzir o torque quando detecta patinação das rodas.

- **Controle de cruzeiro (*cruise control*)** — a ECU mantém a borboleta na posição necessária para manter a velocidade desejada, sem atuador mecânico adicional.
- **Anti-stall** — em situações de carga repentina (engatar marcha, ligar A/C), a ECU pode abrir ligeiramente a borboleta para evitar que o motor apague.
- **Modos de condução** — diferentes curvas de resposta do acelerador (“comfort”, “sport”, “eco”) podem ser selecionadas, alterando a relação pedal → borboleta.
- **Controle integrado de marcha lenta** — o próprio ETB atua como atuador de idle, eliminando a necessidade de válvula IAC separada.
- **Proteção contra sobre-rotação** — a ECU pode fechar a borboleta automaticamente ao atingir o limite de rotação, de forma mais suave que um corte de injeção.

9.1.3 Controle PID do ETB

O posicionamento do ETB é feito por um controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*) em malha fechada:

1. A ECU determina a **posição alvo** do TPS (baseada no pedal, tabelas, limitações).
2. A ECU lê a **posição atual** do TPS (via sensores TPS1/TPS2).
3. O **erro** é calculado (alvo – atual).
4. O controlador PID calcula o **duty cycle** do sinal PWM enviado ao motor DC.
5. O motor DC movimenta a borboleta na direção que reduz o erro.
6. O ciclo se repete a cada iteração do loop de controle (tipicamente 1–5 ms).

O requisito de tempo de resposta para um ETB automotivo é tipicamente inferior a **50 ms** para uma excursão completa (0% a 100% de abertura). Isso exige ganhos PID relativamente agressivos e um motor DC com torque suficiente.

9.1.4 Feed-forward (bias)

O controle puramente PID pode apresentar atraso na resposta, especialmente para movimentos grandes e rápidos da borboleta. Para melhorar a resposta, utiliza-se uma curva de *feed-forward* (também chamada de *bias*): um valor base de duty cycle que é adicionado à saída do PID com base na posição alvo.

A lógica é: para manter a borboleta em 50% de abertura, é necessário um certo duty cycle para vencer a mola e o atrito. Esse valor base pode ser determinado empiricamente e programado na curva de bias. O PID então precisa corrigir apenas a diferença entre o bias e o necessário real, reduzindo o esforço do controlador e acelerando a resposta.

9.1.5 Redundância e segurança

A redundância é **mandatória** em sistemas drive-by-wire:

- **Dois sensores no pedal (APP1 e APP2)** — se os sinais divergirem além de um limiar configurado (tipicamente 5–10%), a ECU entra em modo de emergência.
- **Dois sensores no corpo de borboleta (TPS1 e TPS2)** — mesma lógica de verificação cruzada.
- **Mola de retorno (*default spring*)** — se a alimentação elétrica do motor DC for cortada, a mola posiciona a borboleta em uma abertura de segurança (5–7%), permitindo que o veículo se desloque em velocidade reduzida (*limp home*).
- **Monitoramento contínuo** — a ECU verifica continuamente a coerência dos sinais, a capacidade de o motor DC mover a borboleta, e a correspondência entre posição comandada e posição real.

Nunca desabilite as verificações de redundância

O sistema de verificação cruzada dos sensores do pedal e do ETB existe para proteger contra falhas potencialmente catastróficas. Um sensor de pedal com mau contato pode gerar sinais errôneos que comandam a borboleta para aberturas não intencionadas. As verificações de redundância detectam essa condição e colocam o sistema em modo seguro. Desabilitar essas verificações elimina a última linha de defesa e pode resultar em aceleração descontrolada. **Nunca desabilite a verificação de redundância APP ou TPS.**

9.1.6 Auto-calibração

O procedimento de auto-calibração (*ETB autotune* ou *ETB learn*) é executado quando o sistema é configurado pela primeira vez ou quando o corpo de borboleta é substituído. Durante a auto-calibração, a ECU:

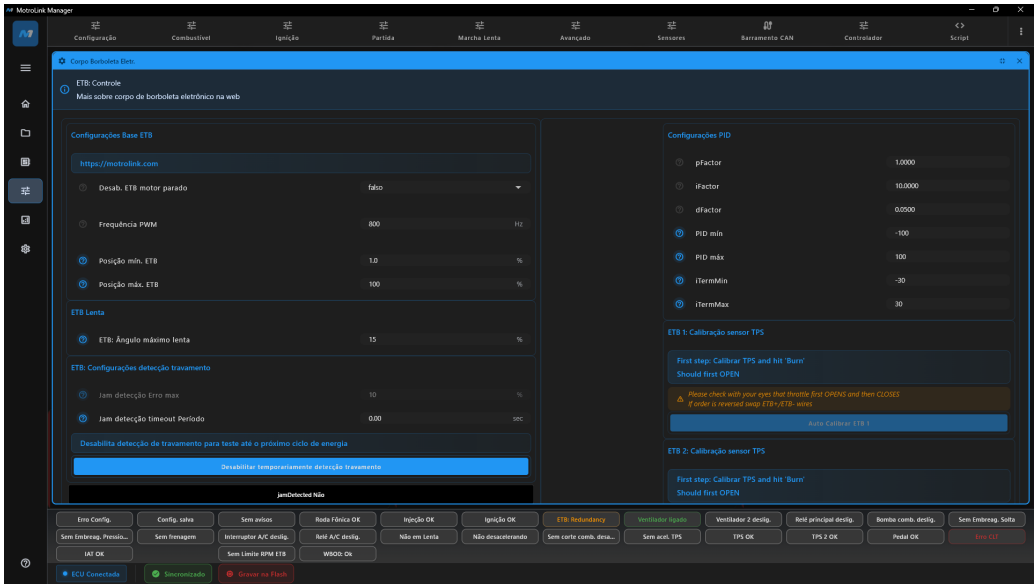
1. Move a borboleta lentamente do batente fechado ao batente aberto, registrando as posições mínima e máxima dos sensores TPS1 e TPS2.
2. Identifica a posição de repouso da mola (*default position*).
3. Caracteriza a relação entre duty cycle e velocidade/posição da borboleta.
4. Calcula os ganhos PID iniciais com base na resposta medida.
5. Verifica a coerência entre TPS1 e TPS2 em toda a faixa.

Execute a auto-calibração antes de dar partida

A auto-calibração do ETB deve ser executada **com o motor desligado**, chave ligada e todos os sensores alimentados. O motor não deve estar girando durante este procedimento. Após a auto-calibração, verifique que a leitura de TPS é 0% com a borboleta no repouso da mola e 100% com a borboleta totalmente aberta (pode ser testado comandando manualmente pelo MotroLink Manager).

9.2 Configuração do ETB

A tela de configuração do ETB no MotroLink Manager concentra todos os parâmetros necessários para colocar o sistema em operação.



Tela de configuração do corpo de borboleta eletrônico (ETB) no MotroLink Manager .

9.2.1 Tipo de atuador

O ETB utiliza um **motor DC com ponte H**. A configuração inclui:

- **Frequência PWM da ponte H** — frequência do sinal PWM que aciona o motor DC. Valores típicos: 5–20 kHz. Frequências mais altas reduzem o ruído audível do motor, mas podem reduzir a eficiência. O valor padrão é 10 kHz.
- **Duty cycle máximo** — limite superior do duty cycle enviado ao motor. Tipicamente 95–98%. Limitar o duty cycle protege o motor contra superaquecimento.
- **Direção** — define a polaridade do motor (qual sentido de corrente abre e qual fecha a borboleta). Se a borboleta se mover no sentido contrário ao esperado, inverta a direção.

9.2.2 Ganhos PID

Os ganhos PID do ETB controlam o comportamento dinâmico do posicionamento:

Ganho Proporcional (P): resposta proporcional ao erro de posição. Valores típicos: 5–20. Valores altos: resposta rápida mas possível overshoot e oscilação. Valores baixos: resposta lenta, posição pode não atingir o alvo.

Ganho Integral (I): elimina erro estacionário acumulando o erro ao longo do tempo. Valores típicos: 1–10. Essencial para que a borboleta atinja exatamente a posição alvo e se mantenha nela contra a força da mola. Valores muito altos causam overshoot e oscilação de baixa frequência.

Ganho Derivativo (D): amortece oscilações respondendo à taxa de variação do erro. Valores típicos: 0,1–2,0. Valores muito altos amplificam ruído dos sensores e podem causar vibração de alta frequência no motor DC.

Calibração dos ganhos PID do ETB

A calibração dos ganhos PID do ETB é melhor feita com o motor desligado, aplicando degraus de posição (por exemplo, de 0% para 50% e de volta) e observando a resposta no datalogger. O objetivo é uma resposta rápida (< 50 ms para atingir o alvo), sem overshoot significativo ($< 3\%$) e sem oscilação. Comece com o ganho P, aumente até observar overshoot, depois adicione D para amortecer. Por último, ajuste I para eliminar o erro estacionário. A auto-calibração fornece ganhos iniciais razoáveis que servem como ponto de partida.

9.2.3 Verificação de redundância TPS

A configuração de redundância inclui:

- **Relação TPS1/TPS2** — a relação esperada entre os dois sensores (ex.: $TPS2 = TPS1/2$). A ECU verifica continuamente se a relação se mantém.
- **Tolerância de divergência** — desvio máximo permitido entre TPS1 e TPS2 antes de declarar falha. Valores típicos: 5–10% da faixa total. Tolerâncias muito apertadas podem causar alarmes falsos; muito frouxas comprometem a segurança.
- **Ação em caso de falha** — o que a ECU faz quando detecta divergência: modo limp home (borboleta na posição da mola), redução de potência, ou desligamento do motor.
- **Tempo de debounce** — tempo mínimo de divergência antes de declarar falha (evita alarmes por ruído transitório). Típico: 100–500 ms.

9.2.4 Verificação de redundância APP (pedal)

Análoga à verificação TPS:

- **Relação APP1/APP2** — relação esperada entre os dois sensores do pedal.
- **Tolerância de divergência** — desvio máximo permitido.
- **Ação em caso de falha** — tipicamente, fechar a borboleta para a posição de marcha lenta ou posição da mola.
- **Faixa de tensão válida** — a ECU monitora se os sinais de APP1 e APP2 estão dentro de uma faixa de tensão plausível. Sinais fora da faixa (fio solto, curto ao terra ou à alimentação) são detectados imediatamente.

Teste as falhas intencionalmente

Após configurar o sistema ETB, teste deliberadamente as condições de falha: desconecte um sensor APP, desconecte um sensor TPS, e verifique que a ECU entra no

modo de segurança correto. Esse teste deve ser feito com o motor desligado ou em marcha lenta, em ambiente seguro. É preferível descobrir uma falha de configuração no teste do que em uma situação real de emergência.

9.3 Curva de Bias (Feed-Forward)

A curva de bias define o **duty cycle base** que a ECU envia ao motor DC do ETB para cada posição alvo de TPS, **antes** da atuação do PID. Esse valor serve como ponto de partida para o controlador, reduzindo o trabalho do PID e acelerando a resposta.

9.3.1 Lógica da curva

A curva de bias é unidimensional:

- **Eixo — posição alvo de TPS (%)**: de 0% a 100%.
- **Valores — duty cycle base (%)**: o valor de duty cycle que, sozinho, manteria a borboleta aproximadamente na posição desejada.

Valores típicos:

TPS alvo (%)	Bias - duty cycle (%)
0	-15 a -10
5	0
10	8
20	15
30	22
50	35
70	50
90	70
100	85

Valores negativos de bias

Valores negativos de duty cycle significam que o motor DC deve ser acionado no sentido de **fechar** a borboleta. Na posição 0% (totalmente fechada), um bias negativo é necessário para vencer a mola de retorno que tende a manter a borboleta na posição de repouso (5–7%). Sem esse bias negativo, a borboleta não consegue fechar completamente contra a mola.

9.3.2 Como calibrar a curva de bias

1. **Desabilite temporariamente o PID** (ou configure todos os ganhos para zero).
2. **Aplique duty cycles fixos** ao motor DC e registre a posição TPS resultante para cada valor.

- 3. **Construa a curva inversa:** para cada posição TPS desejada, identifique o duty cycle necessário.
- 4. **Preencha a curva de bias** com esses valores.
- 5. **Reabilite o PID** e verifique que a borboleta atinge as posições alvo rapidamente e sem oscilação.

A auto-calibração preenche o bias automaticamente

O procedimento de auto-calibração do ETB (descrito na Seção 9.1) inclui a caracterização da curva de bias. Na maioria dos casos, os valores gerados pela auto-calibração são suficientes. A calibração manual do bias é necessária apenas quando se deseja refinar a resposta ou quando o ETB apresenta comportamento não linear significativo (atrito excessivo, mola desgastada).

9.4 Tabela Pedal → Borboleta

A tabela de mapeamento pedal → borboleta é o elemento central da “personalidade” do acelerador. Ela define, para cada combinação de **posição do pedal (APP)** e **rotação do motor (RPM)**, qual será a **posição alvo do TPS** (abertura da borboleta).



Tabela de mapeamento pedal → borboleta: RPM (eixo horizontal) × posição do pedal (eixo vertical) → abertura alvo da borboleta.

9.4.1 Lógica da tabela

- **Eixo horizontal — RPM:** rotação do motor. Permite que a relação pedal/borboleta varie com a rotação.
- **Eixo vertical — posição do pedal (APP %):** de 0% (pedal solto) a 100% (pedal a fundo).
- **Valores — abertura alvo da borboleta (TPS %):** posição desejada do ETB.

9.4.2 Não-linearidade intencional

Na maioria das aplicações, a relação pedal $\rightarrow$ borboleta **não é linear** (1:1). As razões incluem:

- **Suavidade em baixa abertura** — nos primeiros 10–20% do curso do pedal, a borboleta abre proporcionalmente menos do que o pedal. Isso torna o acelerador mais progressivo e controlável em manobras, trânsito e velocidade constante. Uma relação 1:1 nessa faixa torna o carro “nervoso” e difícil de dosar.
- **Resposta rápida em alta abertura** — nos últimos 20–30% do curso do pedal, a borboleta pode abrir mais rapidamente, proporcionando resposta agressiva para ultrapassagens e retomadas.
- **Variação por RPM** — em baixas rotações, uma abertura menor da borboleta já gera fluxo de ar significativo (vácuo alto no coletor). Em altas rotações, é necessário mais abertura para o mesmo efeito relativo. A tabela bidimensional permite compensar esse comportamento.

9.4.3 Modos de condução

A ECU evoTech permite armazenar múltiplas tabelas de mapeamento pedal $\rightarrow$ borboleta, selecionáveis por uma entrada digital (botão no painel, seletor rotativo) ou via comunicação CAN. Os modos típicos são:

Comfort / Eco: resposta suave e progressiva. A borboleta abre lentamente nos primeiros 50% do pedal. Ideal para uso urbano, economia de combustível e conforto.

Normal: equilíbrio entre suavidade e resposta. Configuração padrão.

Sport: resposta mais direta e agressiva. A borboleta abre mais rapidamente para a mesma posição do pedal. Ideal para condução esportiva.

Track / Race: relação próxima de 1:1 ou até mais agressiva. Toda a faixa do pedal é utilizada para controle preciso do torque. Indicado apenas para pista.

Modos de condução e segurança

A troca de modo de condução não deve causar alteração abrupta na posição da borboleta. A ECU evoTech implementa uma transição suave (*fade*) entre os modos, interpolando entre a posição atual e a nova posição alvo ao longo de 0,5–2,0 segundos. Se o motorista está com 50% de pedal em modo “Comfort” (borboleta a 25%) e muda para “Sport” (borboleta a 45%), a borboleta move-se gradualmente entre as duas posições.

9.4.4 Pedal a 100% deve abrir 100%?

Nem sempre. Em algumas aplicações, pode ser desejável que o pedal a 100% resulte em abertura inferior a 100%:

- **Motores turbo com controle de boost** — a ECU pode limitar a abertura máxima da borboleta como parte da estratégia de controle de pressão do turbo.

- **Limitação de potência** — em veículos com diferentes níveis de potência habilitados (como em sistemas anti-furto ou modos valet), a abertura máxima pode ser limitada.
- **Proteção** — em condições de temperatura excessiva ou pressão de óleo baixa, a abertura máxima pode ser reduzida como proteção.

9.5 Limitação de Velocidade

A **limitação de velocidade do ETB** define a taxa máxima de abertura e fechamento da borboleta em graus por segundo ou porcentagem por segundo. Essa funcionalidade tem dois objetivos:

9.5.1 Proteção mecânica

Movimentos extremamente rápidos da borboleta geram cargas mecânicas elevadas no motor DC, na engrenagem redutora e no eixo da borboleta. Limitar a velocidade máxima prolonga a vida útil do conjunto. Valores típicos de limite: 500–2000 %/s para abertura e 500–1500 %/s para fechamento.

9.5.2 Suavização da resposta

A limitação de velocidade pode ser usada para suavizar a resposta do acelerador, especialmente em veículos de uso cotidiano. Mesmo que a tabela pedal → borboleta solicite uma abertura instantânea de 30% para 80%, o limitador de velocidade faz com que a borboleta se mova gradualmente, reduzindo o “solavanco” na transmissão.

Parâmetro	Valor típico
Velocidade máxima de abertura	1000–2000 %/s
Velocidade máxima de fechamento	800–1500 %/s
Velocidade máxima em modo Sport	2000–5000 %/s
Velocidade máxima em modo Eco	500–1000 %/s



Fechamento rápido e vácuo

Um fechamento muito rápido da borboleta (“snap close”) gera um pico de vácuo instantâneo no coletor de admissão, que pode causar uma leitura momentaneamente incorreta do sensor MAP e afetar o cálculo de combustível. Além disso, em motores turbo, o fechamento abrupto pode causar *compressor surge*. Limitar a velocidade de fechamento a valores razoáveis (800–1500 %/s) evita esses problemas.



Desabilitando a limitação para competição

Em aplicações de competição pura, onde o tempo de resposta do acelerador é crítico, a limitação de velocidade pode ser configurada com valores muito altos (5000–10000 %/s), efetivamente desabilitando-a. No entanto, isso reduz a vida útil do ETB e pode causar os problemas de vácuo mencionados acima. Use com critério.

9.6 ETB #2 Trim

Em motores com dois corpos de borboleta eletrônicos (tipicamente motores V6, V8, V10 ou V12 com um ETB por bancada), a ECU evoTech12 suporta o controle independente de dois ETBs. O **ETB #2 Trim** é uma tabela de correção que ajusta a posição do segundo ETB em relação ao primeiro.

9.6.1 Por que é necessário um trim

Mesmo com dois ETBs idênticos, pequenas diferenças mecânicas (atrito, tensão da mola, desgaste) e diferenças nos coletores de admissão (comprimento dos dutos, distribuição dos cilindros) podem resultar em distribuição desigual de ar entre as bancadas. O trim permite compensar essas diferenças.

9.6.2 Tabela de trim

A tabela de trim é bidimensional:

- **Eixo horizontal — RPM:** rotação do motor.
- **Eixo vertical — TPS alvo (%):** posição alvo do ETB #1.
- **Valores — correção (%):** valor adicionado ou subtraído da posição do ETB #2 em relação ao ETB #1.

Exemplo: se o ETB #1 está em 50% de abertura e o trim é de +2%, o ETB #2 será comandado para 52%.

9.6.3 Valores típicos

Na maioria das aplicações, os valores de trim são pequenos:

Condição	Trim típico (%)
Marcha lenta	-2 a +2
Carga parcial	-1 a +1
Plena carga	-3 a +3
Transição (aceleração)	0 a +2

9.6.4 Calibração do trim

O procedimento para calibrar o trim é:

1. **Com o motor em funcionamento e sonda lambda individual por bancada,** observe a relação ar/combustível de cada bancada em diversas condições de RPM e carga.
2. **Diferenças consistentes de AFR entre bancadas** indicam distribuição desigual de ar.
3. Se a bancada #2 está mais rica que a bancada #1, o ETB #2 está abrindo mais do que deveria (ou o ETB #1 menos). Aplique um trim negativo ao ETB #2.

4. Se a bancada #2 está mais pobre, aplique trim positivo.
5. **Refine iterativamente** até que as duas bancadas apresentem AFR semelhante em toda a faixa de operação.

❗ Trim é ajuste fino, não compensação de defeito

Se o trim necessário for superior a $\pm 5\%$ em qualquer condição, isso indica um problema mecânico (ETB com atrito excessivo, mola diferente, vazamento de ar em um dos coletores) que deve ser investigado e corrigido fisicamente. O trim é uma ferramenta de ajuste fino para diferenças residuais, não uma compensação para hardware defeituoso.

i Recurso exclusivo evoTech12

O controle simultâneo de dois ETBs com trim independente é uma funcionalidade exclusiva da **evoTech12**. A evoTech8, apesar de suportar um ETB, não possui a segunda saída de ponte H necessária para controlar um segundo corpo de borboleta. Para aplicações V8 com dois ETBs e evoTech8, é necessário interligar mecanicamente os dois ETBs ou utilizar a evoTech12.

10 Controle de Boost

O controle de boost é uma das funcionalidades mais críticas em motores turboalimentados. Esta seção aborda todos os aspectos da configuração do sistema de controle de pressão de admissão disponível no MotroLink Manager, desde a teoria fundamental de funcionamento do turbocompressor até a calibração avançada de malha fechada com PID e tabelas de blend.

10.1 Teoria de Funcionamento

10.1.1 O Turbocompressor

O turbocompressor é um dispositivo de indução forçada composto por dois elementos principais: a turbina e o compressor, conectados por um eixo comum. A turbina é posicionada no coletor de escape e converte a energia cinética e térmica dos gases de escape em energia mecânica rotacional. Essa energia é transmitida pelo eixo ao compressor, localizado no lado da admissão, que comprime o ar atmosférico e o força para dentro do coletor de admissão a uma pressão superior à atmosférica.

A pressão gerada acima da pressão atmosférica é denominada **boost** ou **pressão de sobrealimentação**. A quantidade de boost produzida depende de diversos fatores:

- **Vazão de gases de escape:** Determinada pela rotação do motor (RPM), carga e eficiência volumétrica. Quanto maior a vazão de escape, mais energia é disponibilizada para a turbina.
- **Geometria da turbina:** O A/R (razão área/raio) da carcaça da turbina define a relação entre resposta (spool) e capacidade de vazão. Um A/R menor gera boost mais rapidamente em baixas rotações, mas restringe o fluxo em altas rotações.
- **Geometria do compressor:** O mapa do compressor define a faixa de operação eficiente, delimitada pela linha de surge (limite esquerdo) e pela linha de choke (limite direito).
- **Contrapressão de escape:** Restrições no sistema de escape (catalisadores, silenciadores) afetam a eficiência da turbina.
- **Temperatura do ar de admissão:** Ar mais quente é menos denso, reduzindo a eficiência do compressor e a potência resultante.

10.1.2 A Wastegate

A wastegate é uma válvula de desvio (bypass) que permite que uma porção dos gases de escape contorne a turbina, limitando assim a velocidade do turbo e, consequentemente, a pressão de boost. Existem dois tipos principais:

- **Wastegate interna (integral):** Integrada à carcaça da turbina, utiliza uma aba (flap) controlada por um atuador pneumático. É o tipo mais comum em turbos de fábrica e de pequeno a médio porte.
- **Wastegate externa:** Uma válvula separada instalada no coletor de escape antes da turbina. Oferece maior capacidade de fluxo de bypass e controle mais preciso, sendo preferida em aplicações de alta potência.

O atuador pneumático da wastegate possui uma mola interna calibrada para uma pressão específica (pressão base). Quando a pressão de boost atinge essa pressão, o atuador começa a abrir a wastegate. Sem controle eletrônico, a pressão máxima de boost é determinada unicamente pela mola do atuador e pelas características aerodinâmicas do sistema.

10.1.3 Controle por Solenoide

O controle eletrônico de boost utiliza uma válvula solenoide (também chamada de boost control solenoid ou BCS) para modular a pressão de referência que chega ao atuador da wastegate. O solenoide é instalado na linha pneumática entre a fonte de pressão (geralmente o coletor de admissão) e o atuador da wastegate.

O princípio de funcionamento é baseado em **modulação por largura de pulso (PWM)**, também chamada de **duty cycle**:

- **0% de duty cycle:** O solenoide está completamente fechado. Toda a pressão do coletor é direcionada ao atuador, que abre a wastegate na pressão base da mola. Este é o estado de boost mínimo controlado.
- **100% de duty cycle:** O solenoide está completamente aberto, ventando toda a pressão de referência para a atmosfera. O atuador não recebe sinal pneumático, e a wastegate permanece fechada. O turbo gera o máximo de boost possível (limitado apenas pela capacidade do turbo e do motor).
- **Valores intermediários:** O solenoide abre e fecha rapidamente (tipicamente a 30–50 Hz), criando uma pressão média de referência que permite controle proporcional da wastegate.

Risco de Overboosting

A operação com duty cycle excessivo ou configuração incorreta do controle de boost pode resultar em pressões de sobrealimentação muito acima dos limites estruturais do motor. Overboosting severo pode causar destruição de pistões, bielas, junta do cabeçote e até mesmo do bloco do motor. Sempre inicie a calibração com valores conservadores de duty cycle (30–40%) e aumente gradualmente, monitorando a pressão de boost real em tempo real pelo MotroLink Manager .

10.1.4 Malha Aberta vs. Malha Fechada

O controle de boost pode operar em dois modos fundamentais:

- **Malha Aberta (Open Loop):** O duty cycle do solenoide é determinado diretamente por uma tabela de calibração (tipicamente RPM × Carga ou RPM × TPS). Não há realimentação — o sistema não monitora a pressão de boost real para corrigir o duty cycle. Este modo é mais simples, mas menos preciso, pois não compensa variações de temperatura, altitude ou degradação de componentes.
- **Malha Fechada (Closed Loop):** O sistema utiliza um sensor MAP (pressão absoluta do coletor) para medir a pressão de boost real e a compara com um valor alvo (target). Um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) calcula a correção

necessária no duty cycle para manter o boost no valor desejado. Este modo oferece controle mais preciso e adaptável, sendo recomendado para a maioria das aplicações.

Na prática, muitos calibradores utilizam uma combinação dos dois modos: a malha aberta fornece um duty cycle base (feed-forward), e a malha fechada aplica correções finas sobre esse valor base. O MotroLink Manager suporta ambas as estratégias.

10.1.5 Variação de Boost com RPM, Temperatura e Altitude

A pressão de boost não é constante em todas as condições de operação. Diversos fatores causam variações naturais:

- **RPM:** Em baixas rotações, a vazão de gases de escape é insuficiente para gerar boost significativo. À medida que o RPM aumenta, a vazão cresce e o turbo atinge sua faixa de operação eficiente. Em rotações muito altas, a eficiência do compressor pode diminuir dependendo do tamanho do turbo.
- **Temperatura do ar (IAT):** Ar mais quente reduz a densidade do ar admitido e aumenta a temperatura de saída do compressor, reduzindo a eficiência. Em dias quentes, o mesmo duty cycle pode produzir menos boost efetivo.
- **Temperatura do líquido de arrefecimento (CLT):** Um motor frio opera com diferentes características de combustão e eficiência volumétrica, afetando indiretamente a produção de boost.
- **Altitude (pressão barométrica):** Em altitudes elevadas, a pressão atmosférica é menor, o que significa que o compressor precisa trabalhar mais para atingir a mesma pressão absoluta. Além disso, a menor densidade do ar reduz a vazão mássica de escape, diminuindo a energia disponível para a turbina.

Por essas razões, o controle de boost deve incluir tabelas de correção para temperatura e, idealmente, para pressão barométrica.

10.1.6 Surge do Compressor e Limites de Overspin

❗ Surge do Compressor

O surge (ou stall) do compressor ocorre quando a vazão de ar pelo compressor cai abaixo do limite mínimo estável para uma determinada relação de pressão. Isso acontece tipicamente durante fechamento abrupto da borboleta em condições de alto boost (por exemplo, durante uma troca de marcha rápida). O ar pressurizado no coletor de admissão tenta fluir de volta pelo compressor, causando oscilações violentas de pressão e fluxo reverso. O surge repetido pode causar danos graves ao eixo, mancais e rodas do turbo. Para mitigar o surge, utiliza-se uma válvula de alívio (blow-off valve) ou válvula de recirculação que descarrega a pressão do coletor quando a borboleta fecha.

O **overspin** ocorre quando o turbocompressor gira além de sua velocidade máxima projetada. Isso pode acontecer em condições de alta vazão de escape com wastegate inadequada ou mal configurada. O overspin pode causar falha catastrófica do turbo, incluindo fragmentação da roda do compressor. É essencial que o controle de boost esteja corretamente calibrado para evitar que o turbo opere além de seus limites.

10.2 Configurações Gerais

As configurações gerais do controle de boost definem os parâmetros fundamentais de operação do sistema. Esses parâmetros devem ser configurados antes de qualquer ajuste nas tabelas de malha aberta ou fechada.

10.2.1 Habilitação do Controle de Boost

O primeiro passo é habilitar o controle de boost no MotroLink Manager . Quando desabilitado, nenhuma saída de controle de boost é ativada e o turbo opera apenas com a pressão base da mola da wastegate.

- **Boost Control Enable:** Habilita ou desabilita todo o sistema de controle de boost. Quando habilitado, o sistema passa a controlar a saída de boost conforme os parâmetros configurados.

10.2.2 RPM Mínimo de Ativação

O controle de boost só é ativado acima de um RPM mínimo configurável. Abaixo deste valor, o duty cycle do solenoide é mantido em 0% (ou no valor de repouso configurado), permitindo que a wastegate opere livremente.

- **Minimum RPM:** Define o RPM abaixo do qual o controle de boost é desativado. Valores típicos situam-se entre 2000 e 3000 RPM. Configurar um valor muito baixo pode causar comportamento errático do boost na faixa de spool do turbo.

RPM Mínimo

Recomenda-se configurar o RPM mínimo ligeiramente abaixo do ponto onde o turbo começa a gerar boost positivo. Isso garante que o controle esteja ativo antes que a pressão comece a subir, evitando overshoot inicial.

10.2.3 Tipo de Atuador

O MotroLink Manager suporta dois tipos de atuadores para controle de boost:

- **Solenoide PWM (Pneumático):** Válvula solenoide convencional de 2 ou 3 vias que modula a pressão pneumática na linha da wastegate. Este é o tipo mais comum e utiliza um sinal PWM de frequência configurável (tipicamente 30–50 Hz). A saída é configurada como duty cycle (0–100%).
- **Wastegate Eletrônica (Motor DC / Stepper):** Alguns motores modernos utilizam uma wastegate acionada diretamente por um motor DC ou motor de passo, eliminando a linha pneumática. Esse tipo requer configuração específica de PID e bias, detalhada na Subseção [10.7](#).

10.2.4 Configuração de Saída

A saída de controle de boost deve ser atribuída a um pino de saída auxiliar do MotroLink Manager :

- **Output Pin:** Selecione o pino auxiliar ao qual o solenoide de boost está conectado.
- **PWM Frequency:** Frequência do sinal PWM para o solenoide. Valores típicos:
 - 30 Hz: Solenoides de resposta lenta, aplicações de baixa precisão.
 - 33 Hz: Valor padrão para a maioria dos solenoides de boost aftermarket.
 - 50 Hz: Solenoides de resposta rápida, melhor resolução de controle.
- **Duty Cycle Máximo:** Limite superior do duty cycle permitido. Recomenda-se iniciar com um limite de 60–70% e aumentar gradualmente conforme necessário.
- **Duty Cycle Mínimo:** Duty cycle mínimo quando o controle está ativo. Pode ser usado para compensar a zona morta do solenoide.

Configuração de Saída

Atribuir o controle de boost ao pino de saída errado pode resultar em ativação acidental de outro atuador ou em ausência total de controle de boost. Verifique cuidadosamente a pinagem do chicote antes de configurar a saída. Um erro de configuração pode resultar em overboosting descontrolado.

10.3 Malha Aberta

O controle de boost em malha aberta (open loop) define o duty cycle do solenoide diretamente a partir de tabelas de calibração, sem realimentação de sensor de pressão. Este modo pode ser utilizado sozinho ou como base (feed-forward) para o controle em malha fechada.

10.3.1 Tabela de Duty Cycle: RPM × Carga

A tabela principal de malha aberta mapeia o duty cycle do solenoide em função do RPM e da carga do motor (tipicamente TPS ou MAP estimado):

- **Eixo X:** RPM do motor (tipicamente de 1000 a 8000 RPM, com incrementos de 500 RPM).
- **Eixo Y:** Carga do motor (TPS de 0 a 100% ou pressão do coletor em kPa).
- **Valores da tabela:** Duty cycle do solenoide em porcentagem (0–100%).

Diretrizes para preenchimento da tabela:

- Em baixas rotações (abaixo do ponto de spool), utilize valores baixos (0–20%), pois o turbo não gera boost significativo nessa faixa.
- Na faixa de spool (tipicamente 2500–4000 RPM dependendo do turbo), aumente gradualmente o duty cycle para acompanhar a subida natural do boost.
- Em altas rotações, o duty cycle pode ser reduzido se o turbo tender a gerar excesso de boost.
- Em cargas parciais (TPS baixo), mantenha duty cycles baixos para evitar boost excessivo em condições de aceleração parcial.

i Calibração Progressiva

Nunca preencha a tabela de malha aberta com valores altos sem teste prévio. Comece com valores conservadores (20–30% na faixa de operação principal) e aumente gradualmente em incrementos de 5%, monitorando a pressão de boost real a cada ajuste.

10.3.2 Curva Aditiva por Marcha (Gear Adder)

A curva de aditivo por marcha permite ajustar o duty cycle de boost com base na marcha atual do câmbio. Isso é útil porque:

- Marchas mais baixas (1ª e 2ª) têm maior multiplicação de torque, podendo causar perda de tração com boost excessivo.
- Marchas mais altas mantêm o motor em rotação mais alta por mais tempo, potencialmente gerando mais boost.
- **Formato:** Tabela unidimensional — Marcha → Adder (%).
- **Valores típicos:**
 - 1ª marcha: –15% a –10% (reduz boost para preservar tração).
 - 2ª marcha: –10% a –5%.
 - 3ª marcha: 0% (referência).
 - 4ª marcha: 0% a +5%.
 - 5ª marcha: +5% a +10%.
 - 6ª marcha: +5% a +10%.

O valor final do duty cycle de malha aberta é: $Duty_{final} = Duty_{tabela} + Adder_{marcha}$.

10.3.3 Tabelas de Boost Blend (Malha Aberta)

As tabelas de boost blend permitem interpolação entre dois conjuntos de calibração de malha aberta, possibilitando, por exemplo, um modo “econômico” e um modo “performance”:

- **Boost Blend Table 1 (Open Loop):** Primeira tabela de duty cycle alternativa. Pode ser ativada por uma entrada digital (interruptor de modo) ou por condições lógicas.
- **Boost Blend Table 2 (Open Loop):** Segunda tabela de duty cycle alternativa. Permite um terceiro modo de operação.
- **Bias Curve:** Curva que define a porcentagem de interpolação entre a tabela base e a tabela blend. 0% = tabela base pura, 100% = tabela blend pura. A curva de bias pode ser indexada por RPM, TPS, ou outra variável.

O duty cycle resultante é calculado como:

$$Duty_{blend} = Duty_{base} \times (1 - Bias) + Duty_{blend_table} \times Bias$$

Detalhes adicionais sobre as tabelas de blend são apresentados na Subseção 10.8.

10.4 Malha Fechada PID

O controle em malha fechada utiliza um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para manter a pressão de boost no valor alvo configurado. O PID compara continuamente a pressão de boost real (medida pelo sensor MAP) com a pressão alvo e calcula uma correção no duty cycle do solenoide.

10.4.1 Conceito do Controlador PID

O controlador PID é composto por três termos:

- **Proporcional (P):** A correção é proporcional ao erro atual (diferença entre alvo e valor real). Um ganho P alto gera resposta rápida, mas pode causar oscilação (overshoot). Valores típicos: 0,5 a 5,0.
- **Integral (I):** A correção é proporcional ao acúmulo do erro ao longo do tempo. O termo integral elimina o erro em regime permanente (offset). Valores típicos: 0,01 a 1,0. Um ganho I excessivo causa oscilação lenta (hunting).
- **Derivativo (D):** A correção é proporcional à taxa de variação do erro. O termo derivativo amortece a resposta, reduzindo overshoot. Valores típicos: 0,0 a 2,0. Valores muito altos tornam o sistema sensível a ruído do sensor.

A saída do PID é somada ao duty cycle de malha aberta (feed-forward):

$$\text{Duty}_{total} = \text{Duty}_{OL} + (K_p \times e) + (K_i \times \int e dt) + (K_d \times \frac{de}{dt})$$

Onde e é o erro (Alvo – Real).

10.4.2 Ganhos PID

No MotroLink Manager, os ganhos PID são configurados individualmente:

- **P Gain (Proporcional):** Controla a agressividade da resposta ao erro instantâneo. Comece com um valor baixo (1,0) e aumente até obter uma resposta razoável sem oscilação excessiva.
- **I Gain (Integral):** Controla a velocidade de eliminação do erro em regime permanente. Comece com um valor muito baixo (0,05) e aumente gradualmente. Valores excessivos causam overshoot e oscilação de período longo.
- **D Gain (Derivativo):** Controla o amortecimento da resposta. Em muitos sistemas de boost, o ganho D pode ser mantido em 0 ou em valores muito baixos (0,1–0,5), pois o ruído do sensor MAP pode causar instabilidade.

Calibração PID

A calibração dos ganhos PID requer testes em dinamômetro ou em condições controladas. Ajustar os ganhos PID em estrada sem monitoramento adequado pode resultar em overboosting ou oscilações perigosas de pressão. Utilize sempre o datalog do MotroLink Manager para analisar a resposta do controlador antes de considerar a calibração finalizada.

10.4.3 Faixa de Operação (Operating Range)

O controlador PID opera apenas dentro de uma faixa de boost configurável:

- **PID Activation Pressure:** Pressão mínima de boost (em kPa) acima da qual o PID entra em operação. Abaixo desse valor, apenas a malha aberta controla o duty cycle. Valores típicos: 100–120 kPa (absoluto).
- **PID Deactivation Pressure:** Pressão abaixo da qual o PID é desativado e retorna ao controle puramente de malha aberta. Geralmente configurado igual ou ligeiramente abaixo da pressão de ativação para criar histerese.

10.4.4 Limite de Duty Cycle do PID

O controlador PID possui limites de correção para evitar atuações extremas:

- **PID Max Duty Adder:** Correção máxima positiva que o PID pode adicionar ao duty cycle base. Limita a atuação do PID para evitar overboosting. Valores típicos: 20–40%.
- **PID Min Duty Adder:** Correção máxima negativa que o PID pode subtrair do duty cycle base. Limita a redução de duty para manter resposta mínima do turbo. Valores típicos: –30% a –50%.
- **Integral Windup Limit:** Limite máximo do acúmulo integral, evitando que o termo I acumule valores excessivos durante transientes prolongados (por exemplo, durante o spool do turbo onde o erro é grande por um período estendido).

10.5 Boost Alvo

A tabela de boost alvo define a pressão de sobrealimentação desejada em função das condições de operação do motor. Este valor é usado como referência (setpoint) pelo controlador PID em malha fechada.

10.5.1 Tabela de Boost Alvo: RPM × TPS

A tabela principal de boost alvo mapeia a pressão desejada em função do RPM e da posição da borboleta (TPS):

- **Eixo X:** RPM do motor.
- **Eixo Y:** TPS (posição da borboleta) em porcentagem (0–100%).
- **Valores da tabela:** Pressão alvo de boost em kPa (pressão absoluta) ou kPa gauge (relativa à atmosférica), conforme configuração do sistema.

Diretrizes de calibração:

- **TPS baixo (0–30%):** Utilize valores de boost alvo baixos ou até vácuo. O motorista não está solicitando potência máxima, portanto o boost deve ser mínimo.
- **TPS médio (30–70%):** Aumente o boost alvo proporcionalmente à posição da borboleta. Isso proporciona uma entrega de potência progressiva e controlável.

- **TPS alto (70–100%):** Configure o boost alvo máximo desejado para cada faixa de RPM. Este é o valor de pressão que o motor deve atingir em aceleração plena.
- **RPM baixo:** O boost alvo deve ser moderado em baixas rotações para evitar detonação e estresse excessivo no trem de força.
- **RPM alto:** O boost alvo pode ser reduzido em rotações muito altas se o turbo estiver próximo ao limite de eficiência ou para proteger o motor.

Boost Alvo Excessivo

Configurar um boost alvo acima da capacidade estrutural do motor pode causar falha catastrófica. O boost alvo deve ser definido com base nos limites conhecidos do motor (junta do cabeçote, pistões, bielas, bloco), da capacidade do turbo e da qualidade do combustível utilizado. Nunca configure um boost alvo sem conhecer os limites do hardware.

10.5.2 Unidade de Pressão

O MotroLink Manager permite configurar a unidade de pressão para a tabela de boost alvo:

- **kPa absoluto (kPa abs):** Pressão total incluindo a atmosférica. A pressão atmosférica ao nível do mar é aproximadamente 101,3 kPa. Um boost alvo de 200 kPa abs equivale a aproximadamente 1,0 bar gauge.
- **kPa gauge (kPa rel):** Pressão acima da atmosférica. Um boost alvo de 100 kPa gauge equivale a 1,0 bar acima da pressão atmosférica.

Recomendação de Unidade

Recomenda-se utilizar kPa absoluto (abs) para a tabela de boost alvo, pois essa referência é independente de variações na pressão barométrica (altitude). Isso torna a calibração mais consistente em diferentes localidades.

10.6 Correções

As tabelas de correção compensam variações nas condições ambientais e do motor que afetam a produção e o controle de boost. Essas correções são aplicadas ao duty cycle de malha aberta ou ao boost alvo de malha fechada.

10.6.1 Multiplicador por Temperatura do Líquido de Arrefecimento (CLT Multiplier)

Esta tabela aplica um fator multiplicativo ao duty cycle ou ao boost alvo com base na temperatura do líquido de arrefecimento:

- **Formato:** Tabela unidimensional — CLT (extdegreeC) → Multiplicador (%).
- **Propósito:** Reduzir o boost em motor frio (para proteger componentes e evitar detonação com combustão ineficiente) e restaurar o boost total quando o motor atinge a temperatura de operação.

- **Valores típicos:**

- 0 extdegreeC: 50% (metade do boost).
- 40 extdegreeC: 70%.
- 60 extdegreeC: 85%.
- 80 extdegreeC: 100% (boost total).
- 100 extdegreeC e acima: 100% ou redução para proteção contra superaquecimento.

10.6.2 Multiplicador por Temperatura do Ar de Admissão (IAT Multiplier)

Esta tabela aplica um fator multiplicativo com base na temperatura do ar de admissão:

- **Formato:** Tabela unidimensional — IAT (extdegreeC) → Multiplicador (%).
- **Propósito:** Reduzir o boost quando o ar de admissão está excessivamente quente, pois ar quente é mais propenso a causar detonação e reduz a eficiência do motor.
- **Valores típicos:**
 - 20 extdegreeC: 100% (condição ideal).
 - 40 extdegreeC: 95%.
 - 50 extdegreeC: 90%.
 - 60 extdegreeC: 80%.
 - 70 extdegreeC e acima: 70% ou menos.

10.6.3 Aditivo por Temperatura do Líquido de Arrefecimento (CLT Adder)

Semelhante ao multiplicador CLT, mas aplica um valor aditivo (em kPa ou % de duty) em vez de um fator multiplicativo:

- **Formato:** Tabela unidimensional — CLT (extdegreeC) → Adder (kPa ou %).
- **Propósito:** Permite ajustes absolutos no boost alvo ou duty cycle com base na temperatura do motor. Útil para compensações finas que são melhor representadas como adição do que como multiplicação.
- **Valores típicos:**
 - 0 extdegreeC: –30 kPa.
 - 40 extdegreeC: –15 kPa.
 - 60 extdegreeC: –5 kPa.
 - 80 extdegreeC: 0 kPa.
 - 100 extdegreeC: –10 kPa (proteção contra superaquecimento).

10.6.4 Aditivo por Temperatura do Ar de Admissão (IAT Adder)

Tabela aditiva com base na temperatura do ar de admissão:

- **Formato:** Tabela unidimensional — IAT (°C) → Adder (kPa ou %).
- **Propósito:** Reduzir o boost alvo em condições de ar quente para proteção contra detonação. A correção aditiva é aplicada diretamente ao alvo de pressão.
- **Valores típicos:**
 - 20 °C: 0 kPa.
 - 40 °C: –5 kPa.
 - 50 °C: –10 kPa.
 - 60 °C: –20 kPa.
 - 70 °C: –30 kPa.



Aplicação Cumulativa

As correções multiplicativas e aditivas são aplicadas cumulativamente. O valor final é calculado como: $Alvo_{final} = (Alvo_{base} \times Mult_{CLT} \times Mult_{IAT}) + Adder_{CLT} + Adder_{IAT}$. Certifique-se de que a combinação de todas as correções não resulte em valores negativos ou excessivamente altos.

10.7 Wastegate Eletrônica

Alguns motores modernos utilizam wastegates controladas diretamente por motor DC ou motor de passo (stepper), dispensando o atuador pneumático e o solenoide de modulação. O MotroLink Manager oferece suporte completo para este tipo de atuador.

10.7.1 Configuração do Motor DC

A wastegate eletrônica com motor DC requer uma ponte H (H-bridge) para controle bidirecional:

- **H-Bridge Outputs:** Selecione os dois pinos de saída que controlam a ponte H. A polaridade determina a direção de movimento (abrir/fechar) da wastegate.
- **PWM Frequency:** Frequência do PWM aplicada ao motor DC. Valores típicos: 500–2000 Hz. Frequências mais altas proporcionam movimento mais suave, mas podem gerar mais calor no driver.
- **Position Sensor:** A wastegate eletrônica requer um sensor de posição (potenciômetro ou sensor Hall) para feedback de posição. Configure a entrada analógica correspondente e os valores de calibração (tensão mínima/máxima e ângulo correspondente).
- **Position Limits:** Configure os limites de posição mínima (totalmente aberta) e máxima (totalmente fechada) para proteger o atuador contra travamento mecânico.

10.7.2 PID da Wastegate Eletrônica

O controle PID para wastegate eletrônica é separado do PID de boost e controla diretamente a posição do atuador:

- **P Gain:** Ganho proporcional para o controle de posição. Valores típicos: 2,0–10,0. Ganhos mais altos produzem resposta mais rápida, mas podem causar oscilação mecânica.
- **I Gain:** Ganho integral para eliminar erro de posição em regime permanente. Valores típicos: 0,1–1,0.
- **D Gain:** Ganho derivativo para amortecimento. Valores típicos: 0,0–2,0. Útil para reduzir overshoot mecânico.
- **Anti-Windup:** Limite de acúmulo integral, essencial para evitar que o integrador saturar durante transições rápidas.

10.7.3 Curva de Bias (Feed-Forward)

A curva de bias para a wastegate eletrônica define a posição base do atuador em função do boost alvo ou do RPM:

- **Formato:** Tabela unidimensional — Boost Alvo (kPa) ou RPM → Posição Base (%).
- **Propósito:** Fornecer um ponto de partida para o PID, reduzindo o tempo de resposta e a dependência dos ganhos integrais. Uma curva de bias bem calibrada faz com que o PID precise aplicar apenas correções finas.
- **Calibração:** Ajuste a curva de bias observando a posição média da wastegate em cada ponto de boost estabilizado. O PID deve manter correções próximas de zero em regime permanente quando a curva de bias está bem calibrada.

Wastegate Eletrônica

A calibração incorreta de uma wastegate eletrônica pode resultar em travamento mecânico do atuador, overboosting ou underboosting. Teste sempre com o motor parado (verificando o curso do atuador) antes de operar com o motor em funcionamento. Certifique-se de que os limites de posição estão corretamente configurados para evitar danos ao atuador.

10.8 Boost Blend Tables

As tabelas de boost blend permitem criar múltiplos “perfis” de boost que podem ser interpolados em tempo real, proporcionando flexibilidade avançada no controle de sobrealimentação. O MotroLink Manager suporta até duas tabelas de blend, tanto para malha aberta quanto para malha fechada.

10.8.1 Conceito de Blend

O blend é uma interpolação linear entre a tabela base (configuração principal) e uma tabela alternativa (blend table). A proporção de interpolação é determinada por uma curva de bias, que pode ser controlada por diversos parâmetros:

- **Entrada digital:** Um interruptor (switch) seleciona entre tabela base (0%) e tabela blend (100%). Útil para implementar modos de pilotagem (Eco/Sport/Race).
- **Variável contínua:** A curva de bias é indexada por uma variável como RPM, TPS, velocidade do veículo, ou tensão de uma entrada analógica (potenciômetro de ajuste).
- **Condição lógica:** A seleção é feita por uma condição lógica configurável (por exemplo, marcha > 3 ou velocidade > 100 km/h).

10.8.2 Boost Blend Table 1 (Open Loop)

A primeira tabela de blend para malha aberta:

- **Tabela:** RPM $\times$ Carga $\rightarrow$ Duty Cycle (%). Formato idêntico à tabela base de malha aberta.
- **Bias Curve 1:** Curva que define a porcentagem de blend. Eixo X configurável (RPM, TPS, velocidade, entrada analógica, etc.). Eixo Y: 0% (tabela base) a 100% (tabela blend 1).

10.8.3 Boost Blend Table 2 (Open Loop)

A segunda tabela de blend para malha aberta:

- **Tabela:** RPM $\times$ Carga $\rightarrow$ Duty Cycle (%). Formato idêntico à tabela base.
- **Bias Curve 2:** Curva de bias independente da curva 1, permitindo blends simultâneos ou condicionais.

Quando ambas as tabelas de blend estão ativas, o cálculo final é:

$$\text{Duty}_{final} = \text{Duty}_{base} \times (1 - B_1 - B_2) + \text{Duty}_{blend1} \times B_1 + \text{Duty}_{blend2} \times B_2$$

Onde B_1 e B_2 são os valores das curvas de bias 1 e 2, respectivamente. A soma $B_1 + B_2$ é limitada a 100%.

10.8.4 Boost Blend para Malha Fechada

O mesmo conceito de blend pode ser aplicado ao boost alvo (setpoint) do controlador PID:

- **Target Blend Table 1:** RPM $\times$ TPS $\rightarrow$ Boost Alvo alternativo (kPa). Permite um segundo perfil de boost alvo.
- **Target Blend Table 2:** RPM $\times$ TPS $\rightarrow$ Boost Alvo alternativo (kPa). Terceiro perfil de boost alvo.
- **Bias Curves:** Curvas de bias independentes para cada tabela de blend, com eixo X configurável.

10.8.5 Curvas de Bias: Detalhamento

As curvas de bias são essenciais para o funcionamento correto do blend. Cada curva consiste em:

- **Source (Fonte):** A variável que indexa a curva. Opções comuns:
 - RPM do motor.
 - TPS (posição da borboleta).
 - Velocidade do veículo.
 - Entrada analógica (potenciômetro, sinal CAN).
 - Entrada digital (interruptor on/off).
 - Marcha atual.
 - Temperatura (CLT ou IAT).
- **Breakpoints:** Pontos de quebra da curva. Definem em quais valores da fonte o blend é 0%, em quais é 100%, e a transição entre eles.
- **Smoothing:** Taxa de suavização da transição entre blend 0% e 100%, evitando mudanças abruptas no boost que poderiam causar desconforto ou perda de tração.

Aplicação Prática de Blend

Uma aplicação comum de boost blend é usar um potenciômetro no painel para que o piloto ajuste o nível de boost em tempo real. A tabela base contém o perfil de boost baixo, a tabela blend contém o perfil de boost alto, e a curva de bias é indexada pela tensão do potenciômetro. Girando o potenciômetro de 0 a 100%, o piloto interpola suavemente entre os dois perfis.

Blend e Segurança

Ao utilizar tabelas de blend, certifique-se de que nenhuma combinação de bias resulte em valores de boost perigosamente altos. Teste todos os extremos de blend (0%, 50%, 100%) individualmente para verificar que as pressões resultantes estão dentro dos limites seguros do motor. Uma calibração descuidada das tabelas de blend pode criar condições de overboosting inesperadas.

11 VVT (Comando de Válvulas Variável)

O sistema de comando de válvulas variável (VVT — Variable Valve Timing) permite que a ECU ajuste dinamicamente o sincronismo das válvulas de admissão e/ou escape durante a operação do motor. Essa tecnologia é amplamente utilizada em motores modernos para otimizar torque, potência, eficiência de combustível e emissões em diferentes condições de operação. O MotroLink Manager oferece controle completo de VVT para sistemas de admissão e escape, com suporte a diversos tipos de atuadores e estratégias de controle PID.

11.1 Teoria de Funcionamento

11.1.1 Princípios de Funcionamento do VVT

Em um motor de combustão interna convencional (sem VVT), o sincronismo das válvulas é fixo, determinado pelo perfil do comando de válvulas e pela relação mecânica entre o virabrequim e o(s) comando(s). Esse sincronismo fixo representa um compromisso entre diversas condições de operação:

- **Baixas rotações:** Beneficiam-se de menor overlap (sobreposição entre abertura da admissão e fechamento do escape) para melhor estabilidade de marcha lenta e torque em baixas RPM.
- **Altas rotações:** Beneficiam-se de maior overlap e abertura mais adiantada da admissão para maximizar a eficiência volumétrica e a potência.
- **Carga parcial:** Menos overlap reduz a quantidade de gases residuais no cilindro, melhorando a estabilidade da combustão.
- **Carga plena:** Mais overlap pode melhorar o enchimento dos cilindros através do efeito de varrimento (scavenging).

O VVT resolve esse compromisso permitindo que o ângulo de fase do comando de válvulas seja ajustado continuamente, otimizando o sincronismo para cada condição de operação.

11.1.2 Efeitos do VVT no Desempenho

Avanço do comando de admissão:

- Abre a válvula de admissão mais cedo e fecha mais cedo.
- Aumenta o overlap com o escape.
- Em altas rotações, melhora o enchimento por efeito de varrimento dos gases de escape.
- Em cargas parciais, o maior overlap introduz EGR interno (recirculação interna de gases de escape), reduzindo emissões de NOx e perdas de bombeamento.
- Excesso de avanço em marcha lenta ou baixas cargas causa instabilidade, pois os gases de escape diluem excessivamente a mistura fresca.

Retardo do comando de admissão:

- Abre a válvula de admissão mais tarde e fecha mais tarde.
- Reduz o overlap com o escape.
- Melhora a estabilidade em marcha lenta e baixas rotações.
- Em altas rotações, o fechamento tardio da admissão pode utilizar a inércia da coluna de ar para melhorar o enchimento (efeito Atkinson/Miller parcial).
- Excesso de retardo reduz a eficiência volumétrica em baixas e médias rotações.

Avanço do comando de escape:

- Abre a válvula de escape mais cedo e fecha mais cedo.
- Reduz o overlap.
- A abertura antecipada do escape desperdiça parte da energia de expansão, mas facilita a evacuação dos gases em altas rotações.
- O fechamento antecipado pode causar retenção de gases de escape no cilindro.

Retardo do comando de escape:

- Abre a válvula de escape mais tarde e fecha mais tarde.
- Aumenta o overlap.
- Permite maior utilização da energia de expansão.
- O fechamento tardio aumenta o overlap, beneficiando o enchimento em altas rotações.

11.1.3 Overlap e suas Consequências

O overlap é o período em que tanto a válvula de admissão quanto a válvula de escape estão abertas simultaneamente, durante a transição entre o curso de escape e o curso de admissão (próximo ao PMS — Ponto Morto Superior).

• Benefícios do overlap:

- Efeito de varrimento: os gases de escape em movimento criam uma depressão que ajuda a puxar a mistura fresca para dentro do cilindro.
- Em motores turboalimentados, o diferencial de pressão positivo entre admissão (pressurizada) e escape pode ser utilizado para varrer os gases residuais e resfriar o cilindro.
- EGR interno: uma quantidade controlada de gases de escape permanece no cilindro, reduzindo a temperatura de combustão e as emissões de NOx.

• Riscos do overlap excessivo:

- Instabilidade de marcha lenta e baixas cargas.
- Misfire (falha de combustão) por diluição excessiva da mistura.
- Em motores turbo, pode causar passagem de combustível não queimado direto para o escape, resultando em detonação no escape e dano ao catalisador.
- Perda de eficiência em cargas parciais.

11.1.4 Tipos de Atuadores VVT

O MotroLink Manager suporta os tipos de atuadores VVT mais comuns:

- **Solenóide PWM (Oil Control Valve — OCV):** O tipo mais comum. Uma válvula solenóide controla o fluxo de óleo do motor para um atuador hidráulico na polia do comando. O duty cycle do solenóide determina a posição angular do comando. Exemplos: Toyota VVT-i, Honda i-VTEC (fase contínua), BMW VANOS.
- **Solenóide On/Off:** Tipo mais simples, utilizado em sistemas que alternam entre apenas duas posições (avançado/retardado). Exemplo: sistemas VVT de primeira geração.
- **Motor DC / Motor de Passo:** Utilizado em alguns sistemas mais recentes que requerem controle de posição mais preciso. O atuador é controlado diretamente por um motor elétrico em vez de pressão de óleo.

11.1.5 Efeitos do VVT nas Emissões

O VVT tem impacto significativo nas emissões do motor:

- **NO_x:** O EGR interno proporcionado pelo overlap controlado reduz a temperatura de pico de combustão, diminuindo a formação de óxidos de nitrogênio.
- **HC (Hidrocarbonetos):** A otimização do sincronismo melhora a completude da combustão em cargas parciais, reduzindo emissões de HC.
- **CO (Monóxido de Carbono):** A melhor eficiência volumétrica permite operação com misturas mais próximas da estequiométrica em mais condições de operação.
- **CO₂:** A melhoria global de eficiência reduz o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de CO₂.

11.2 Configuração VVT

A configuração do sistema VVT no MotroLink Manager envolve a definição de parâmetros de hardware (saídas, pinos, sensores) e parâmetros de controle (PID, limites).

11.2.1 Habilitação e Tipo de VVT

- **VVT Enable:** Habilita ou desabilita o controle VVT. Quando desabilitado, nenhuma saída VVT é ativada.
- **VVT Mode:** Seleciona o número de comandos controlados:
 - **Intake Only:** Controle apenas do comando de admissão. Modo mais comum em sistemas de primeira e segunda geração.
 - **Intake + Exhaust:** Controle independente dos comandos de admissão e escape (Dual VVT). Disponível em sistemas como Toyota Dual VVT-i, Nissan CVTCS.
- **Actuator Type:** Tipo de atuador conforme descrito na teoria. Selecione entre solenóide PWM (OCV), solenóide on/off, ou motor DC.

11.2.2 Configuração de Saídas (Output Pins)

- **Intake VVT Output:** Pino de saída auxiliar atribuído ao solenoide ou motor do VVT de admissão.
- **Exhaust VVT Output:** Pino de saída auxiliar atribuído ao solenoide ou motor do VVT de escape (quando Dual VVT está habilitado).
- **PWM Frequency:** Frequência do sinal PWM para o solenoide OCV. Valores típicos: 200–300 Hz para a maioria dos OCVs. Consulte a especificação do fabricante do solenoide.
- **Duty Range:** Faixa de duty cycle operacional do solenoide. Muitos OCVs têm zona morta abaixo de 10–15% e acima de 85–90%. Configure os limites min/max para manter o solenoide dentro da faixa operacional.

11.2.3 Configuração do Sensor de Posição

O feedback de posição do comando de válvulas é essencial para o controle em malha fechada:

- **Intake CAM Sensor:** O sensor de posição do comando de admissão já é utilizado para sincronismo de ignição. O MotroLink Manager utiliza a diferença de fase entre o sinal do sensor de posição do virabrequim (CKP) e o sensor de posição do comando (CMP) para calcular o ângulo atual do VVT.
- **Exhaust CAM Sensor:** Para sistemas Dual VVT, um segundo sensor CMP é necessário no comando de escape.
- **Offset de Calibração:** Ângulo de offset para alinhar a leitura do sensor com a posição real do comando. Este valor é determinado durante a calibração inicial com o motor parado ou em marcha lenta, medindo o ângulo real com ferramentas de medição.
- **Sensor Direction:** Direção de leitura do sensor (avanço = aumento ou diminuição do ângulo). Depende da configuração mecânica do sistema VVT.

Verificação do Sensor

Antes de calibrar o VVT, verifique se a leitura do ângulo do comando é estável em marcha lenta e responde corretamente quando o solenoide é ativado manualmente (através do teste de saída do MotroLink Manager). Uma leitura instável ou que não responde ao solenoide indica problema mecânico ou elétrico.

11.2.4 Ganhos PID do VVT

O controle de posição do VVT utiliza um controlador PID dedicado:

- **Intake VVT PID:**
 - **P Gain:** Ganho proporcional. Controla a agressividade da resposta ao erro de posição. Valores típicos: 1,0–10,0. Comece com 2,0 e ajuste observando a resposta.

- **I Gain:** Ganho integral. Elimina o erro de posição em regime permanente. Valores típicos: 0,01–0,5. Valores muito altos causam overshoot e oscilação.
 - **D Gain:** Ganho derivativo. Amortece a resposta para reduzir overshoot. Valores típicos: 0,0–1,0. Útil quando o sistema hidráulico tem resposta rápida.
 - **Output Min/Max:** Limites de duty cycle que o PID pode comandar. Exemplo: 10% min, 90% max.
 - **Integral Windup Limit:** Limite de acúmulo do integrador para evitar saturação durante transientes.
- **Exhaust VVT PID:** Parâmetros idênticos ao intake, mas independentes, pois o sistema hidráulico de escape pode ter características diferentes.

Calibração PID do VVT

A calibração dos ganhos PID do VVT deve ser realizada com o motor em marcha lenta e depois em diversas condições de RPM e carga. Monitore o ângulo real versus o ângulo alvo no datalog do MotroLink Manager. O VVT deve atingir o ângulo alvo sem oscilação excessiva (overshoot/undershoot repetidos). Uma resposta lenta é preferível a uma resposta oscilatória, pois oscilações no VVT causam variações indesejadas no torque do motor.

11.2.5 Parâmetros Adicionais

- **VVT Activation Temperature:** Temperatura mínima do líquido de arrefecimento (CLT) para ativação do VVT. Com o motor frio, o óleo é viscoso e o sistema hidráulico tem resposta lenta e imprecisa. Valor típico: 60–70 extdegreeC.
- **VVT Activation RPM:** RPM mínimo para ativação. Em marcha lenta muito baixa, a pressão de óleo pode ser insuficiente para operar o VVT corretamente. Alguns calibradores preferem manter o VVT na posição padrão durante a marcha lenta.
- **Default Position:** Ângulo para o qual o comando retorna quando o VVT é desativado (motor frio, marcha lenta abaixo do RPM mínimo, ou falha do sistema). Geralmente é a posição de repouso mecânico do atuador.
- **Error Timeout:** Tempo máximo (em segundos) que o erro de posição pode permanecer acima de um limiar antes de o sistema reportar uma falha de VVT.

11.3 Tabela VVT Admissão

A tabela de VVT de admissão define o ângulo alvo do comando de admissão em função das condições de operação do motor. O controlador PID ajusta o duty cycle do solenoide OCV para atingir o ângulo definido nesta tabela.

11.3.1 Estrutura da Tabela: RPM × Carga

- **Eixo X:** RPM do motor. Resolução típica: 500 RPM entre breakpoints, de 500 (ou marcha lenta) até o RPM máximo do motor.

- **Eixo Y:** Carga do motor. Pode ser configurado como TPS (%), MAP (kPa), ou VE (%). A escolha depende da estratégia de controle de combustível do motor.
- **Valores da tabela:** Ângulo do comando de admissão em graus de virabrequim. A referência (0 extdegree) é tipicamente a posição de repouso (sem atuação VVT). Valores positivos indicam avanço e valores negativos indicam retardo, conforme convenção do sistema.

11.3.2 Diretrizes de Calibração

- **Marcha lenta (600–900 RPM, carga baixa):** Utilize um ângulo próximo de 0 extdegree (posição padrão) ou ligeiramente avançado (5–10 extdegree). Excesso de avanço causa instabilidade de marcha lenta por aumento de overlap.
- **Baixas rotações, carga parcial (1000–2500 RPM, 20–50% TPS):** Avanço moderado (10–20 extdegree) para melhorar o torque em baixa e introduzir EGR interno para eficiência.
- **Médias rotações, carga alta (2500–5000 RPM, 50–100% TPS):** Avanço progressivo (20–35 extdegree) para maximizar a eficiência volumétrica e o torque de faixa média.
- **Altas rotações, carga plena (5000–8000 RPM, 100% TPS):** O ângulo ótimo depende do motor. Em muitos motores, o avanço máximo ocorre em rotações médias e reduz ligeiramente em rotações muito altas. Valores típicos: 25–40 extdegree.
- **Desaceleração (RPM alto, carga zero):** Retorne ao ângulo padrão ou a um valor de retardo para reduzir o bombeamento e melhorar o freio-motor.

! Calibração em Dinamômetro

A calibração ideal da tabela VVT de admissão deve ser realizada em dinamômetro, varrendo o ângulo do VVT em cada ponto de RPM × carga e registrando o torque resultante. O ângulo que produz o maior torque (ou a melhor eficiência, dependendo do objetivo) em cada célula é o valor ideal para aquele ponto. A calibração “por sensibilidade” (tentativa e erro) em estrada é possível, mas menos precisa e mais demorada.

11.3.3 Transição entre Células

O MotroLink Manager realiza interpolação bilinear entre os pontos da tabela, garantindo transições suaves no ângulo alvo conforme o RPM e a carga variam. No entanto, diferenças muito grandes entre células adjacentes podem causar movimentos bruscos do atuador:

- Mantenha diferenças máximas de 5–10 extdegree entre células adjacentes.
- Evite “ilhas” de valores muito diferentes no meio da tabela.
- Se um ponto de operação requer uma mudança abrupta de ângulo, distribua a transição por pelo menos 2–3 breakpoints.

11.4 Tabela VVT Escape

A tabela de VVT de escape define o ângulo alvo do comando de escape, disponível em sistemas Dual VVT. O controle do comando de escape é independente do comando de admissão e utiliza seu próprio controlador PID.

11.4.1 Estrutura da Tabela: RPM × Carga

- **Eixo X:** RPM do motor (mesma resolução da tabela de admissão).
- **Eixo Y:** Carga do motor (TPS, MAP ou VE).
- **Valores da tabela:** Ângulo do comando de escape em graus de virabrequim. Valores positivos indicam retardo (fechamento tardio) e valores negativos indicam avanço (fechamento antecipado), conforme convenção do sistema.

11.4.2 Diretrizes de Calibração

A calibração do VVT de escape segue princípios semelhantes aos da admissão, mas com objetivos complementares:

- **Marcha lenta:** Ângulo próximo de 0 *extdegree* (posição padrão). Evite retardo excessivo que poderia causar overlap indesejado.
- **Baixas rotações, carga alta:** Pequeno avanço do escape (fechamento antecipado) para reduzir overlap e melhorar o torque de partida. Valores típicos: -5extdegree a -15extdegree .
- **Médias rotações, carga alta:** Retorno ao neutro ou ligeiro retardo para permitir melhor varrimento e enchimento dos cilindros. Valores típicos: 0 *extdegree* a 10 *extdegree*.
- **Altas rotações, carga plena:** Retardo moderado (10–25 *extdegree*) para maximizar o overlap e o efeito de varrimento em altas velocidades de gás.
- **Cargas parciais:** Avanço do escape para reduzir overlap e introduzir retenção controlada de gases, funcionando como EGR interno adicional. Valores típicos: -10extdegree a -20extdegree .

11.4.3 Interação entre Admissão e Escape

Quando ambos os comandos (admissão e escape) são controlados, o overlap total é a soma dos efeitos individuais. A calibração deve considerar o efeito combinado:

- Se o VVT de admissão está avançado em 30 *extdegree* e o VVT de escape está retardado em 15 *extdegree*, o overlap total é significativamente maior do que com apenas um dos dois atuados.
- Utilize o datalog do MotroLink Manager para monitorar ambos os ângulos simultaneamente e calcular o overlap resultante.
- Em motores turbo, overlap excessivo com pressão positiva na admissão pode causar passagem de combustível não queimado para o escape (fuel wash-through), danificando o turbo e o catalisador.

Overlap em Motores Turbo

Em motores turboalimentados, o controle de overlap via VVT requer cuidado especial. Com pressão positiva na admissão e vácuo relativo no escape, o diferencial de pressão favorece o fluxo da admissão para o escape. Se a mistura admitida contiver combustível, esse combustível pode queimar no coletor de escape ou no turbo, causando danos térmicos. Calibre o overlap com monitoramento de lambda no escape.

11.5 VVL (Variable Valve Lift)

O VVL (Variable Valve Lift) é um sistema que permite alterar a elevação (lift) das válvulas, alterando não apenas o sincronismo mas também o perfil de abertura. Ao contrário do VVT (que apenas rotaciona a fase do comando), o VVL pode alternar entre perfis de came com diferentes alturas e durações de abertura.

11.5.1 Princípio de Funcionamento

O VVL opera através da troca de perfis de came (cam profile switching):

- **Perfil de came baixo (Low Cam):** Utilizado em baixas rotações e cargas parciais. Possui menor elevação e menor duração de abertura. Favorece a velocidade do ar de admissão (swirl/tumble), melhorando a atomização do combustível e a estabilidade da combustão em cargas baixas.
- **Perfil de came alto (High Cam):** Utilizado em altas rotações e cargas plenas. Possui maior elevação e maior duração de abertura. Permite maior fluxo de ar, maximizando a eficiência volumétrica e a potência.

O mecanismo de troca varia conforme o fabricante:

- **Honda VTEC:** Utiliza um pino de travamento acionado por pressão de óleo (via solenoide) para acoplar os balancins dos comes de baixa e alta. Quando ativado, ambas as válvulas seguem o perfil de came alto.
- **BMW Valvetronic / Nissan VVEL:** Utilizam um sistema mecânico com motor elétrico para variar continuamente a elevação, sem troca discreta de perfis.
- **Mitsubishi MIVEC:** Semelhante ao VTEC, com pino de travamento para troca de perfil.

11.5.2 Configuração no MotroLink Manager

O MotroLink Manager suporta o controle de VVL do tipo cam profile switching (troca discreta de perfil):

- **VVL Enable:** Habilita ou desabilita o controle de VVL.
- **VVL Output:** Pino de saída atribuído ao solenoide de troca de perfil. Em sistemas on/off, a saída é simplesmente ativada ou desativada.

- **VVL Activation RPM:** RPM acima do qual a troca para o perfil alto é ativada. Valores típicos: 4500–6000 RPM, dependendo do motor.
- **VVL Deactivation RPM:** RPM abaixo do qual o sistema retorna ao perfil baixo. Deve ser configurado ligeiramente abaixo do RPM de ativação para criar histerese e evitar chaveamento repetido. Exemplo: ativação em 5500 RPM, desativação em 5200 RPM.
- **VVL Activation Load:** Carga mínima (TPS ou MAP) para ativação do perfil alto. Evita troca de perfil em condições de carga parcial onde o perfil baixo é mais eficiente.
- **VVL CLT Minimum:** Temperatura mínima do líquido de arrefecimento para ativação. O perfil alto geralmente não deve ser ativado com motor frio.
- **VVL Oil Pressure Minimum:** Pressão de óleo mínima necessária para acionar o mecanismo de troca. Se o sensor de pressão de óleo indicar pressão insuficiente, o VVL permanece no perfil baixo para evitar acionamento incompleto.

11.5.3 Considerações de Calibração com VVL

Quando o VVL está ativo (perfil de came alto), as características de enchimento do motor mudam significativamente. Isso afeta:

- **Tabela VE (Volumetric Efficiency):** O perfil de came alto altera a eficiência volumétrica. Idealmente, utilize uma tabela VE separada para o perfil alto ou uma tabela de correção VVL.
- **Tabela de Ignição:** O perfil de came alto pode alterar a velocidade de combustão e a tendência à detonação. Uma tabela de correção de ignição específica para VVL ativo pode ser necessária.
- **Tabela VVT:** Os ângulos ótimos de VVT podem ser diferentes com o perfil de came alto ativo. Considere tabelas VVT separadas ou correções para VVL ativo.
- **Lambda/AFR:** A eficiência volumétrica diferente pode exigir ajustes na tabela de combustível para manter a relação ar/combustível desejada.

 Transição de Perfil

A transição entre perfis de came (low/high) não é instantânea. O mecanismo hidráulico leva tipicamente 50–200 ms para completar a troca. Durante essa transição, o motor pode experimentar uma breve oscilação de torque. Para minimizar a percepção do motorista, configure a troca de perfil em rotações onde o motor é menos sensível a variações de torque, ou aplique um retardo temporário na ignição durante a transição.

 Verificação Mecânica

Antes de habilitar o controle de VVL no MotroLink Manager , verifique se o mecanismo mecânico de troca de came está em boas condições de funcionamento. Um

mecanismo com desgaste ou obstrução no circuito de óleo pode falhar ao trocar de perfil, causando operação instável do motor ou, em casos extremos, contato entre pistão e válvula em motores de alta compressão com cames agressivos.

12 Controle de Largada e Anti-Lag

O MotroLink Manager oferece funcionalidades avançadas para controle de largada (launch control), anti-lag (ALS — Anti-Lag System) e flat shift (redução de torque durante troca de marchas). Essas funções são amplamente utilizadas em aplicações de competição e alto desempenho para otimizar a saída da linha de largada, manter a pressão do turbo durante trocas de marcha e minimizar o tempo de resposta do turbocompressor.

12.1 Teoria de Funcionamento

12.1.1 Controle de Largada (Launch Control)

O controle de largada é um sistema que limita a rotação do motor a um valor pré-determinado enquanto o veículo está parado, permitindo que o motorista mantenha o acelerador na posição de máxima abertura (WOT — Wide Open Throttle) sem que o motor ultrapasse o RPM desejado. Isso garante que, quando a embreagem é liberada (ou o freio de linha em transmissões automáticas), o motor esteja na faixa de rotação ideal para máximo torque e tração.

O objetivo principal é manter o turbocompressor na faixa de spool durante a largada, garantindo que boost esteja disponível imediatamente quando o veículo começa a se mover. Sem launch control, o motorista precisaria dosar cuidadosamente o acelerador para manter a rotação ideal, aumentando o risco de erro e perda de tempo.

12.1.2 Métodos de Limitação de RPM

Existem dois métodos principais para limitar o RPM durante o launch control:

- **Corte de ignição (Ignition Cut):** O sistema corta o sinal de ignição (spark cut) em cilindros selecionados quando o RPM atinge o limite. A mistura ar/combustível não queimada é empurrada para o coletor de escape, onde pode inflamar ao encontrar os gases quentes ou a superfície do catalisador/turbo. Este método é eficaz para manter o turbo na rotação, pois a combustão no escape mantém energia fluindo pela turbina. É o método que produz os característicos “flames” (chamas) na saída do escapamento. Porém, gera estresse térmico significativo no coletor de escape, turbo e catalisador.
- **Corte de combustível (Fuel Cut):** O sistema corta a injeção de combustível em cilindros selecionados quando o RPM atinge o limite. O motor bombeia ar sem combustível, resultando em uma limitação mais suave e menos estressante para os componentes de escape. No entanto, sem energia de combustão no escape, o turbo tende a perder rotação durante os cortes, resultando em menos boost disponível na largada.
- **Retardo de ignição (Ignition Retard):** Em vez de cortar completamente a ignição, o sistema retarda significativamente o ponto de ignição (por exemplo, 15–30 extdegree após o PMS). A combustão tardia produz menos torque no virabrequim (limitando o RPM), mas mantém energia térmica fluindo para o escape, ajudando a manter o turbo. Este método pode ser combinado com corte de ignição para um controle mais refinado.

12.1.3 Anti-Lag System (ALS)

O sistema anti-lag é uma estratégia agressiva para manter o turbocompressor em rotação durante condições onde normalmente ele perderia spool, como:

- Desaceleração (tirada do acelerador).
- Trocas de marcha.
- Operação em carga parcial.

O ALS funciona injetando combustível e retardando severamente a ignição (ou cortando a ignição completamente em alguns cilindros) de forma que a combustão ocorra predominantemente no coletor de escape. A energia térmica dessa combustão no escape mantém a turbina girando, garantindo que boost esteja disponível quase instantaneamente quando o motorista volta a acelerar.

O mecanismo básico do ALS:

1. O ponto de ignição é retardado drasticamente (20–50 extdegree após o PMS ou mais).
2. A combustão extremamente tardia faz com que a chama se propague para o coletor de escape.
3. Combustível adicional pode ser injetado para garantir que haja energia suficiente nos gases de escape.
4. A turbina recebe gases quentes e energéticos, mantendo sua rotação.

Danos Térmicos do Anti-Lag

O anti-lag (ALS) gera temperaturas extremamente elevadas no coletor de escape, no turbocompressor e em componentes adjacentes. Temperaturas de escape podem ultrapassar 1000 extdegreeC durante operação ALS prolongada. Isso pode causar: (1) Fusão ou trinca da carcaça da turbina; (2) Falha dos mancais do turbo por lubrificação degradada; (3) Destruição do catalisador; (4) Incêndio no compartimento do motor por radiação térmica; (5) Trinca do coletor de escape; (6) Deformação da junta do coletor de escape. O ALS deve ser utilizado exclusivamente em veículos de competição preparados com componentes de escape adequados (coletor inonel/aço inox de alta temperatura, turbo de competição, sem catalisador) e por períodos limitados. O uso em veículos de rua é extremamente perigoso e irresponsável.

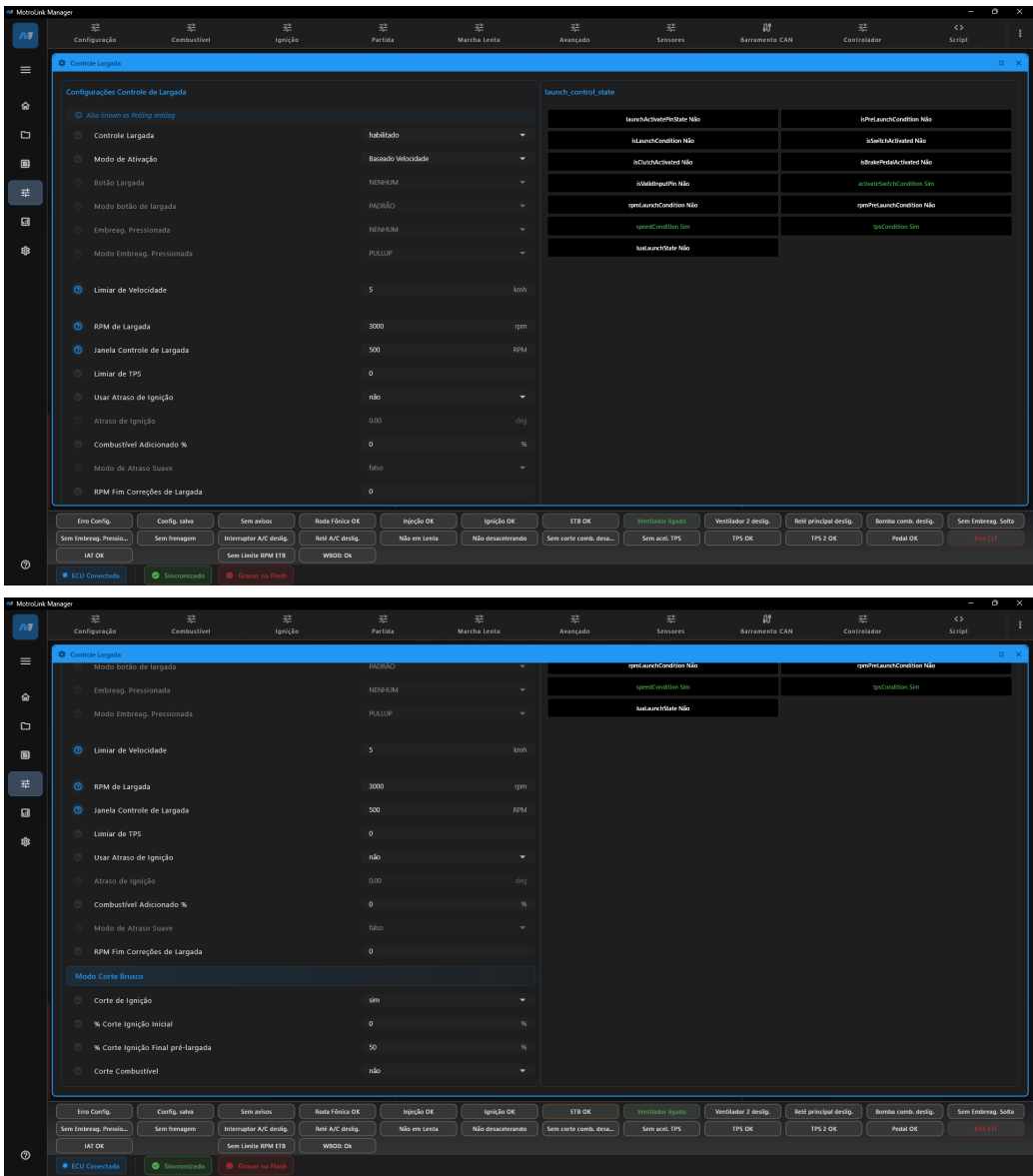
12.1.4 Flat Shift

O flat shift (também chamado de “no-lift shift” ou “power shift”) permite que o motorista troque de marcha sem retirar o pé do acelerador. O sistema reduz momentaneamente o torque do motor (por corte de ignição, corte de combustível ou retardo) durante o tempo de engrenamento, permitindo uma troca rápida e suave sem interrupção significativa da aceleração.

O flat shift é particularmente benéfico em motores turbo, pois evita a perda de boost que normalmente ocorre quando o motorista fecha a borboleta durante a troca de marcha.

12.2 Launch Control

O MotroLink Manager oferece um sistema de launch control configurável com múltiplas opções de ativação, limitação e ajuste.



Controle de largada: configuração e estado (acima) e modo de corte hard (abaixo).

12.2.1 Habilitação e Condições de Ativação

- **Launch Control Enable:** Habilita ou desabilita a funcionalidade de launch control.
- **Activation Conditions:** O launch control é ativado quando TODAS as seguintes condições são satisfeitas simultaneamente:
 - **Vehicle Speed:** A velocidade do veículo deve estar abaixo de um limiar configurável (tipicamente 0–5 km/h). Isso garante que o launch control só funcione com o veículo parado ou quase parado.

- **Clutch Switch:** O interruptor de embreagem deve indicar que a embreagem está pressionada (em veículos com câmbio manual). Isso confirma que o motor está desacoplado da transmissão.
 - **TPS Threshold:** A posição da borboleta deve estar acima de um limiar mínimo (tipicamente 80–100%). Isso indica que o motorista está solicitando aceleração plena.
 - **Brake Switch (opcional):** Em veículos com transmissão automática, o freio pode ser usado como condição de ativação em vez da embreagem (técnica de “brake boost”).
 - **Digital Input (opcional):** Uma entrada digital dedicada (botão no volante ou no painel) pode ser configurada como condição adicional de ativação, permitindo que o motorista arme o launch control manualmente.
- **Deactivation Conditions:** O launch control é desativado quando qualquer das seguintes condições ocorre:
 - A velocidade do veículo ultrapassa o limiar de desativação.
 - A embreagem é liberada (em câmbio manual).
 - O TPS cai abaixo do limiar mínimo.
 - O botão de ativação é solto (se configurado).

12.2.2 Limite de RPM do Launch Control

- **Launch RPM Limit:** O RPM no qual o sistema começa a limitar a rotação do motor. Este valor deve ser configurado na faixa de torque máximo do motor, considerando as características de tração do veículo. Valores típicos:
 - Motores aspirados: 3000–5000 RPM (na faixa de torque máximo).
 - Motores turbo: 3000–5000 RPM (na faixa onde o turbo já está em spool completo).
 - A escolha exata depende da aderência dos pneus, da relação de primeira marcha e das condições da pista.
- **Launch RPM Window (Hard Cut vs Soft Cut):**
 - **Soft Cut RPM:** RPM onde o sistema começa a aplicar limitação parcial (retardo de ignição progressivo ou cortes intermitentes). Exemplo: 4800 RPM.
 - **Hard Cut RPM:** RPM máximo absoluto onde cortes agressivos são aplicados para impedir que o motor ultrapasse esse valor. Exemplo: 5000 RPM.
 - A diferença entre soft cut e hard cut define a “janela” de transição. Uma janela de 100–300 RPM proporciona uma limitação suave. Uma janela muito estreita pode causar oscilação perceptível do RPM.

12.2.3 Tipo de Limitação

- **Limitation Mode:** Selecione o método de limitação de RPM:

- **Ignition Cut Only:** Corta a ignição em cilindros selecionados. Mais agressivo, mantém boost do turbo, produz chamas no escape.
 - **Fuel Cut Only:** Corta a injeção de combustível. Mais suave, menos estresse térmico, mas pode perder boost.
 - **Ignition Cut + Fuel Cut:** Combinação dos dois métodos. Alguns cilindros têm corte de ignição e outros têm corte de combustível, proporcionando um equilíbrio entre manutenção de boost e proteção térmica.
 - **Ignition Retard:** Retarda progressivamente a ignição em vez de cortar. Método mais suave, menos dramático, mas eficaz para motores aspirados.
 - **Ignition Retard + Cut:** Primeiro retarda a ignição (soft cut) e depois aplica cortes (hard cut) se o RPM continuar subindo.
- **Ignition Retard Amount:** Graus de retardo de ignição aplicados durante o launch control. Valores típicos: 10–30 extdegree de retardo em relação ao ponto base. Retardo excessivo (acima de 35–40 extdegree) pode causar combustão no escape.
 - **Cut Percentage:** Porcentagem de eventos de ignição/combustível que são cortados quando o hard cut é ativado. 50% = metade dos eventos são cortados. 100% = todos os eventos são cortados (motor para de funcionar — usar com cautela).

Ajuste do RPM de Largada

O RPM ideal de largada depende de muitos fatores: aderência dos pneus, peso do veículo, relação de transmissão, torque do motor e condições da pista. Em pistas de arrancada preparadas (com cola), RPMs mais altos podem ser utilizados. Em pistas de asfalto convencional, RPMs mais baixos evitam patinação excessiva. Teste diferentes valores em condições reais para encontrar o RPM que produz o melhor tempo de saída.

12.2.4 Configurações Avançadas

- **Launch Fuel Adder:** Porcentagem de enriquecimento de combustível adicional durante o launch control. Pode ser necessário para compensar a mistura magra causada pelo alto fluxo de ar em WOT com RPM limitado. Valores típicos: 0–15%.
- **Launch Boost Target:** Alguns sistemas permitem definir um boost alvo específico durante o launch, diferente do boost alvo normal. Útil para reduzir o boost na largada em pistas com pouca aderência.
- **Stage RPM:** Um segundo limite de RPM, mais baixo, para “staging” (posicionamento antes da largada). O motorista pressiona o botão de launch, o RPM é limitado ao stage RPM para posicionamento, e quando as condições de largada são satisfeitas, o limite sobe para o launch RPM.
- **RPM Ramp After Launch:** Taxa de aumento do limitador de RPM após a liberação da embreagem, em RPM/segundo. Permite uma entrega progressiva de potência nos primeiros instantes da largada, reduzindo patinação. Valores típicos: 500–2000 RPM/s.

12.3 Anti-Lag (ALS)

O sistema anti-lag (ALS) do MotroLink Manager oferece controle granular sobre o retardo de ignição, o enriquecimento de combustível e o corte de ignição utilizados para manter o turbo em spool.

12.3.1 Habilitação e Condições de Ativação

- **ALS Enable:** Habilita ou desabilita o sistema anti-lag. O ALS é uma funcionalidade de competição e deve ser habilitado somente em veículos preparados para suportar o estresse térmico.
- **Activation Conditions:** O ALS é ativado quando:
 - **TPS abaixo de limiar:** O motorista tirou o pé do acelerador ($TPS < 20\text{--}30\%$) ou está em aceleração parcial.
 - **RPM acima de mínimo:** O motor está acima de um RPM mínimo (tipicamente 3000–4000 RPM), indicando que o turbo está em operação.
 - **CLT acima de mínimo:** O motor está na temperatura de operação ($CLT > 60\text{--}70\text{ extdegreeC}$).
 - **Boost abaixo de alvo:** A pressão de boost está abaixo do valor alvo, indicando que o turbo está perdendo spool.
 - **Digital Input (opcional):** Botão de ativação dedicado (“ALS armed”).
- **Deactivation Conditions:** O ALS é desativado quando:
 - O TPS sobe acima do limiar (motorista voltou a acelerar — controle normal retoma).
 - O RPM cai abaixo do mínimo.
 - O boost atinge ou excede o alvo.
 - O ALS timeout é atingido (tempo máximo de operação contínua).

12.3.2 Tabela de Retardo de Ignição ALS

A tabela de retardo define o quanto a ignição é atrasada durante a operação ALS:

- **Formato:** RPM → Retardo (graus de virabrequim).
- **Valores típicos:** 20–50 extdegree de retardo após o PMS. Em RPMs mais altos, mais retardo pode ser tolerado pois a velocidade de combustão é maior.
- **Exemplo:**
 - 3000 RPM: 25 extdegree de retardo.
 - 4000 RPM: 30 extdegree de retardo.
 - 5000 RPM: 35 extdegree de retardo.
 - 6000 RPM: 40 extdegree de retardo.
- O retardo extremo faz com que a chama ainda esteja se propagando quando a válvula de escape abre, transferindo energia térmica diretamente para o coletor de escape e a turbina.

12.3.3 Tabela de Enriquecimento de Combustível ALS

Combustível adicional é injetado durante o ALS para garantir que haja energia suficiente nos gases de escape:

- **Formato:** RPM → Enriquecimento (% adicionado sobre o pulso base).
- **Valores típicos:** 10–40% de combustível adicional. A quantidade depende do tamanho do turbo e da energia necessária para mantê-lo em spool.
- **Considerações:**
 - Excesso de combustível sem ignição adequada pode lavar o óleo das paredes dos cilindros, causando desgaste acelerado.
 - Combustível não queimado que chega ao coletor de escape pode inflamar de forma descontrolada, causando picos de temperatura.
 - O enriquecimento deve ser calibrado em conjunto com o retardo de ignição — mais retardo requer mais combustível para manter a combustão, mas também gera mais calor no escape.

12.3.4 Tabela de Corte de Ignição ALS (Ignition Skip)

Além do retardo, o ALS pode cortar a ignição em uma porcentagem de cilindros, enviando mistura não queimada diretamente ao escape:

- **Formato:** RPM → Porcentagem de corte (%).
- **Valores típicos:** 10–50% de corte. A mistura não queimada inflama no coletor de escape (afterfire), gerando energia adicional para a turbina.
- **Estratégia:** Combine retardo e corte para obter o nível desejado de energia no escape. Por exemplo:
 - ALS leve: 25 extdegree de retardo, 0% de corte, 15% de combustível extra.
 - ALS moderado: 35 extdegree de retardo, 20% de corte, 25% de combustível extra.
 - ALS agressivo: 45 extdegree de retardo, 40% de corte, 35% de combustível extra.

12.3.5 Parâmetros Adicionais do ALS

- **ALS Timeout:** Tempo máximo de operação contínua do ALS em segundos. Após esse tempo, o ALS é desativado automaticamente para proteger os componentes. Valores típicos: 5–30 segundos.
- **ALS Cooldown:** Tempo mínimo entre ativações do ALS, permitindo que os componentes de escape resfriem parcialmente. Valores típicos: 5–15 segundos.
- **ALS Idle Valve Position:** Posição da válvula de marcha lenta (IAC/IACV) ou borboleta eletrônica durante o ALS. Pode ser aberta ligeiramente para permitir fluxo de ar adicional através do motor para o escape.

- **ALS Boost Target:** Pressão de boost alvo durante o ALS. Geralmente configurado para manter o boost mínimo necessário para resposta imediata, sem atingir boost pleno (que não é necessário durante desaceleração).

Uso Responsável do Anti-Lag

O anti-lag é uma funcionalidade de competição extrema que causa danos acumulativos significativos aos componentes do motor e do sistema de escape. Cada utilização do ALS reduz a vida útil do turbocompressor, do coletor de escape, dos catalisadores e potencialmente dos componentes internos do motor (válvulas, sedes de válvulas, pistões). NÃO utilize ALS em veículos de uso diário ou em vias públicas. O uso do ALS em competição deve ser limitado ao mínimo necessário e com monitoramento contínuo das temperaturas de escape.

12.4 Flat Shift / Redução de Torque

O flat shift permite trocas de marcha sem tirar o pé do acelerador, reduzindo momentaneamente o torque do motor para permitir o desengrenamento e reengrenamento da transmissão.

12.4.1 Habilitação e Condições

- **Flat Shift Enable:** Habilita ou desabilita a funcionalidade de flat shift.
- **Activation Conditions:**
 - **TPS acima de limiar:** O motorista deve estar em aceleração significativa (TPS > 70–80%) para que o flat shift funcione. Em cargas parciais, trocas normais são mais apropriadas.
 - **Clutch Switch:** A embreagem deve ser pressionada para ativar o flat shift. O sistema detecta o acionamento da embreagem e inicia a redução de torque.
 - **RPM Range:** O flat shift opera apenas dentro de uma faixa de RPM válida (acima de um mínimo e abaixo do rev limiter).
 - **Gear Change Detection:** O sistema pode detectar a troca de marcha pela mudança abrupta no sinal de RPM quando a embreagem é acionada.

12.4.2 Tempo de Corte (Cut Time)

- **Cut Duration:** Tempo em milissegundos durante o qual a redução de torque é aplicada após a detecção da troca de marcha. Valores típicos: 50–200 ms.
 - Tempos muito curtos podem não ser suficientes para completar a troca.
 - Tempos muito longos causam perda de aceleração desnecessária.
- **Recovery Ramp:** Taxa de recuperação gradual do torque após o período de corte, em ms. Uma recuperação progressiva (50–100 ms) evita impacto mecânico na transmissão quando o torque é reestabelecido abruptamente.

12.4.3 Tabelas por Marcha

O MotroLink Manager permite configurar parâmetros de flat shift individuais para cada marcha, pois as características de troca variam conforme a relação de transmissão:

- **Tabela de Retardo por Marcha:** Marcha → Retardo de ignição (graus).
 - Trocas de marchas baixas (1→2, 2→3) geralmente requerem mais redução de torque, pois as relações são mais espaçadas e a variação de RPM é maior.
 - Trocas de marchas altas (4→5, 5→6) requerem menos intervenção, pois as relações são mais próximas.
 - Valores típicos: 10–25 extdegree de retardo para marchas baixas, 5–15 extdegree para marchas altas.
- **Tabela de Corte por Marcha:** Marcha → Porcentagem de corte (%).
 - Define a porcentagem de eventos de ignição cortados durante o flat shift para cada marcha.
 - Valores típicos: 30–60% para marchas baixas, 10–30% para marchas altas.
- **Tabela de Tempo por Marcha:** Marcha → Duração do corte (ms).
 - O tempo de corte pode variar por marcha para acomodar diferenças na velocidade de sincronização.
 - Valores típicos: 100–200 ms para marchas baixas, 50–150 ms para marchas altas.

12.4.4 Métodos de Redução de Torque

- **Ignition Retard:** Retarda o ponto de ignição para reduzir o torque produzido. Método suave, mantém combustão no cilindro.
- **Ignition Cut:** Corta completamente a ignição em eventos selecionados. Redução de torque mais agressiva.
- **Fuel Cut:** Corta a injeção de combustível. Redução de torque máxima, mas pode causar lean spikes e perda de boost.
- **ETB Reduction (Borboleta Eletrônica):** Em motores com borboleta eletrônica, a posição da borboleta pode ser reduzida momentaneamente para diminuir o fluxo de ar. Este método é o mais suave e não causa combustão irregular.
- **Combinação:** O MotroLink Manager permite combinar múltiplos métodos para um controle refinado. Por exemplo: 15 extdegree de retardo + 30% de corte de ignição durante 150 ms.



Flat Shift e Transmissão

A utilização do flat shift com configuração inadequada pode danificar a transmissão. Se a redução de torque for insuficiente, o engrenamento sob carga pode causar desgaste prematuro dos sincronizadores e dos dentes das engrenagens. Se a redução

for excessiva ou muito longa, o impacto de torque na reconexão pode danificar componentes da transmissão. Calibre sempre com incrementos graduais e monitore o comportamento da troca de marcha com atenção à suavidade do engrenamento.

Flat Shift em Câmbios Sequenciais

Em câmbios sequenciais de competição com dog engagement (sem sincronizadores), o flat shift é particularmente eficaz, pois esses câmbios são projetados para trocas sob carga parcial. Nesse caso, a redução de torque necessária é menor e o tempo de corte pode ser mais curto (30–80 ms). Câmbios sincronizados convencionais requerem mais redução de torque e tempos mais longos.

13 Nitro e Cruise Control

Esta seção aborda duas funcionalidades distintas disponíveis no MotroLink Manager : o controle de injeção de óxido nitroso (nitro) e o controle de cruzeiro (cruise control). Embora sejam funções com propósitos completamente diferentes, ambas envolvem o controle de saídas auxiliares e a interação com o mapa de combustível e ignição.

13.1 Controle de Nitro

13.1.1 Teoria de Funcionamento

O óxido nitroso (N_2O), popularmente conhecido como “nitro”, é um gás oxidante utilizado para aumentar significativamente a potência do motor por curtos períodos. Quando injetado no coletor de admissão (ou diretamente nos cilindros), o N_2O se decompõe termicamente em nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) a temperaturas acima de aproximadamente 300 extdegreeC. O oxigênio liberado permite queimar mais combustível por ciclo, aumentando a potência.

Características fundamentais do N_2O :

- **Conteúdo de oxigênio:** O N_2O contém aproximadamente 36% de oxigênio em massa, significativamente mais do que o ar atmosférico (23%).
- **Efeito de resfriamento:** A evaporação do N_2O líquido absorve calor, resfriando a carga de admissão. Isso aumenta a densidade do ar e reduz a tendência à detonação.
- **Aumento de pressão efetiva:** A maior disponibilidade de oxigênio permite injetar e queimar mais combustível, aumentando a pressão média efetiva do ciclo.
- **Duração limitada:** O sistema é limitado pelo volume do cilindro de N_2O . Uma utilização típica pode durar de alguns segundos a poucas dezenas de segundos, dependendo do fluxo e do tamanho do cilindro.

⚡ Riscos do Óxido Nitroso

O uso de óxido nitroso apresenta riscos significativos se não for realizado com calibração e hardware adequados: (1) **Detonação severa:** O aumento de pressão no cilindro pode causar detonação destrutiva se a ignição não for retardada adequadamente ou se o enriquecimento de combustível for insuficiente; (2) **Lean condition (mistura magra):** Se o sistema de enriquecimento de combustível falhar enquanto o N_2O continua sendo injetado, a mistura extremamente magra com alta concentração de oxigênio pode causar temperaturas de combustão destrutivas, derretendo pistões e válvulas; (3) **Sobrecarga mecânica:** O aumento abrupto de pressão no cilindro pode exceder os limites estruturais de pistões, bielas, virabrequim e bloco; (4) **Backfire (retrocesso de chama):** Acúmulo de N_2O no coletor de admissão pode causar explosão no coletor se houver ignição acidental; (5) **Risco de incêndio:** Vazamentos de N_2O em ambiente fechado ou próximo a fontes de calor podem causar incêndio, pois o N_2O é um forte oxidante.

13.1.2 Tipos de Sistema

O MotroLink Manager pode controlar diferentes tipos de sistemas de N₂O:

- **Sistema Úmido (Wet):** Injeta N₂O e combustível adicional simultaneamente através de um mesmo bico (fogger nozzle) ou bicos separados. O enriquecimento de combustível é fornecido primariamente pelo próprio sistema de N₂O (via solenoide de combustível dedicado), com complemento pela ECU. É o tipo mais seguro, pois o suprimento de combustível está mecanicamente acoplado ao suprimento de N₂O.
- **Sistema Seco (Dry):** Injeta apenas N₂O. Todo o combustível adicional necessário é fornecido pela ECU através do aumento do tempo de injeção dos bicos originais. É mais simples de instalar, mas requer que os bicos de combustível originais tenham vazão suficiente para fornecer o combustível extra necessário.
- **Sistema Direto (Direct Port):** Cada cilindro recebe seu próprio bico de N₂O (e combustível, no caso do sistema úmido), garantindo distribuição igual. É o mais preciso e potente, mas também o mais complexo e caro.

13.1.3 Habilitação e Configuração

- **Nitrous Enable:** Habilita ou desabilita o controle de nitro no MotroLink Manager.
- **Nitrous Mode:** Seleciona o tipo de sistema (Wet, Dry, ou Direct Port).
- **Number of Stages:** Número de estágios de N₂O. Cada estágio possui seu próprio solenoide e condições de ativação. Sistemas multi-estágio permitem ativação progressiva (estágio 1 primeiro, depois estágio 2) para uma entrega mais controlada de potência.

13.1.4 Condições de Ativação

O sistema de N₂O possui múltiplas condições de segurança que devem ser satisfeitas antes da ativação:

- **RPM Mínimo:** O motor deve estar acima de um RPM mínimo para garantir que há fluxo de ar suficiente e que o motor está em condição de suportar a potência adicional. Valores típicos: 2500–4000 RPM.
- **RPM Máximo:** Limite superior de RPM para desativação do N₂O, protegendo o motor contra sobrerrotação com potência adicional. Geralmente configurado 500–1000 RPM abaixo do rev limiter.
- **TPS Mínimo:** Posição mínima da borboleta para ativação. Tipicamente 80–100% (WOT ou próximo). Isso garante que o N₂O só é injetado quando o motorista solicita potência máxima.
- **CLT Mínima:** Temperatura mínima do líquido de arrefecimento. O motor deve estar na temperatura de operação para suportar o aumento de potência. Valor típico: 70–80 extdegreeC.

- **CLT Máxima:** Temperatura máxima do líquido de arrefecimento para proteção contra superaquecimento. Se o motor já está próximo do limite térmico, adicionar N₂O é perigoso. Valor típico: 100–105 extdegreeC.
- **MAP/Boost Mínimo:** Em motores turbo, pode ser desejável ativar o N₂O somente quando o turbo está em spool (boost acima de um limiar).
- **Fuel Pressure (opcional):** Se disponível, o sensor de pressão de combustível pode ser utilizado como condição de segurança. Se a pressão de combustível cair abaixo de um limiar, o N₂O é desativado para evitar condição magra.
- **Arming Switch:** Interruptor de armamento (arm switch) que deve ser ativado pelo motorista antes que o sistema aceite o comando de ativação. Funciona como uma trava de segurança para evitar ativações acidentais.
- **Activation Input:** Entrada digital para o botão de ativação (geralmente no volante ou na alavanca de câmbio). Quando pressionado e todas as demais condições são satisfeitas, o N₂O é ativado.

! Condições de Segurança

NUNCA desabilite ou ignore as condições de segurança do sistema de N₂O. Cada condição existe para proteger o motor e o motorista contra situações potencialmente destrutivas. A ativação de N₂O com o motor frio, em RPM muito baixo ou em condição de pressão de combustível insuficiente pode causar danos catastróficos ao motor em frações de segundo.

13.1.5 Configuração de Saídas

- **N₂O Solenoid Output:** Pino de saída auxiliar atribuído ao solenoide de N₂O. Para sistemas multi-estágio, cada estágio possui sua própria saída.
- **Fuel Solenoid Output (sistema Wet):** Pino de saída auxiliar atribuído ao solenoide de combustível do sistema úmido.
- **Output Mode:**
 - **On/Off:** O solenoide é simplesmente ligado ou desligado. Modo mais simples.
 - **PWM (Progressive):** O solenoide é controlado por PWM, permitindo injeção progressiva de N₂O. Isso possibilita uma entrega mais suave de potência, especialmente na ativação inicial.
- **Progressive Ramp Time:** Para modo PWM, define o tempo (em ms) para rampa de 0% a 100% de duty cycle na ativação. Valores típicos: 200–1000 ms. Uma rampa mais longa entrega a potência de forma mais progressiva.

13.1.6 Enriquecimento de Combustível

O enriquecimento de combustível durante a injeção de N₂O é absolutamente crítico para a segurança do motor:

- **Fuel Enrichment (%)**: Porcentagem de aumento no tempo de injeção quando o N_2O está ativo. O valor depende do fluxo de N_2O e do tipo de sistema:
 - **Sistema seco**: 100% do combustível adicional deve ser fornecido pela ECU. O enriquecimento pode variar de 15% a 50% ou mais, dependendo do tamanho do jato de N_2O .
 - **Sistema úmido**: A maior parte do combustível adicional é fornecida pelo solenoide de combustível do sistema. A ECU pode precisar de apenas 5–15% de enriquecimento adicional para compensação fina.
- **Fuel Enrichment Table (opcional)**: Para controle mais preciso, o enriquecimento pode ser definido como uma tabela RPM → Enriquecimento (%), permitindo ajuste em diferentes faixas de rotação.
- **Pre-Enrichment**: Alguns calibradores aplicam um breve enriquecimento antes da ativação do solenoide de N_2O (50–100 ms antes) para garantir que a mistura não fique momentaneamente magra durante a transição.

Mistura Magra com N_2O

A condição mais perigosa em um sistema de N_2O é a mistura magra (lean condition). Com a alta concentração de oxigênio fornecida pelo N_2O , uma mistura magra causa temperaturas de combustão extremas que podem derreter pistões de alumínio em poucos ciclos do motor. SEMPRE calibre o enriquecimento com margem de segurança (ligeiramente rico) e monitore o sensor de lambda wideband durante todos os testes com N_2O . Se o lambda indicar mistura magra, DESATIVE o N_2O imediatamente.

13.1.7 Retardo de Ignição

O avanço de ignição deve ser reduzido durante a injeção de N_2O para evitar detonação:

- **Ignition Retard (graus)**: Retardo de ignição fixo aplicado quando o N_2O está ativo. Valores típicos: 2–8 extdegree de retardo por estágio de N_2O . Jatos maiores requerem mais retardo.
- **Ignition Retard Table (opcional)**: RPM → Retardo (graus), para ajuste fino em diferentes faixas de rotação. Em RPMs mais baixos, onde a tendência à detonação é maior, mais retardo pode ser necessário.
- **Per-Stage Retard**: Em sistemas multi-estágio, cada estágio pode ter seu próprio retardo, e os retardos são acumulativos. Exemplo: Estágio 1 = 3 extdegree de retardo, Estágio 2 = 5 extdegree adicionais (total de 8 extdegree).

13.1.8 Proteções e Limites Adicionais

- **Maximum On-Time**: Tempo máximo contínuo de ativação do N_2O em segundos. Após esse tempo, o sistema desativa automaticamente para proteger o motor e conservar o suprimento de N_2O . Valores típicos: 5–15 segundos.

- **Cooldown Time:** Tempo mínimo entre ativações consecutivas, permitindo que o motor se estabilize. Valores típicos: 5–30 segundos.
- **Bottle Pressure Sensor (opcional):** Se um sensor de pressão do cilindro de N₂O estiver instalado, o sistema pode monitorar a pressão e desativar o N₂O quando a pressão cai abaixo de um limiar (indicando cilindro quase vazio ou temperatura ambiente muito baixa, resultando em pressão insuficiente para atomização adequada).
- **EGT Limit (opcional):** Se sensores de temperatura de gases de escape (EGT) estiverem instalados, o sistema pode desativar o N₂O quando a EGT exceder um limite seguro.
- **Knock Deactivation:** Se o sensor de detonação detectar knock durante a operação com N₂O, o sistema pode desativar automaticamente o N₂O como medida de proteção, além de aplicar retardo de ignição adicional.

Calibração em Dinamômetro

A calibração inicial do sistema de N₂O deve SEMPRE ser realizada em dinamômetro com monitoramento completo de lambda wideband, EGT (se disponível), pressão de combustível e knock. Nunca teste N₂O pela primeira vez em estrada. O dinamômetro permite interromper imediatamente o teste em caso de condição magra ou detonação, minimizando o risco de danos.

13.2 Cruise Control

O MotroLink Manager oferece funcionalidade de controle de cruzeiro (cruise control) para manutenção automática da velocidade do veículo. Essa função é principalmente útil em aplicações de veículos de rua ou rally com longos trechos de velocidade constante.

13.2.1 Teoria de Funcionamento

O cruise control mantém a velocidade do veículo em um valor definido pelo motorista, modulando automaticamente a posição da borboleta (em motores com borboleta eletrônica — ETB) ou o duty cycle de uma válvula de controle de ar (em motores com borboleta mecânica e IAC). O sistema utiliza realimentação do sensor de velocidade do veículo (VSS) para ajustar continuamente a saída e manter a velocidade alvo.

O controle é baseado em um sistema feed-forward + PID:

- **Feed-Forward:** Uma curva pré-calibrada define a posição aproximada da borboleta (ou duty cycle do IAC) necessária para manter cada velocidade. Isso fornece a maior parte da atuação.
- **PID:** Um controlador PID aplica correções finas sobre o feed-forward para compensar variações de inclinação, vento, peso do veículo e outras perturbações.

13.2.2 Habilitação e Configuração

- **Cruise Control Enable:** Habilita ou desabilita a funcionalidade de cruise control.
- **Control Method:**

- **ETB (Borboleta Eletrônica):** O cruise control modula diretamente a posição da borboleta eletrônica. Este é o método preferido, pois oferece controle preciso e suave.
- **IAC (Válvula de Ar de Marcha Lenta):** Em motores com borboleta mecânica, o cruise control pode atuar sobre a válvula IAC para introduzir ar adicional. Este método é limitado em capacidade de controle e só funciona em velocidades baixas/moderadas.
- **Minimum Speed:** Velocidade mínima para ativação do cruise control. Abaixo dessa velocidade, o cruise é automaticamente desativado. Valor típico: 30–40 km/h.
- **Maximum Speed:** Velocidade máxima permitida pelo cruise control. Funciona como limitador de velocidade. Valor típico: depende da aplicação.

13.2.3 Botões de Controle

O cruise control requer entradas digitais para os botões de controle:

- **Set/Accel:** Botão para definir a velocidade alvo (velocidade atual do veículo no momento do pressionamento) e para aumentar a velocidade alvo em incrementos (cada pressionamento adiciona tipicamente 1–2 km/h).
- **Coast/Decel:** Botão para reduzir a velocidade alvo em decrementos. Cada pressionamento reduz a velocidade alvo em 1–2 km/h.
- **Resume:** Botão para retomar a última velocidade alvo definida após uma desativação temporária.
- **Cancel:** Botão para desativar o cruise control sem apagar a velocidade alvo memorizada.
- **On/Off (Master Switch):** Interruptor principal para habilitar/desabilitar o sistema de cruise.

Cada botão é atribuído a uma entrada digital do MotroLink Manager :

- **Set/Accel Input:** Pino de entrada digital para o botão Set/Accel.
- **Coast/Decel Input:** Pino de entrada digital para o botão Coast/Decel.
- **Resume Input:** Pino de entrada digital para o botão Resume.
- **Cancel Input:** Pino de entrada digital para o botão Cancel. Pode ser configurado como o interruptor do pedal de freio (brake switch) — pressionar o freio cancela automaticamente o cruise.
- **Clutch Cancel:** Se configurado, pressionar a embreagem também cancela o cruise control.

Configuração de Botões

Muitos veículos com cruise control de fábrica possuem um stalk (alavanca) no volante com múltiplas posições. As posições podem ser lidas como entradas digitais individuais ou como uma entrada analógica com resistores divisores (cada posição gera uma tensão diferente). Para stalks analógicos, configure uma entrada analógica com limites de tensão para cada função.

13.2.4 Curva Feed-Forward

A curva feed-forward é o coração do controle de cruzeiro e define a relação base entre velocidade alvo e atuação:

- **Formato:** Tabela unidimensional — Velocidade (km/h) → Posição da borboleta (%) ou Duty IAC (%).
- **Calibração:** Para calibrar a curva feed-forward:
 1. Em uma estrada plana e reta, estabilize o veículo em diversas velocidades (por exemplo, 40, 60, 80, 100, 120 km/h).
 2. Para cada velocidade, anote a posição da borboleta (ou duty IAC) necessária para manter a velocidade constante.
 3. Preencha a tabela com esses valores.
- **Valores típicos (ETB):**
 - 40 km/h: 8–12% de borboleta.
 - 60 km/h: 12–18% de borboleta.
 - 80 km/h: 16–24% de borboleta.
 - 100 km/h: 22–32% de borboleta.
 - 120 km/h: 30–42% de borboleta.
- Os valores exatos dependem enormemente do veículo (peso, aerodinâmica, relação de transmissão, tamanho do motor).

13.2.5 PID do Cruise Control

O controlador PID do cruise control corrige desvios da velocidade alvo:

- **P Gain:** Ganho proporcional. Controla a resposta ao erro de velocidade. Valores típicos: 0,5–3,0. Ganhos muito altos causam oscilação da velocidade (surge).
- **I Gain:** Ganho integral. Elimina o erro em regime permanente (por exemplo, em subidas onde o feed-forward não é suficiente). Valores típicos: 0,01–0,5.
- **D Gain:** Ganho derivativo. Amortece a resposta. Valores típicos: 0,0–1,0. Útil para reduzir overshoot ao retomar a velocidade alvo após uma perturbação.
- **Output Limits:** Limites mínimo e máximo da saída do PID (posição da borboleta). O limite máximo impede que o cruise control abra demais a borboleta, funcionando como limitador de torque.

13.2.6 Condições de Segurança

- **Brake Deactivation:** Pressionar o pedal de freio desativa imediatamente o cruise control.
- **Clutch Deactivation:** Pressionar a embreagem desativa o cruise control (se configurado).
- **Speed Deviation Limit:** Se a velocidade real desviar mais do que um limiar configurável da velocidade alvo (por exemplo, mais de 15–20 km/h), o cruise é desativado automaticamente. Isso protege contra situações como descidas muito íngremes onde o freio-motor é insuficiente.
- **RPM Limits:** O cruise é desativado se o RPM exceder o máximo ou cair abaixo do mínimo (indicando que uma troca de marcha é necessária ou que o motor está prestes a calar).
- **TPS Override:** Se o motorista pressionar o acelerador além da posição comandada pelo cruise, o sistema permite a aceleração manual temporária. Ao soltar o acelerador, o cruise retoma o controle na velocidade alvo memorizada.



Cruise Control e Segurança

O cruise control é uma conveniência de condução e não deve ser utilizado em condições adversas como piso molhado, neve, trânsito intenso ou estradas sinuosas. Em veículos de competição, o cruise control geralmente não é relevante e pode ser desabilitado para simplificar a configuração. Certifique-se de que todas as condições de desativação estão corretamente configuradas antes de utilizar o cruise control em vias públicas.

14 Controle de Tração

O controle de tração (traction control) é um sistema de segurança e desempenho que detecta e limita a patinação excessiva das rodas motrizes, mantendo a aderência e a controlabilidade do veículo. O MotroLink Manager oferece três estratégias independentes de controle de tração que podem ser utilizadas individualmente ou em combinação: redução via borboleta eletrônica (ETB), retardo de ignição (timing) e corte de ignição. Cada estratégia tem características distintas em termos de velocidade de resposta, suavidade e impacto no desempenho.

14.1 Teoria de Funcionamento

14.1.1 Conceito de Slip Ratio (Taxa de Escorregamento)

O slip ratio é a métrica fundamental utilizada pelo controle de tração para quantificar a patinação das rodas. Ele é definido como a diferença relativa entre a velocidade das rodas motrizes e a velocidade do veículo (determinada pelas rodas não motrizes):

$$\text{Slip Ratio} = \frac{V_{\text{motriz}} - V_{\text{veículo}}}{V_{\text{veículo}}} \times 100\%$$

Onde:

- V_{motriz} é a velocidade periférica das rodas motrizes (calculada a partir do sensor de velocidade das rodas motrizes e do diâmetro do pneu).
- $V_{\text{veículo}}$ é a velocidade do veículo (calculada a partir do sensor de velocidade das rodas não motrizes).

Interpretação do slip ratio:

- **0%:** As rodas motrizes e o veículo estão na mesma velocidade — sem patinação. A roda rola sem escorregamento.
- **5–15%:** Faixa de escorregamento ótimo para máxima força de tração na maioria das superfícies. Algum escorregamento é necessário para gerar força de tração.
- **15–30%:** Escorregamento excessivo. A força de tração começa a diminuir. O pneu está na transição entre aderência e patinação.
- **30–100%:** Patinação severa. O pneu está perdendo aderência rapidamente. Acima de 50%, o pneu está essencialmente girando livre.
- **100%:** As rodas motrizes giram no dobro da velocidade do veículo — patinação completa a partir do repouso (veículo parado com rodas girando, slip ratio tende ao infinito, mas é limitado na prática).

14.1.2 Curva de Aderência do Pneu

A relação entre slip ratio e coeficiente de atrito do pneu segue uma curva característica:

- A partir de 0% de slip, o coeficiente de atrito aumenta rapidamente.

- O coeficiente de atrito atinge o pico em torno de 8–15% de slip (dependendo do tipo de pneu e superfície).
- Acima do ponto de pico, o coeficiente de atrito diminui — mais escorregamento resulta em MENOS força de tração.
- Em superfícies de baixa aderência (chuva, terra, neve), o pico ocorre em slip ratios mais baixos e o coeficiente de atrito máximo é significativamente menor.

O objetivo do controle de tração é manter o slip ratio próximo ao ponto de máxima aderência, intervindo quando a patinação excede esse ponto.

14.1.3 Sensores de Velocidade de Roda (Wheel Speed Sensors)

O controle de tração requer informação de velocidade de pelo menos duas fontes:

- **Rodas motrizes:** A velocidade das rodas que recebem torque do motor. Em veículos de tração traseira, são as rodas traseiras; em tração dianteira, as dianteiras.
- **Rodas não motrizes (referência):** A velocidade das rodas que não recebem torque direto do motor, servindo como referência de velocidade real do veículo.

Tipos de sensores suportados pelo MotroLink Manager :

- **Sensor Hall (digital):** Produz pulsos digitais de frequência proporcional à velocidade. Tipo mais comum em veículos modernos (ABS). Requer alimentação de 5V ou 12V.
- **Sensor VR (relutância variável):** Produz uma onda AC cuja frequência e amplitude são proporcionais à velocidade. Comum em veículos mais antigos. Não requer alimentação externa, mas o sinal pode ser fraco em baixas velocidades.
- **Sensor ABS (via CAN bus):** Em veículos com ABS, as velocidades de roda podem ser lidas diretamente da rede CAN, eliminando a necessidade de fiação adicional. Requer decodificação do protocolo CAN específico do veículo.

Configuração dos sensores no MotroLink Manager :

- **Driven Wheel Speed Input:** Entrada de frequência para o sensor de velocidade da roda motriz. Configure o tipo de sensor (Hall/VR), o número de dentes do anel relutante e o diâmetro do pneu para conversão correta de frequência para km/h.
- **Non-Driven Wheel Speed Input:** Entrada de frequência para o sensor de velocidade da roda não motriz (referência).
- **Pulses Per Revolution:** Número de pulsos por revolução da roda. Depende do anel relutante do sensor ABS (tipicamente 44–48 dentes) ou do relutante do diferencial/transmissão.
- **Tire Diameter:** Diâmetro externo do pneu em milímetros. Essencial para o cálculo correto da velocidade a partir da frequência de rotação. Exemplo: pneu 225/45R17 tem diâmetro aproximado de 634 mm.
- **Filtering:** Filtro de suavização do sinal de velocidade para eliminar ruído e variações causadas por irregularidades da pista. Um filtro excessivo introduz atraso na detecção de patinação.

Calibração dos Sensores

A precisão do controle de tração depende diretamente da precisão das medições de velocidade. Verifique se os diâmetros de pneu configurados correspondem aos pneus realmente instalados no veículo. Pneus desgastados têm diâmetro menor. Em veículos com pneus de tamanhos diferentes entre eixos (stagger), configure os diâmetros corretamente para cada eixo para evitar detecção errônea de slip.

14.1.4 Estratégias de Controle de Tração

O MotroLink Manager oferece três estratégias de intervenção, cada uma com características distintas:

- **Redução via ETB (Borboleta Eletrônica):** Reduz a abertura da borboleta para diminuir o torque do motor. É a estratégia mais suave e progressiva, pois afeta o enchimento dos cilindros gradualmente. Porém, tem a resposta mais lenta (100–300 ms para efeito completo), pois depende da dinâmica do coletor de admissão. Ideal como primeira linha de controle para patinações moderadas.
- **Retardo de Ignição (Timing Retard):** Retarda o ponto de ignição para reduzir o torque produzido por cada ciclo de combustão. Resposta mais rápida que a ETB (efeito quase imediato no próximo ciclo de combustão), mas limitada na quantidade de redução de torque possível sem causar problemas (excesso de retardo causa superaquecimento do escape). Ideal para intervenções moderadas e rápidas.
- **Corte de Ignição (Spark Cut):** Corta completamente a ignição em uma porcentagem dos cilindros. É a estratégia mais agressiva e rápida, capaz de reduzir o torque drasticamente em milissegundos. Porém, é a menos suave e pode causar oscilações perceptíveis de torque (“tranco”). Ideal como última linha de defesa para patinações severas.

Combinação de Estratégias

Para o melhor resultado, recomenda-se utilizar as três estratégias em combinação, com diferentes limiares de ativação. Por exemplo: slip abaixo de 10% → apenas ETB intervém; slip entre 10% e 20% → ETB + retardo de ignição; slip acima de 20% → ETB + retardo + corte de ignição. Essa abordagem em camadas proporciona controle suave em patinações leves e intervenção agressiva quando necessário.

14.2 Tração via ETB (Borboleta Eletrônica)

A estratégia de controle de tração via ETB reduz a abertura da borboleta eletrônica proporcionalmente ao slip ratio, diminuindo o fluxo de ar e, conseqüentemente, o torque do motor.

14.2.1 Tabela de Controle: Velocidade × Slip Ratio

A tabela principal de controle via ETB mapeia a porcentagem de redução da abertura da borboleta:

- **Eixo X:** Velocidade do veículo (km/h). Permite diferentes níveis de intervenção conforme a velocidade. Em velocidades baixas (saída de curva), mais intervenção pode ser necessária; em velocidades altas (reta), menos intervenção preserva a aceleração.
- **Eixo Y:** Slip Ratio (%). Define o nível de patinação detectado.
- **Valores da tabela:** Redução de ETB em porcentagem (0–100%). 0% = sem intervenção (borboleta na posição comandada pelo motorista). 100% = borboleta completamente fechada (intervenção máxima).

Diretrizes de calibração:

- **Slip 0–5%, qualquer velocidade:** 0% de redução. Este nível de slip é normal e desejável para tração.
- **Slip 5–10%, velocidade baixa (0–60 km/h):** 0–10% de redução. Intervenção mínima, pois algum escorregamento é aceitável em acelerações de baixa velocidade.
- **Slip 5–10%, velocidade alta (60–200 km/h):** 5–20% de redução. Em alta velocidade, mesmo patinação moderada pode causar perda de estabilidade.
- **Slip 10–20%, velocidade baixa:** 10–30% de redução. Patinação significativa, intervenção moderada.
- **Slip 10–20%, velocidade alta:** 20–50% de redução. Situação potencialmente perigosa em alta velocidade, intervenção mais agressiva.
- **Slip 20–50%, qualquer velocidade:** 30–70% de redução. Patinação severa, intervenção forte necessária.
- **Slip acima de 50%:** 50–100% de redução. Perda de controle iminente, intervenção máxima.

14.2.2 Parâmetros de Resposta

- **Response Rate (Attack):** Velocidade com que a redução de ETB é aplicada quando o slip ratio aumenta, em %/ms ou como constante de tempo. Uma resposta rápida (alta taxa de ataque) intervém mais cedo, mas pode causar oscilação. Valores típicos: 5–20%/100ms.
- **Release Rate (Decay):** Velocidade com que a redução de ETB é removida quando o slip ratio diminui. Uma liberação mais lenta que o ataque evita reaplicação imediata de torque que poderia causar nova patinação. Valores típicos: 2–10%/100ms (mais lento que o ataque).
- **Minimum Intervention Time:** Tempo mínimo de intervenção, evitando que o sistema ligue e desligue rapidamente em condições limítrofes. Valor típico: 100–300 ms.

i ETB e Turbo

Em motores turboalimentados, a redução da abertura da borboleta causa uma queda na pressão de boost após algum tempo. Isso pode resultar em perda de boost excessiva que demora a ser recuperada quando a patinação cessa. Para mitigar esse efeito, limite a redução máxima de ETB a um valor que mantenha boost mínimo (por exemplo, máximo de 50% de redução em vez de 100%) e dependa das outras estratégias (retardo e corte) para intervenções mais agressivas.

14.3 Tração via Timing (Retardo de Ignição)

A estratégia de controle de tração via retardo de ignição reduz o torque do motor retardando o ponto de ignição proporcionalmente ao slip ratio. O retardo faz com que a combustão gere menos pressão útil no cilindro, reduzindo o torque sem afetar o fluxo de ar (e, portanto, sem afetar diretamente o boost do turbo).

14.3.1 Tabela de Controle: Velocidade × Slip Ratio

- **Eixo X:** Velocidade do veículo (km/h).
- **Eixo Y:** Slip Ratio (%).
- **Valores da tabela:** Retardo de ignição em graus de virabrequim. O valor da tabela é SUBTRAÍDO do avanço de ignição base. 0 extdegree = sem retardo. Valores positivos = retardo aplicado.

Diretrizes de calibração:

- **Slip 0–5%:** 0 extdegree de retardo. Sem intervenção.
- **Slip 5–10%, velocidade baixa:** 0–5 extdegree de retardo. Intervenção suave.
- **Slip 5–10%, velocidade alta:** 3–8 extdegree de retardo. Intervenção moderada.
- **Slip 10–20%, velocidade baixa:** 5–15 extdegree de retardo. Intervenção significativa.
- **Slip 10–20%, velocidade alta:** 10–20 extdegree de retardo. Intervenção forte.
- **Slip 20–50%:** 15–30 extdegree de retardo. Intervenção agressiva.
- **Slip acima de 50%:** 25–40 extdegree de retardo. Intervenção máxima.

14.3.2 Limites de Retardo

- **Maximum Retard:** Retardo máximo permitido pelo controle de tração, independente do valor da tabela. Limitar o retardo máximo a 30–40 extdegree protege contra superaquecimento do escape e da turbina. Retardo acima de 40 extdegree pode causar combustão no coletor de escape (semelhante ao anti-lag), com risco de dano térmico.
- **Minimum Advance:** Avanço de ignição mínimo absoluto (piso). Mesmo com retardo de tração aplicado, o avanço nunca cai abaixo deste valor. Valores típicos: –5extdegree a 5extdegree BTDC.

14.3.3 Resposta do Retardo

- **Attack Rate:** Velocidade de aplicação do retardo, em graus por evento de ignição ou por ms. Uma taxa de ataque rápida (5–10 extdegree/evento) proporciona resposta quase instantânea. Valores típicos: 2–10 extdegree/evento.
- **Decay Rate:** Velocidade de remoção do retardo quando o slip ratio diminui. Deve ser mais lenta que o ataque para evitar repatinação. Valores típicos: 1–5 extdegree/evento.

Retardo e Temperatura de Escape

O retardo de ignição transfere mais energia térmica para os gases de escape, pois a combustão tardia resulta em gases mais quentes saindo do cilindro. Em aplicações com retardo de tração agressivo e prolongado (como em pistas molhadas onde a patinação é frequente), monitore a temperatura de escape (EGT) para evitar danos ao turbo e ao coletor de escape. Se a EGT exceder os limites seguros, reduza os valores de retardo na tabela de tração e dependa mais das estratégias de ETB e corte de ignição.

14.4 Tração via Corte de Ignição

A estratégia de corte de ignição é a mais agressiva das três, cortando completamente a combustão em uma porcentagem dos cilindros proporcionalmente ao slip ratio. Isso permite redução de torque extremamente rápida e significativa.

14.4.1 Tabela de Controle: Velocidade × Slip Ratio

- **Eixo X:** Velocidade do veículo (km/h).
- **Eixo Y:** Slip Ratio (%).
- **Valores da tabela:** Porcentagem de corte de ignição (0–100%). 0% = nenhum evento cortado. 50% = metade dos eventos de ignição são cortados. 100% = todos os eventos cortados (motor efetivamente desligado).

Diretrizes de calibração:

- **Slip 0–10%:** 0% de corte. A estratégia de corte geralmente não é utilizada para patinações leves — as estratégias de ETB e retardo são suficientes e mais suaves.
- **Slip 10–15%, velocidade baixa:** 0–10% de corte. Início de intervenção por corte apenas em patinação significativa.
- **Slip 10–15%, velocidade alta:** 5–20% de corte. Intervenção mais agressiva em alta velocidade.
- **Slip 15–25%, velocidade baixa:** 10–30% de corte. Patinação forte, corte moderado.
- **Slip 15–25%, velocidade alta:** 20–50% de corte. Situação perigosa em alta velocidade.

- **Slip 25–50%:** 30–70% de corte. Patinação severa.
- **Slip acima de 50%:** 50–100% de corte. Perda de controle, intervenção máxima.

14.4.2 Método de Corte

- **Spark Cut (Corte de Centelha):** Corta apenas a centelha de ignição. O combustível continua sendo injetado. A mistura não queimada é expelida no escape. Mantém o turbo em spool (semelhante ao ALS leve), mas pode causar afterfire e dano ao catalisador.
- **Spark + Fuel Cut:** Corta tanto a centelha quanto a injeção de combustível. Mais limpo para o escape e catalisador, mas o turbo pode perder spool durante cortes prolongados.
- **Cylinder Selection:** O MotroLink Manager pode distribuir os cortes de forma rotativa entre os cilindros (cada cilindro “perde” sua vez em sequência) ou aleatória. A distribuição rotativa proporciona uma redução de torque mais uniforme.

14.4.3 Parâmetros de Resposta

- **Attack Rate:** Velocidade de aumento da porcentagem de corte. Para a estratégia de corte, a resposta é geralmente configurada para ser rápida, pois é a última linha de defesa contra patinação severa. Valores típicos: 10–30%/100ms.
- **Decay Rate:** Velocidade de diminuição da porcentagem de corte. Deve ser significativamente mais lenta que o ataque para evitar aplicação/remoção repetida de torque. Valores típicos: 5–15%/100ms.
- **Minimum On-Time:** Tempo mínimo de corte por evento. Evita cortes extremamente breves que não produzem redução de torque efetiva. Valor típico: 1–3 eventos de ignição.

Corte de Ignição e Catalisador

O corte de ignição do tipo “spark cut only” (sem corte de combustível) envia mistura não queimada para o escape. Se o veículo possui catalisador, essa mistura pode inflamar no catalisador, causando superaquecimento e destruição do substrato cerâmico. Em veículos com catalisador, utilize SEMPRE a opção “spark + fuel cut” para a estratégia de corte de tração. Em veículos de competição sem catalisador, o spark cut only pode ser utilizado para benefício de manutenção do turbo.

14.4.4 Integração das Três Estratégias

Quando as três estratégias estão habilitadas simultaneamente, o MotroLink Manager aplica todas as intervenções cumulativamente. A redução total de torque é a combinação de:

1. Redução de fluxo de ar pela borboleta (ETB).
2. Redução de eficiência de combustão pelo retardo (timing).

3. Eliminação completa de eventos de combustão pelo corte (spark/fuel cut).

A calibração deve ser planejada de forma holística:

- **Primeira camada (ETB):** Ativa em slip ratios baixos (5–10%). Proporciona controle suave e quase imperceptível para o motorista.
- **Segunda camada (Timing):** Ativa em slip ratios moderados (10–20%). Adiciona redução de torque rápida sem perda de boost.
- **Terceira camada (Corte):** Ativa em slip ratios altos (acima de 15–20%). Provi-dencia intervenção máxima para situações de patinação severa.

Ajuste por Condição de Pista

Em condições variáveis de pista (seco vs. molhado, asfalto vs. terra), os limiares de slip ratio podem precisar de ajuste. Alguns calibradores configuram diferentes “mapas” de tração selecionáveis pelo motorista (via potenciômetro ou botão), variando de “off” (sem tração) a “máximo” (intervenção agressiva em slip ratios baixos). Isso pode ser implementado através das tabelas de blend ou de entradas analógicas que escalonam as tabelas de tração.

Tração e Competição

Em competição, o controle de tração é uma ferramenta de desempenho que requer calibração específica para cada pista, condição climática e estilo de pilotagem. Um controle de tração muito agressivo pode tornar o veículo lento (intervenção excessiva reduz a aceleração), enquanto um controle muito conservador permite patinação que desperdiça energia e desgasta pneus. A calibração ideal encontra o equilíbrio entre máxima utilização da aderência disponível e proteção contra perda de controle. Trabalhe sempre com o piloto para ajustar a sensibilidade do sistema conforme sua preferência e feedback.

Parte V

Comunicação e Extensibilidade

15 Barramento CAN

O barramento CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação serial amplamente utilizado na indústria automotiva para interligar módulos eletrônicos em um veículo. A ECU MotroLink Manager da MotroLink disponibiliza dois barramentos CAN independentes — CAN primário e CAN secundário — permitindo a comunicação simultânea com painéis, módulos de controle de tração, dataloggers, sensores inteligentes e outros dispositivos compatíveis.

15.1 Fundamentos do Barramento CAN

Antes de configurar o barramento CAN na ECU, é essencial compreender os conceitos fundamentais do protocolo.

15.1.1 Par Diferencial (CAN_H e CAN_L)

O barramento CAN utiliza um par diferencial de fios denominados **CAN_H** (CAN High) e **CAN_L** (CAN Low). A informação é codificada pela diferença de tensão entre esses dois condutores, e não pela tensão absoluta de cada um em relação à massa. Essa característica confere ao CAN uma excelente imunidade a ruídos eletromagnéticos, pois qualquer interferência que afete ambos os fios igualmente será cancelada na leitura diferencial.

Em estado recessivo (bit lógico “1”), ambos os fios permanecem em aproximadamente 2,5 V, resultando em uma diferença de 0 V. Em estado dominante (bit lógico “0”), CAN_H sobe para aproximadamente 3,5 V e CAN_L desce para aproximadamente 1,5 V, produzindo uma diferença de cerca de 2 V.

Cabeamento

Utilize cabos trançados (par trançado) para CAN_H e CAN_L. O trançamento reduz a susceptibilidade a interferências eletromagnéticas. Recomenda-se um passo de torção de 20 a 40 voltas por metro. Evite rotar o cabeamento CAN próximo a cabos de ignição, injetores ou fontes de alta corrente.

15.1.2 Resistor de Terminação de 120 Ω

Todo barramento CAN deve possuir exatamente dois resistores de terminação de 120 Ω, um em cada extremidade física do barramento. Esses resistores cumprem duas funções:

1. **Casamento de impedância:** Evitam reflexões de sinal que poderiam corromper dados em frequências elevadas.
2. **Polarização do barramento:** Garantem que o barramento retorne ao estado recessivo quando nenhum nó está transmitindo.

A resistência medida entre CAN_H e CAN_L com o barramento desligado deve ser de aproximadamente 60 Ω (dois resistores de 120 Ω em paralelo). Se a medição indicar 120 Ω, há apenas um resistor de terminação. Se indicar infinito ou valores muito altos, não há terminação — o barramento não funcionará de forma confiável.

Terminação obrigatória

A ausência de resistores de terminação é a causa mais frequente de problemas em barramentos CAN. Antes de reportar qualquer problema de comunicação, verifique a resistência entre CAN_H e CAN_L com um multímetro. O valor deve estar entre 55 Ω e 65 Ω .

15.1.3 Arbitragem e Prioridade de Mensagens

O protocolo CAN utiliza um mecanismo de arbitragem não destrutiva baseado no identificador da mensagem (*Message ID*). Quando dois ou mais nós tentam transmitir simultaneamente, ocorre o seguinte processo:

1. Cada nó transmite seu identificador bit a bit, do mais significativo para o menos significativo.
2. Um bit dominante (0) sempre sobrepõe um bit recessivo (1) no barramento.
3. Se um nó transmite um bit recessivo mas detecta um bit dominante no barramento, ele sabe que outro nó com maior prioridade está transmitindo e cessa sua transmissão imediatamente.
4. O nó com o menor identificador numérico vence a arbitragem e transmite sua mensagem sem interrupção.
5. Os nós que perderam a arbitragem tentam retransmitir automaticamente assim que o barramento estiver livre.

Esse mecanismo garante que nenhuma mensagem é destruída durante a arbitragem e que mensagens de maior prioridade (menor ID) sempre terão acesso ao barramento primeiro.

Frames CAN 2.0A e 2.0B

O CAN 2.0A utiliza identificadores de 11 bits (IDs de 0 a 2047), enquanto o CAN 2.0B (*Extended Frame*) utiliza identificadores de 29 bits. A ECU MotroLink Manager suporta ambos os formatos.

15.1.4 Detecção de Erros

O protocolo CAN implementa cinco mecanismos de detecção de erros:

- **Bit Error:** O transmissor monitora o barramento e detecta se o bit transmitido difere do bit lido (exceto durante a arbitragem).
- **Stuff Error:** Após cinco bits consecutivos de mesmo valor, um bit de preenchimento (*stuff bit*) oposto é inserido. A ausência desse bit indica erro.
- **CRC Error:** Cada frame CAN contém um campo CRC de 15 bits para verificação de integridade.

- **Form Error:** Certos campos do frame (delimitadores, EOF) devem conter valores fixos. Violações indicam erro.
- **ACK Error:** Pelo menos um nó receptor deve confirmar a recepção do frame. A ausência de *acknowledge* indica erro.

Quando um erro é detectado, um frame de erro é transmitido, e a mensagem é retransmitida automaticamente. Cada nó mantém contadores de erros internos (*Transmit Error Counter* e *Receive Error Counter*). Se um nó acumular muitos erros, ele entra em estado *Bus Off* e cessa a comunicação para proteger o barramento.

15.2 Configurações CAN

A ECU MotroLink Manager possui dois controladores CAN independentes: **CAN Primário** e **CAN Secundário**. Cada um pode ser configurado individualmente em termos de taxa de comunicação (*baudrate*) e protocolo.

15.2.1 CAN Primário e CAN Secundário

O CAN Primário é utilizado como canal principal de comunicação, normalmente dedicado à comunicação com o software de calibração MotroLink Manager, painéis digitais e dispositivos de telemetria. O CAN Secundário pode ser utilizado para comunicação com módulos auxiliares, sensores CAN (como sondas wideband e sensores de temperatura de gases de escapamento), ou para integração com barramentos CAN originais do veículo.

Os pinos de cada barramento CAN estão identificados no conector principal da ECU conforme o diagrama de pinagem do hardware. Cada barramento utiliza dois pinos: CAN_H e CAN_L.

! Isolamento de barramentos

Os dois barramentos CAN são eletricamente independentes. Não conecte dispositivos do CAN Primário ao CAN Secundário ou vice-versa, a menos que você esteja utilizando um gateway CAN-CAN. Misturar nós entre barramentos com *baudrates* diferentes causará erros de comunicação em todos os dispositivos.

15.2.2 Configuração de Baudrate

O *baudrate* (taxa de transmissão) define a velocidade de comunicação no barramento CAN. Todos os nós conectados ao mesmo barramento **devem** operar no mesmo *baudrate*. Os *baudrates* suportados pela ECU MotroLink Manager são:

- **125 kbps** — Utilizado em aplicações de baixa velocidade, como instrumentação e diagnóstico básico.
- **250 kbps** — Comum em veículos de passeio para redes de conforto e carroceria.
- **500 kbps** — O mais utilizado em aplicações automotivas de powertrain e controle do motor. **Recomendado como padrão.**
- **1 Mbps** — Utilizado em aplicações de alto desempenho e motorsport onde a latência mínima é crítica.

Baudrate padrão

O *baudrate* padrão de fábrica da ECU MotroLink Manager é **500 kbps** para ambos os barramentos CAN. Este é o valor mais comum na indústria automotiva para redes de powertrain e é compatível com a maioria dos painéis e dispositivos aftermarket.

Para alterar o *baudrate*, acesse o menu de configuração CAN no software MotroLink Manager. A alteração exige reinicialização da ECU para ter efeito.

15.2.3 Protocolos CAN Suportados

A ECU MotroLink Manager suporta diversos protocolos de comunicação sobre o barramento CAN:

- **Protocolo Proprietário MotroLink :** Protocolo padrão para comunicação entre a ECU e o software de calibração MotroLink Manager. Permite acesso completo a todos os parâmetros, tabelas, curvas e funções de diagnóstico.
- **CAN Genérico (Custom CAN):** Permite configurar manualmente os IDs, offsets, escalas e tamanhos dos dados a serem transmitidos e recebidos. Ideal para integração com dispositivos de terceiros.
- **Broadcast CAN:** A ECU pode ser configurada para transmitir periodicamente dados do motor (RPM, TPS, MAP, temperatura, lambda, etc.) em frames CAN pré-definidos, permitindo que painéis e dataloggers leiam esses dados sem necessidade de requisição.

Conflito de IDs

Ao configurar frames CAN personalizados, certifique-se de que os IDs utilizados não conflitem com IDs já em uso no barramento. Conflitos de ID causam erros de arbitragem e podem resultar em perda de dados ou comportamento imprevisível de outros módulos no barramento.

15.2.4 Diagnóstico do Barramento CAN

O software MotroLink Manager oferece ferramentas de diagnóstico para o barramento CAN:

- **Monitor CAN:** Exibe em tempo real todos os frames CAN recebidos no barramento selecionado, incluindo ID, DLC (*Data Length Code*), dados e taxa de recepção.
- **Contadores de erro:** Exibe os contadores TEC (*Transmit Error Counter*) e REC (*Receive Error Counter*) do controlador CAN da ECU.
- **Status do barramento:** Indica o estado atual do controlador — ativo, passivo de erro ou *bus-off*.

⚡ Estado Bus-Off

Se o controlador CAN entrar em estado *Bus-Off*, a ECU perderá toda comunicação pelo barramento afetado. Isso geralmente indica um problema grave de hardware (curto-circuito, falta de terminação, *baudrate* incompatível). Desligue a ignição, verifique a fiação e os resistores de terminação antes de religar o sistema.

15.3 Sensores via CAN

Uma das grandes vantagens do barramento CAN é a possibilidade de conectar sensores inteligentes que transmitem seus dados digitalmente, eliminando problemas de ruído analógico, queda de tensão em cabos longos e limitação de entradas analógicas. A ECU MotroLink Manager suporta nativamente diversos sensores via CAN.

15.3.1 Velocidade via CAN (Vehicle Speed Sensor — CAN)

Em muitos veículos modernos, o sinal de velocidade do veículo (VSS) está disponível no barramento CAN original e não mais como um sinal elétrico dedicado. A ECU MotroLink Manager pode ser configurada para ler a velocidade do veículo diretamente do barramento CAN, eliminando a necessidade de um sensor de velocidade físico conectado à ECU.

Para configurar a leitura de velocidade via CAN:

1. No software MotroLink Manager, acesse a configuração de velocidade do veículo.
2. Selecione a fonte de velocidade como **CAN**.
3. Configure o **ID do frame CAN** que contém a informação de velocidade.
4. Configure o **byte de início** (offset dentro do frame) e o **tamanho** (em bits) do dado de velocidade.
5. Configure o **fator de escala** e o **offset** para converter o valor bruto em km/h.
6. Selecione a **ordem de bytes** (*endianness*): *Big Endian* (Motorola) ou *Little Endian* (Intel).

i DBC e engenharia reversa

Se você possui o arquivo DBC (*Database CAN*) do veículo, as informações de ID, offset, escala e *endianness* podem ser extraídas diretamente. Caso contrário, será necessário utilizar o monitor CAN para identificar o frame que contém a velocidade, variando a velocidade do veículo e observando quais bytes mudam proporcionalmente.

15.3.2 Sonda Lambda/O2 via CAN (WideLink)

A ECU MotroLink Manager suporta a leitura de sondas lambda wideband via CAN através do protocolo **WideLink** da MotroLink, bem como protocolos de terceiros amplamente utilizados no mercado.

O WideLink é o controlador wideband da MotroLink, projetado para funcionar de forma integrada com a ECU MotroLink Manager. Ele transmite os seguintes dados via CAN:

- **Lambda:** Valor da relação ar/combustível em formato lambda (0,650 a 1,600) com resolução de 0,001.
- **AFR (Air-Fuel Ratio):** Relação ar/combustível em formato AFR, considerando o fator estequiométrico do combustível selecionado.
- **Temperatura da sonda:** Temperatura do elemento sensor em graus Celsius.
- **Status do aquecimento:** Indica se a sonda atingiu a temperatura operacional e está fornecendo leituras válidas.
- **Corrente de bombeamento:** Corrente I_p da célula de Nernst, útil para diagnóstico avançado.
- **Resistência interna:** Resistência do elemento sensor, indicador de saúde e temperatura da sonda.

Para configurar a leitura de lambda via CAN:

1. Conecte o WideLink ao barramento CAN Secundário da ECU (ou ao barramento configurado para sensores).
2. No software MotroLink Manager, acesse a configuração de sonda lambda.
3. Selecione a fonte de lambda como **CAN — WideLink**.
4. Certifique-se de que o *baudrate* do barramento CAN corresponde ao configurado no WideLink (padrão: 500 kbps).
5. Verifique a recepção de dados no monitor CAN e na tela de monitoramento lambda.

! Múltiplas sondas

Para motores com múltiplos bancos de cilindros, é possível conectar dois ou mais controladores WideLink ao mesmo barramento CAN, cada um com um ID diferente. Configure cada sonda para o banco correspondente na ECU para permitir correção lambda individual por banco.

Além do WideLink, a ECU suporta os seguintes protocolos de sonda wideband via CAN:

- **AEM X-Series** — Protocolo nativo dos controladores AEM X-Series.
- **Innovate LC-2** — Protocolo dos controladores Innovate Motorsports via CAN.
- **Bosch LSU 4.9 (CAN direto)** — Para controladores que transmitem dados da LSU 4.9 em formato CAN padronizado.

15.3.3 Temperatura de Gases de Escapamento via CAN (EGT)

Sensores de temperatura de gases de escapamento (EGT — *Exhaust Gas Temperature*) são frequentemente conectados via CAN quando se utiliza um módulo de expansão multicanal. Isso é especialmente útil em motores de múltiplos cilindros, onde monitorar a EGT individual de cada cilindro requer muitos canais de entrada.

A ECU MotroLink Manager suporta módulos EGT via CAN que transmitem a temperatura de até 16 cilindros em frames CAN dedicados. Para configurar:

1. Conecte o módulo EGT ao barramento CAN da ECU.
2. No software MotroLink Manager, acesse a configuração de EGT.
3. Selecione a fonte como **CAN**.
4. Configure o protocolo do módulo EGT utilizado.
5. Mapeie cada canal EGT ao cilindro correspondente.

Os dados de EGT via CAN podem ser utilizados para:

- **Proteção do motor:** Definir limites máximos de EGT com corte de ignição ou enriquecimento automático.
- **Balanceamento de cilindros:** Identificar cilindros com mistura mais pobre (EGT mais alta) ou mais rica (EGT mais baixa) e ajustar a correção individual de combustível.
- **Diagnóstico de detonação:** Temperaturas de EGT anormalmente altas podem indicar detonação não detectada pelo sensor de *knock*.
- **Otimização de desempenho:** Em motores turbo, a EGT é um indicador direto da energia disponível para a turbina.



Tempo de resposta

Sensores EGT do tipo termopar possuem tempo de resposta relativamente lento (da ordem de segundos). Não utilize EGT como proteção primária contra detonação — utilize o sensor de *knock* para isso. O EGT é mais adequado para monitoramento de tendências e proteção contra sobreaquecimento prolongado.

15.3.4 Outros Sensores via CAN

Além dos sensores mencionados, a ECU MotroLink Manager pode receber dados de qualquer sensor ou módulo que transmita via CAN, desde que o protocolo seja conhecido. Exemplos incluem:

- **Sensores de pressão de combustível** (rail pressure) com saída CAN.
- **Acelerômetros e giroscópios** (IMU) para controle de tração e estabilidade.
- **Sensores de posição de suspensão** para controle de altura e rigidez.

- **GPS** para datalog com informações de posição e velocidade.
- **Módulos de expansão de entradas/saídas** para aumentar a capacidade da ECU.

Para integrar sensores CAN genéricos, utilize a funcionalidade de **CAN Genérico** (Custom CAN), configurando manualmente o ID, offset, escala e formato dos dados conforme a documentação do fabricante do sensor.

16 PWM de Uso Geral e Atuadores DC

A ECU MotroLink Manager da MotroLink oferece quatro saídas de PWM de uso geral (*General Purpose PWM*, GPPWM 1–4) e suporte a atuadores de motor DC com ponte H. Essas funcionalidades permitem ao calibrador controlar dispositivos auxiliares de forma flexível, utilizando tabelas 2D configuráveis que mapeiam qualquer combinação de canais de entrada para um duty cycle de saída.

16.1 General Purpose PWM (GPPWM 1–4)

Cada uma das quatro saídas GPPWM é completamente independente e configurável. O princípio de funcionamento é simples: a ECU lê dois canais de entrada (eixo X e eixo Y), consulta uma tabela 2D que relaciona esses valores a um duty cycle de saída (0–100%), e aplica esse duty cycle na saída PWM correspondente com a frequência configurada.

16.1.1 Configuração dos Eixos de Entrada

Cada saída GPPWM possui dois eixos configuráveis — **Eixo X** e **Eixo Y** — que definem as variáveis de entrada da tabela 2D. Qualquer canal disponível na ECU pode ser utilizado como entrada para qualquer um dos eixos. Os canais de entrada disponíveis incluem:

- **RPM** — Rotação do motor.
- **TPS** — Posição da borboleta (%).
- **MAP** — Pressão absoluta do coletor de admissão (kPa).
- **CLT** — Temperatura do líquido de arrefecimento (°C).
- **IAT** — Temperatura do ar de admissão (°C).
- **AFR/Lambda** — Relação ar/combustível ou valor lambda.
- **VBAT** — Tensão da bateria (V).
- **Velocidade do veículo** — Velocidade em km/h.
- **Duty do acelerador eletrônico** — Duty cycle atual do corpo de borboleta eletrônico (%).
- **Pressão de óleo** — Se um sensor de pressão de óleo estiver configurado.
- **Pressão de combustível** — Se um sensor de pressão de combustível estiver configurado.
- **Temperatura de óleo** — Se um sensor de temperatura de óleo estiver configurado.
- **EGT** — Temperatura de gases de escapamento (°C).
- **Entradas analógicas auxiliares** — Qualquer entrada analógica configurada na ECU.
- **Duty de boost** — Duty cycle atual da válvula de controle de boost (%).

- **Saída de Lua** — Valores calculados por scripts Lua (ver Seção 17).
- **Posição do pedal de acelerador** — Posição do APP (%).

Tabela 1D

Se a aplicação requer apenas uma variável de entrada (por exemplo, duty de ventilador em função da temperatura do líquido de arrefecimento), basta configurar o Eixo Y com apenas uma linha. A tabela se comportará efetivamente como uma curva 1D.

16.1.2 Tabela 2D: Eixo X × Eixo Y → Duty Cycle

A tabela 2D de cada GPPWM possui até **8 colunas** (Eixo X) e **8 linhas** (Eixo Y). Cada célula da tabela contém o duty cycle de saída em porcentagem (0,0% a 100,0%), que será aplicado quando as condições de entrada corresponderem àquela posição na tabela.

A ECU realiza interpolação bilinear entre as células da tabela para garantir transições suaves entre os pontos de calibração. Isso significa que, se as condições de entrada caírem entre dois pontos da tabela, o duty cycle será calculado proporcionalmente.

Os valores dos eixos podem ser configurados em intervalos irregulares, permitindo maior resolução nas faixas de operação mais críticas. Por exemplo, para controle de ventilador, é possível concentrar mais pontos na faixa de 85–100 °C (onde a decisão de ligar/desligar é mais sensível) e menos pontos nas faixas extremas.

16.1.3 Frequência do PWM

A frequência do sinal PWM pode ser configurada individualmente para cada saída GPPWM. A faixa de frequência disponível vai de **1 Hz** a **10.000 Hz** (10 kHz). A escolha da frequência depende do atuador controlado:

- **1–10 Hz:** Adequado para válvulas solenoides on/off de baixa velocidade (ex.: purga do canister EVAP).
- **10–50 Hz:** Comum para válvulas solenoides proporcionais automotivas (ex.: válvula wastegate, válvula de controle de marcha lenta).
- **50–200 Hz:** Adequado para ventiladores elétricos com controle de velocidade PWM.
- **200–1.000 Hz:** Utilizado para resistências de aquecimento, válvulas de alta resposta e embreagens eletromagnéticas.
- **1.000–10.000 Hz:** Necessário para drivers de corrente com indutância baixa ou aplicações que exigem resposta ultrarrápida.

Frequência e atuador

Utilizar uma frequência inadequada pode danificar o atuador ou resultar em controle ineficaz. Válvulas solenoides possuem uma frequência ideal de operação determinada pela sua indutância e massa mecânica. Consulte o datasheet do atuador para determinar a faixa de frequência recomendada.

16.1.4 Configuração da Saída Física

Para cada GPPWM, é necessário atribuir um pino de saída físico da ECU. Os pinos disponíveis para saídas PWM estão identificados no diagrama de pinagem do hardware. A atribuição é feita no software MotroLink Manager na seção de configuração de saídas.

! Capacidade de corrente

As saídas auxiliares da ECU possuem capacidade de corrente limitada (tipicamente 1–3 A dependendo do pino). Para atuadores que exigem corrente superior, utilize um relé de estado sólido ou um módulo driver externo comandado pela saída PWM da ECU. Exceder a capacidade de corrente do pino pode danificar permanentemente a ECU.

16.1.5 Condições de Habilitação

Cada saída GPPWM pode ser condicionada a critérios de habilitação para garantir que o atuador só seja ativado nas condições apropriadas:

- **RPM mínimo:** A saída só é ativada acima de uma rotação mínima (útil para evitar ativação com o motor desligado).
- **Temperatura mínima de CLT:** A saída só é ativada quando a temperatura do líquido de arrefecimento supera um valor definido (útil para ventiladores).
- **Duty mínimo e máximo:** Limita a faixa de duty cycle aplicável, protegendo o atuador contra condições extremas.
- **Habilitação por canal digital:** A saída pode ser condicionada ao estado de uma entrada digital (ex.: chave seletora ativada).

16.1.6 Aplicações Típicas

As saídas GPPWM são extremamente versáteis. Algumas das aplicações mais comuns incluem:

- **Controle de ventilador elétrico:** Utiliza CLT como eixo principal. A velocidade do ventilador aumenta progressivamente com a temperatura, evitando acionamentos bruscos e reduzindo consumo elétrico.
- **Válvula de purga do canister (EVAP):** Controlada em função de RPM e carga do motor. O duty cycle determina a taxa de purga dos vapores de combustível armazenados no canister.
- **Aquecedor de coletor de admissão:** Ativado em baixas temperaturas de IAT para melhorar a vaporização do combustível durante a partida a frio.
- **Bomba de água elétrica:** Controlada em função da temperatura do motor e da carga, permitindo fluxo de refrigeração variável.
- **Intercooler spray (water spray):** Ativado quando a IAT excede um limite e a carga do motor é elevada, borrifando água no intercooler para reduzir a temperatura do ar de admissão.

- **Válvula de controle de óleo (VVT auxiliar):** Quando o controle VVT dedicado não é utilizado, uma saída GPPWM pode controlar válvulas OCV simples.
- **Indicadores luminosos (LEDs/lâmpadas):** Acionamento de luzes de advertência, shift lights ou indicadores de status com base em qualquer parâmetro do motor.
- **Válvula de controle de fluxo de ar (bypass):** Em sistemas com bypass de admissão, o duty cycle controla a abertura da válvula em função da carga e RPM.

Múltiplas variáveis

Para controle que depende de mais de duas variáveis simultâneas, é possível combinar a saída GPPWM com scripts Lua (Seção 17). O script pode calcular um valor composto a partir de múltiplas entradas e fornecer esse valor como canal de entrada para o eixo da tabela GPPWM.

16.2 Atuadores DC Motor (Ponte H)

Além das saídas PWM unidirecionais, a ECU MotroLink Manager suporta o controle de **atuadores de motor DC** através de configuração de ponte H (*H-Bridge*). Essa funcionalidade é essencial para controlar dispositivos que requerem movimento bidirecional, como válvulas motorizadas, borboletas de marcha lenta motorizadas (IACV tipo motor DC) e outros atuadores posicionais.

16.2.1 Princípio da Ponte H

Uma ponte H é um circuito que permite aplicar tensão em ambas as polaridades a um motor DC, controlando assim a direção de rotação. A ECU utiliza dois pinos de saída para cada atuador DC, denominados **Pino A** (ou pino de abertura) e **Pino B** (ou pino de fechamento):

- **Pino A ativo, Pino B inativo:** O motor gira em uma direção (ex.: abertura da válvula).
- **Pino A inativo, Pino B ativo:** O motor gira na direção oposta (ex.: fechamento da válvula).
- **Ambos inativos:** Motor parado (ponto morto, sem torque de retenção).
- **Ambos ativos:** Frenagem regenerativa (motor travado por curto-circuito dinâmico). Utilizado para parada rápida e retenção de posição.

16.2.2 Configuração dos Pinos de Ponte H

Para configurar um atuador DC, acesse a seção de configuração de atuadores DC no software MotroLink Manager e defina:

1. **Pino de saída A:** Selecione o pino físico da ECU que será utilizado para o comando de abertura/direção positiva.
2. **Pino de saída B:** Selecione o pino físico para o comando de fechamento/direção negativa.

3. **Frequência PWM:** A frequência do sinal PWM aplicado aos pinos da ponte H. Tipicamente entre 100 Hz e 1.000 Hz para atuadores motorizados automotivos.
4. **Duty cycle máximo:** Limita o duty máximo aplicável ao motor, protegendo-o contra sobrecorrente.

Polaridade dos pinos

Inverter os pinos A e B não danificará o hardware, mas fará com que o atuador se mova na direção oposta à esperada. Em um controle de malha fechada, isso pode causar uma condição de *runaway* onde o controlador PID tenta corrigir o erro movendo o atuador cada vez mais na direção errada. Verifique sempre a direção de movimento antes de habilitar o controle em malha fechada.

16.2.3 Função: Posição Alvo e Controle PID

O controle de atuadores DC na ECU MotroLink Manager opera em **malha fechada** utilizando um controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*). O sistema funciona da seguinte forma:

1. Uma **posição alvo** é definida pela calibração (tabela ou valor fixo), representando a posição desejada do atuador em porcentagem (0–100%).
2. Um **sensor de posição** (potenciômetro ou similar) conectado a uma entrada analógica da ECU fornece a posição atual do atuador.
3. O controlador PID calcula o **erro** (diferença entre posição alvo e posição atual) e determina o duty cycle e a direção de acionamento necessários para minimizar esse erro.

Os parâmetros do controlador PID são:

- **Ganho Proporcional (Kp):** Determina a resposta proporcional ao erro atual. Valores mais altos resultam em resposta mais rápida, mas podem causar oscilação. Valor inicial recomendado: 1,0 a 5,0.
- **Ganho Integral (Ki):** Elimina o erro estacionário acumulando o erro ao longo do tempo. Valores muito altos causam *overshoot* e oscilação lenta. Valor inicial recomendado: 0,1 a 1,0.
- **Ganho Derivativo (Kd):** Amortece a resposta baseando-se na taxa de variação do erro. Reduz *overshoot* e oscilação, mas é sensível a ruído. Valor inicial recomendado: 0,01 a 0,1.
- **Offset (Feed-Forward):** Um duty cycle base que é aplicado antes da correção PID, representando o duty aproximado necessário para manter a posição estática. Acelera a resposta inicial.
- **Período de controle:** O intervalo de tempo entre cada iteração do controlador PID (em milissegundos). Valores típicos: 10–50 ms.
- **Banda morta (deadband):** Faixa de erro dentro da qual o controlador considera que a posição foi atingida e não aplica correção. Evita oscilação em torno da posição alvo. Valores típicos: 0,5–2,0%.

Ajuste do PID

O ajuste do PID deve ser feito de forma empírica, seguindo esta sequência: (1) Defina K_i e K_d como zero. (2) Aumente K_p até que o atuador responda rapidamente mas sem oscilação excessiva. (3) Aumente K_i gradualmente até que o erro estacionário seja eliminado. (4) Se houver *overshoot*, adicione uma pequena quantidade de K_d . (5) Ajuste a banda morta para evitar oscilação residual em torno da posição alvo.

16.2.4 Configuração do Sensor de Posição

O sensor de posição (feedback) do atuador DC deve ser conectado a uma entrada analógica da ECU e configurado da seguinte forma:

1. **Canal analógico:** Selecione a entrada analógica à qual o potenciômetro do atuador está conectado.
2. **Tensão mínima:** Tensão correspondente à posição 0% (totalmente fechado). Tipicamente 0,5 V.
3. **Tensão máxima:** Tensão correspondente à posição 100% (totalmente aberto). Tipicamente 4,5 V.
4. **Direção:** Se a tensão aumenta com a abertura (normal) ou diminui (invertido).

Calibração do sensor

A calibração do sensor de posição é crítica para o funcionamento correto do controle PID. Se as tensões mínima e máxima não corresponderem aos limites reais do atuador, o controlador operará com referências incorretas, resultando em posicionamento impreciso ou impossibilidade de atingir as posições extremas.

16.2.5 Aplicações Típicas de Atuadores DC

- **Válvula de marcha lenta motorizada (IACV DC):** Controle preciso do fluxo de ar de bypass para regulação da marcha lenta em motores com borboleta mecânica. A posição alvo é calculada pelo sistema de controle de marcha lenta da ECU.
- **Válvulas de admissão variável (flaps/swirl):** Controle de válvulas que alteram a geometria do coletor de admissão para otimizar enchimento e turbulência em diferentes faixas de RPM.
- **Válvulas de recirculação de gases (EGR):** Controle proporcional da taxa de recirculação de gases de escape para redução de emissões de NOx.
- **Atuadores de geometria variável de turbina (VGT):** Em turbinas de geometria variável, o atuador posiciona as palhetas guia para controlar a relação A/R efetiva da turbina.
- **Válvulas de controle de fluxo de óleo:** Atuadores posicionais para controle do fluxo de óleo em sistemas de lubrificação variável.

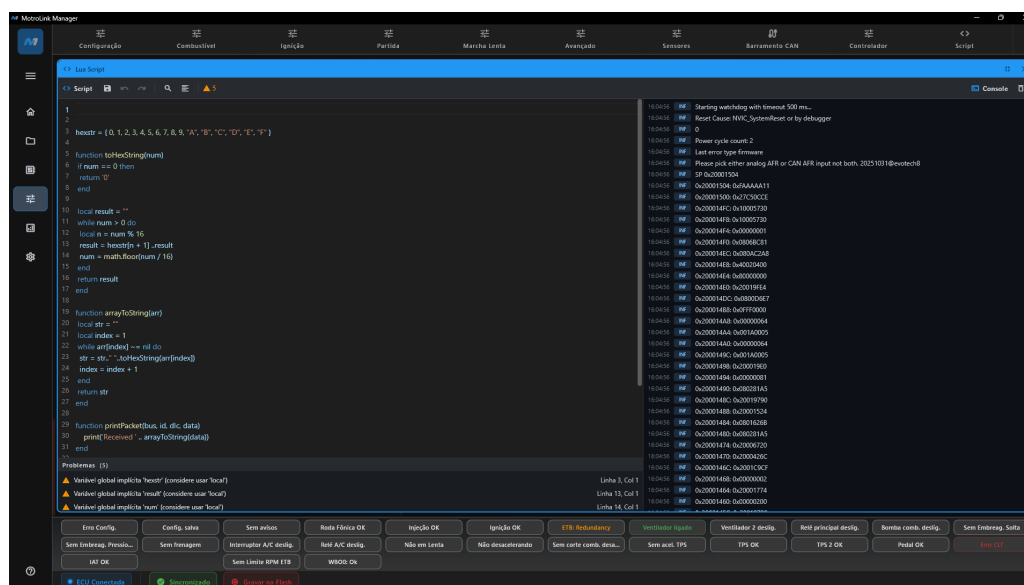
! Proteção mecânica

Certifique-se de que o atuador DC possui batentes mecânicos que limitam seu curso. Sem um sensor de posição funcional ou com o PID mal calibrado, o motor DC pode tentar girar continuamente em uma direção, causando sobreaquecimento e danos ao atuador ou ao mecanismo acionado. Configure sempre os limites de duty cycle máximo e o tempo máximo de acionamento contínuo.

17 Scripting Lua

A ECU MotroLink Manager da MotroLink integra um interpretador Lua completo, permitindo ao calibrador estender as funcionalidades da ECU por meio de scripts personalizados. Com Lua, é possível implementar lógicas de controle customizadas, estratégias de proteção, interfaces com dispositivos não suportados nativamente e qualquer outra funcionalidade que exija processamento lógico ou matemático além do que as tabelas e curvas padrão oferecem.

17.1 Visão Geral



Editor de scripts Lua integrado ao software MotroLink Manager .

O editor de scripts Lua, mostrado na figura acima, é acessado diretamente pelo software MotroLink Manager e oferece um ambiente completo para escrita, edição e depuração de scripts. O script é enviado à ECU e executado ciclicamente pelo processador embarcado, com acesso em tempo real a todos os canais de entrada e saída da ECU.

17.1.1 O que é Possível com Lua na ECU

O interpretador Lua da ECU MotroLink Manager oferece acesso a uma ampla gama de funcionalidades:

- **Leitura de qualquer sensor ou canal:** Acesso em tempo real a todos os valores de sensores (TPS, MAP, CLT, IAT, RPM, lambda, EGT, pressão de óleo, entradas analógicas auxiliares, etc.).
- **Controle de saídas:** Capacidade de comandar saídas digitais e PWM diretamente a partir do script.
- **Lógica condicional complexa:** Implementação de máquinas de estado, temporizadores, contadores e lógica de decisão que seria impossível com tabelas estáticas.
- **Cálculos matemáticos:** Operações aritméticas, trigonométricas, logarítmicas e de interpolação.

- **Comunicação CAN:** Envio e recepção de frames CAN personalizados, permitindo integrar dispositivos com protocolos proprietários.
- **Modificação de parâmetros internos:** Alteração em tempo real de parâmetros internos da ECU, como alvos de marcha lenta, limites de boost, correções de combustível e avanço de ignição.
- **Criação de canais virtuais:** Definição de novos canais de dados que aparecem no datalog e nas telas de monitoramento.

Ciclo de execução

O script Lua é executado ciclicamente com um período configurável, tipicamente a cada 10–100 ms. O tempo de execução de cada ciclo é monitorado pela ECU. Se o script consumir tempo excessivo, a ECU automaticamente reduzirá a prioridade do Lua para garantir que as funções críticas do motor (injeção, ignição, controle de boost) não sejam afetadas.

17.1.2 Entradas Analógicas via Lua

O script Lua pode ler qualquer entrada analógica da ECU utilizando funções dedicadas da API. Isso inclui:

- **Entradas analógicas nomeadas:** Leitura de sensores configurados (TPS, MAP, CLT, IAT, etc.) já com as conversões e calibrações aplicadas, retornando o valor em unidade de engenharia.
- **Entradas analógicas brutas:** Leitura do valor ADC bruto (0–4095 para ADC de 12 bits) de qualquer pino analógico, útil para sensores não configurados no sistema principal.
- **Entradas analógicas em tensão:** Leitura da tensão (0–5 V) de qualquer pino analógico, sem conversão para unidade de engenharia.

Exemplo de funções de leitura analógica:

- `getSensor("CLT")` — Retorna a temperatura do líquido de arrefecimento em °C.
- `getSensor("RPM")` — Retorna a rotação atual do motor.
- `getSensor("MAP")` — Retorna a pressão do coletor em kPa.
- `getAnalog(index)` — Retorna a tensão bruta de uma entrada analógica pelo seu índice.

17.1.3 Entradas Digitais via Lua

Além das entradas analógicas, o Lua pode ler o estado de entradas digitais:

- **Estado lógico:** Leitura do estado alto/baixo de qualquer entrada digital configurada.

- **Contadores de pulso:** Leitura de contadores de frequência ou contadores de pulso acumulados em entradas digitais.
- **Frequência:** Leitura da frequência de um sinal em uma entrada digital configurada como entrada de frequência.

17.1.4 Saídas PWM via Lua

O script Lua pode controlar diretamente saídas PWM da ECU, permitindo implementar estratégias de controle personalizadas:

- **Definir duty cycle:** O script pode definir o duty cycle (0–100%) de qualquer saída PWM auxiliar.
- **Definir frequência:** A frequência do PWM pode ser alterada dinamicamente pelo script.
- **Saídas on/off:** Para controle simples de relés e solenoides, o script pode definir o duty como 0% (desligado) ou 100% (ligado).

Conflito de controle

Se uma saída PWM estiver sendo controlada simultaneamente pelo sistema GPPWM (Seção 16) e por um script Lua, o comportamento será indefinido. Certifique-se de que cada saída é controlada por apenas um sistema — GPPWM ou Lua — nunca ambos ao mesmo tempo.

17.1.5 Botões Lua (Lua Buttons)

A ECU MotroLink Manager suporta até 8 **botões Lua** (*Lua Buttons*), que são botões virtuais exibidos na interface do software MotroLink Manager. Esses botões permitem ao operador interagir com o script Lua em tempo real:

- Cada botão possui um **nome configurável** que descreve sua função.
- O estado do botão (pressionado/não pressionado) pode ser lido pelo script Lua a qualquer momento.
- Os botões podem ser utilizados para ativar/desativar funcionalidades, selecionar modos de operação, disparar ações manuais ou alterar comportamentos do script.

Exemplos de uso de botões Lua:

- **Botão “Modo Flex”:** Alterna manualmente entre mapas de gasolina e etanol quando o sensor flex fuel não está instalado.
- **Botão “Anti-Lag”:** Ativa um modo de anti-lag temporário para uso em largadas ou saídas de curva.
- **Botão “Purge”:** Força a ativação da válvula de purga do canister para teste manual.

- **Botão “Reset Adaptativo”:** Zera os valores adaptativos de combustível ou marcha lenta.
- **Botão “Modo Economia”:** Ativa um mapa de combustível/ignição mais conservador para economia de combustível.

Segurança dos scripts

Scripts Lua têm acesso amplo às funções da ECU. Um script mal escrito pode causar condições perigosas, como comandar avanço de ignição excessivo, desativar proteções ou travar saídas em estados indesejados. Teste sempre os scripts em bancada antes de utilizá-los em um motor real. Utilize as funções de proteção e limites disponíveis na API Lua para prevenir condições anormais.

17.1.6 Depuração e Monitoramento

O editor Lua do software MotroLink Manager oferece as seguintes funcionalidades de depuração:

- **Console de saída:** O script pode utilizar a função `print()` para enviar mensagens ao console, visíveis em tempo real no software.
- **Canais de depuração:** O script pode exportar valores numéricos como canais personalizados que aparecem no datalog e nas telas de monitoramento.
- **Indicador de status:** O software exibe se o script está em execução, pausado ou se ocorreu um erro de execução.
- **Mensagens de erro:** Erros de sintaxe e erros de execução (*runtime errors*) são reportados com número de linha e descrição do problema.
- **Tempo de execução:** O tempo consumido por cada ciclo do script é monitorado e exibido, auxiliando na otimização de scripts complexos.

17.2 Tabelas e Curvas de Script

Para permitir que os scripts Lua utilizem dados calibráveis sem necessidade de alterar o código-fonte do script, a ECU MotroLink Manager oferece um conjunto de **tabelas**, **curvas** e **variáveis escalares** dedicadas ao uso por scripts. Esses elementos são editados na interface gráfica do software MotroLink Manager e podem ser lidos pelo script Lua em tempo real.

17.2.1 Script Tables 1–4 (Tabelas 2D Configuráveis)

A ECU disponibiliza **4 tabelas 2D** exclusivas para uso em scripts Lua, denominadas **Script Table 1** a **Script Table 4**. Cada tabela possui as seguintes características:

- **Dimensão:** Até 8 colunas × 8 linhas.
- **Eixo X:** Valores numéricos configuráveis livremente (podem representar RPM, pressão, temperatura, ou qualquer grandeza).

- **Eixo Y:** Valores numéricos configuráveis livremente.
- **Conteúdo das células:** Valores numéricos de ponto flutuante (podem representar porcentagens, fatores multiplicativos, valores absolutos, etc.).
- **Interpolação:** O script pode solicitar interpolação bilinear automática entre os pontos da tabela.
- **Nomes personalizáveis:** Cada tabela pode receber um nome descritivo (ex.: “Tabela Boost por Marcha”, “Fator de Correção NOS”) e os eixos podem ser rotulados com unidades de engenharia.

Para acessar uma Script Table a partir do Lua, utiliza-se a função:

- `table3d(tableIndex, xValue, yValue)` — Retorna o valor interpolado da tabela `tableIndex` (1–4) para os valores de entrada `xValue` e `yValue`.

Exemplos de uso de Script Tables:

- **Tabela de correção de boost por marcha:** Eixo X = RPM, Eixo Y = marcha engrenada, conteúdo = duty cycle alvo da válvula de boost. O script lê a marcha atual (via CAN ou cálculo de relação) e aplica a correção.
- **Tabela de limitação de torque por temperatura:** Eixo X = RPM, Eixo Y = temperatura do intercooler, conteúdo = fator de redução de torque (0,0–1,0).
- **Tabela de temporização de NOS:** Eixo X = RPM, Eixo Y = TPS, conteúdo = tempo de ativação do solenoide de óxido nitroso em milissegundos.
- **Tabela de controle de suspensão:** Eixo X = velocidade, Eixo Y = aceleração lateral, conteúdo = rigidez alvo do amortecedor.

Tabelas vs. código

Sempre que possível, extraia constantes de calibração do código Lua e coloque-as em Script Tables ou Script Curves. Isso permite que o calibrador ajuste os valores sem precisar editar e reenviar o script. O script deve conter apenas a lógica; os dados devem estar nas tabelas.

17.2.2 Script Curves 1–6 (Curvas 1D Configuráveis)

Para relações unidimensionais mais simples, a ECU oferece **6 curvas 1D** exclusivas para scripts Lua, denominadas **Script Curve 1** a **Script Curve 6**. Cada curva possui:

- **Dimensão:** Até 16 pontos (pares de valores X–Y).
- **Eixo X:** Valores numéricos configuráveis livremente, representando a variável de entrada.
- **Eixo Y:** Valores numéricos correspondentes, representando a saída da curva.
- **Interpolação linear:** A ECU realiza interpolação linear entre os pontos para valores intermediários de X.

- **Extrapolação:** Para valores de X abaixo do primeiro ponto ou acima do último, o valor de saída é mantido constante (*clamping*).
- **Nomes personalizáveis:** Assim como as tabelas, cada curva pode receber um nome e rótulos de eixo descritivos.

Para acessar uma Script Curve a partir do Lua:

- `curve(curveIndex, xValue)` — Retorna o valor interpolado da curva `curveIndex` (1–6) para o valor de entrada `xValue`.

Exemplos de uso de Script Curves:

- **Curva de limite de boost por temperatura ambiente:** X = temperatura do ar externo (°C), Y = pressão máxima de boost (kPa). Em dias quentes, o limite de boost é automaticamente reduzido.
- **Curva de fator de correção por altitude:** X = pressão barométrica (kPa), Y = fator de correção (0,0–1,0). Compensa a perda de potência em altitudes elevadas.
- **Curva de temporização de nitro por RPM:** X = RPM, Y = duty cycle do solenoide de nitro (%). Permite dosagem progressiva de óxido nítrico conforme a rotação.
- **Curva de velocidade do ventilador por CLT:** X = temperatura do líquido de arrefecimento (°C), Y = duty cycle do ventilador (%). Alternativa simples ao GPPWM quando apenas uma variável é necessária.
- **Curva de mapeamento de sensor não linear:** X = tensão do sensor (V), Y = valor em unidade de engenharia. Permite linearizar sensores com resposta não linear que não são suportados nativamente.
- **Curva de relação de marcha:** X = relação RPM/velocidade, Y = número da marcha. Permite ao script identificar a marcha engrenada com base na relação cinemática.

17.2.3 Script Settings (Variáveis Escalares)

Para parâmetros que não precisam de tabela ou curva, a ECU oferece **Script Settings** — variáveis escalares configuráveis pelo usuário na interface do software MotroLink Manager. Cada *setting* possui:

- **Nome:** Rótulo descritivo exibido na interface (ex.: “Temperatura de Ativação NOS”, “RPM Limite Anti-Lag”).
- **Valor:** Um número de ponto flutuante que pode ser editado pelo calibrador sem alterar o script.
- **Limites:** Valores mínimo e máximo configuráveis para prevenir entradas fora da faixa válida.
- **Unidade:** Rótulo de unidade exibido ao lado do valor (ex.: “°C”, “kPa”, “rpm”, “%”).

Para acessar um Script Setting a partir do Lua:

- `getCalibration(settingIndex)` — Retorna o valor atual do *setting* de índice `settingIndex`.

Quantidade de Settings

O número de Script Settings disponíveis depende da versão do firmware. Consulte as notas de versão para verificar a quantidade exata. Tipicamente, são oferecidos entre 8 e 16 *settings* escalares.

Exemplos de uso de Script Settings:

- **Temperatura de ativação:** Limiar de temperatura acima do qual uma funcionalidade é ativada (ex.: ativar spray de intercooler quando $IAT > 50^{\circ}\text{C}$).
- **RPM de corte:** Rotação limite configurável para funções como anti-lag, nitro ou *launch control* via script.
- **Ganho PID:** Parâmetros de controladores PID implementados em Lua, permitindo ajuste fino sem reescrever o script.
- **Tempo de ativação:** Duração em milissegundos para ações temporizadas (ex.: tempo de purga, tempo de ativação de relé).
- **Fator de escala:** Multiplicador genérico para ajustar a intensidade de uma correção ou o ganho de um sensor.

Fluxo de trabalho recomendado

Para desenvolver scripts Lua robustos e calibráveis, siga esta metodologia: (1) Defina a lógica de controle no script Lua. (2) Extraia todos os parâmetros ajustáveis para Script Tables, Script Curves e Script Settings. (3) Documente a função de cada tabela/curva/setting no nome e no rótulo. (4) Teste em bancada com o motor desligado, observando as saídas no console e no datalog. (5) Somente após validação completa, teste com o motor em funcionamento, monitorando todos os canais relevantes.

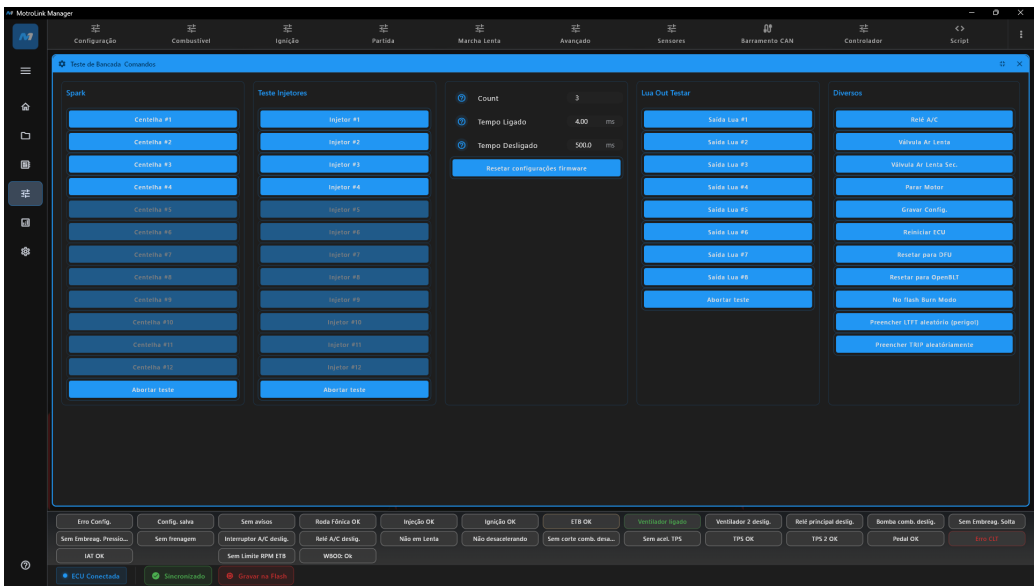
Parte VI

Diagnóstico e Referência

18 Bench Test e Diagnóstico

A ECU MotroLink Manager da MotroLink oferece um conjunto abrangente de ferramentas de teste de bancada (*bench test*) e monitoramento em tempo real que permitem ao calibrador verificar o funcionamento de todos os atuadores, diagnosticar problemas de fiação e monitorar o estado interno de cada subsistema do motor. Essas ferramentas são essenciais tanto durante a instalação inicial quanto durante a manutenção e diagnóstico de falhas.

18.1 Teste de Bancada



Tela de teste de bancada (*Bench Test*) do software MotroLink Manager .

A tela de teste de bancada, ilustrada na figura acima, permite acionar individualmente cada atuador controlado pela ECU sem que o motor esteja em funcionamento. Isso possibilita verificar a fiação, o funcionamento mecânico dos componentes e a atribuição correta dos pinos de saída antes de dar partida no motor.

**Motor desligado**

Os testes de bancada devem ser realizados **exclusivamente com o motor desligado**. Acionar injetores ou bobinas manualmente com o motor em funcionamento pode causar danos graves ao motor, incluindo embielamento por acúmulo de combustível líquido nos cilindros (*hydro-lock*). O software exibirá um aviso e bloqueará o teste se detectar que o motor está girando.

18.1.1 Teste Individual de Injetores

O teste de injetores permite acionar cada injetor individualmente para verificar:

- **Funcionamento elétrico:** Ao acionar o injetor, deve-se ouvir um clique audível correspondente à abertura e fechamento da válvula. A ausência de clique indica injetor travado, fiação interrompida ou pino de saída incorreto.

- **Atribuição de cilindro:** Acionando cada injetor individualmente, é possível verificar se a numeração dos cilindros no software corresponde à posição física no motor. Coloque a mão próxima a cada injetor ou utilize um estetoscópio automotivo para identificar qual injetor está sendo acionado.
- **Padrão de spray:** Em motores com injeção indireta (PFI), é possível remover os injetores do coletor (mantendo-os conectados eletricamente e à linha de combustível) e acionar repetidamente para observar o padrão de spray. Um spray em cone uniforme indica um injetor saudável; gotejamento ou spray irregular indica necessidade de limpeza ou substituição.
- **Vazão relativa:** Acionando cada injetor com o mesmo tempo de pulso e contando o número de acionamentos necessários para consumir um volume fixo de combustível, é possível verificar a uniformidade de vazão entre os injetores.

Os parâmetros configuráveis do teste de injetores são:

- **Duração do pulso (ms):** O tempo de abertura do injetor em cada acionamento. Valores típicos para teste: 2–10 ms.
- **Número de pulsos:** Quantidade de acionamentos consecutivos (1 a 100 pulsos).
- **Intervalo entre pulsos (ms):** Tempo entre acionamentos consecutivos.
- **Seleção do injetor:** Permite selecionar um injetor específico (cilindro 1, 2, 3, etc.) ou acionar todos simultaneamente.

Pressão de combustível

Para que o teste de injetores seja significativo, a linha de combustível deve estar pressurizada. Ligue a bomba de combustível (utilizando o teste de bomba de combustível descrito adiante) antes de testar os injetores. Sem pressão de combustível, os injetores abrirão mecanicamente mas não pulverizarão combustível.

18.1.2 Teste de Bobinas de Ignição

O teste de bobinas permite acionar cada bobina de ignição individualmente para verificar:

- **Funcionamento elétrico:** Ao acionar a bobina, deve-se ouvir um estalo correspondente à centelha. A ausência de centelha indica bobina defeituosa, fiação interrompida, pino de saída incorreto ou vela de ignição com defeito.
- **Atribuição de cilindro:** Assim como nos injetores, o teste permite verificar se cada bobina está conectada ao cilindro correto. Remova as velas de ignição e coloque-as aterradas ao bloco do motor para visualizar a centelha.
- **Qualidade da centelha:** Uma centelha forte e azulada indica sistema de ignição saudável. Uma centelha fraca, alaranjada ou intermitente indica problemas na bobina, no cabo de vela ou na vela de ignição.

Os parâmetros configuráveis do teste de bobinas são:

- **Tempo de carga (*dwell*) (ms):** O tempo de carregamento da bobina antes da descarga. Valores típicos: 2–5 ms dependendo do tipo de bobina.
- **Número de centelhas:** Quantidade de acionamentos consecutivos.
- **Intervalo entre centelhas (ms):** Tempo entre acionamentos.
- **Seleção da bobina:** Seleção individual por cilindro.

Risco de choque elétrico

O sistema de ignição produz tensões de **20.000 a 40.000 V** nos terminais das velas de ignição. Nunca toque nos cabos de vela, terminais de bobina ou velas de ignição durante o teste de bobinas. Mantenha distância segura e utilize ferramentas com isolamento adequado. Choque por sistema de ignição pode causar lesões graves ou fatais.

Dwell excessivo

Configurar um tempo de *dwell* muito longo (acima do especificado pela bobina) pode causar sobreaquecimento e destruição da bobina. Consulte a especificação do fabricante da bobina para o *dwell* máximo permitido. Para bobinas do tipo COP (*Coil-On-Plug*) modernas, o *dwell* típico é de 2,5–4,0 ms.

18.1.3 Teste de Relés

O teste de relés permite acionar individualmente cada saída de relé da ECU para verificar:

- **Funcionamento do relé:** Ao acionar, deve-se ouvir o clique do relé e verificar se o circuito controlado é energizado.
- **Atribuição de saída:** Confirma se cada relé está conectado ao circuito correto (ex.: relé de bomba de combustível, relé do ventilador, relé de ar condicionado).
- **Carga elétrica:** Verificar se o dispositivo controlado pelo relé funciona corretamente quando energizado.

O teste permite selecionar cada saída de relé individualmente e mantê-la ativa por um tempo determinado ou até que o operador desative manualmente.

18.1.4 Teste de Ventilador

O teste de ventilador permite acionar as saídas de controle do eletroventilador do sistema de arrefecimento. Se o ventilador for controlado por relé, o teste ativa o relé. Se for controlado por PWM (velocidade variável), o teste permite definir o duty cycle aplicado.

Os parâmetros configuráveis incluem:

- **Saída do ventilador:** Seleção da saída (Ventilador 1, Ventilador 2 se aplicável).
- **Duty cycle (%):** Para ventiladores PWM, permite testar diferentes velocidades (ex.: 30%, 50%, 80%, 100%).
- **Duração:** Tempo de ativação automática ou modo contínuo (desligamento manual).

Ventilador de dois estágios

Se o veículo utilizar ventilador de dois estágios (baixa e alta velocidade via relés), teste ambos os estágios individualmente para confirmar a fiação e o funcionamento mecânico de cada velocidade.

18.1.5 Teste da Bomba de Combustível

O teste da bomba de combustível permite energizar a bomba elétrica de combustível sem que o motor esteja em funcionamento. Isso é essencial para:

- **Pressurizar a linha de combustível:** Antes de testar injetores ou dar a partida, a linha deve estar pressurizada.
- **Verificar funcionamento da bomba:** Confirmar que a bomba liga e atinge a pressão de trabalho especificada.
- **Detectar vazamentos:** Com a bomba ligada e o motor desligado, a pressão deve se manter estável. Uma queda rápida de pressão indica vazamento na linha, nos injetores (gotejamento) ou no regulador de pressão.
- **Verificar fiação:** Confirmar que a saída da ECU controla corretamente o relé da bomba de combustível.

Os parâmetros configuráveis incluem:

- **Duração (s):** Tempo de ativação da bomba. Por segurança, o teste desliga automaticamente a bomba após o tempo configurado.
- **Duty cycle (%):** Para bombas com controle PWM de velocidade, permite testar diferentes níveis de fluxo.

Combustível no coletor

Ao testar a bomba de combustível com injetores que apresentam gotejamento (*leaking injectors*), combustível líquido pode se acumular nos cilindros. Antes de dar a partida após o teste, remova as velas de ignição e acione o motor de partida brevemente para expelir qualquer líquido acumulado. Tentar dar partida com cilindros cheios de combustível líquido causa *hydro-lock* e pode destruir bielas e pistões.

18.2 Monitoramento em Tempo Real

Além dos testes de bancada, o software MotroLink Manager oferece telas de monitoramento em tempo real que exibem o estado interno de cada subsistema da ECU. Essas telas são fundamentais para diagnóstico de problemas, validação de calibração e compreensão do comportamento do motor durante a operação.

Cada tela de estado exibe todas as variáveis internas relevantes do subsistema, incluindo entradas, saídas, estados intermediários, contadores de erro e flags de diagnóstico. A seguir, são descritas todas as telas de estado disponíveis.

18.2.1 Fuel Computer (Computador de Combustível)

A tela **fuel_computer** exibe o estado completo do sistema de cálculo de combustível:

- **Tempo de injeção base (ms):** O tempo de injeção calculado a partir da tabela VE e da equação de combustível, antes de quaisquer correções.
- **Tempo de injeção final (ms):** O tempo de injeção efetivo após todas as correções (temperatura, lambda, aceleração, etc.).
- **Correção por CLT (%):** Fator de correção de combustível por temperatura do líquido de arrefecimento.
- **Correção por IAT (%):** Fator de correção por temperatura do ar de admissão.
- **Correção por lambda (%):** Correção de malha fechada baseada no feedback da sonda lambda.
- **Enriquecimento de aceleração (ms):** Combustível adicional injetado durante transientes de aceleração.
- **Correção de corte (%):** Indicador de corte de combustível (corte por RPM, desaceleração, etc.).
- **VE calculada (%):** Valor interpolado da tabela de eficiência volumétrica.
- **AFR alvo:** Relação ar/combustível alvo atual.
- **Duty cycle do injetor (%):** Porcentagem do tempo do ciclo do motor utilizada pela injeção. Valores acima de 85% indicam que os injetores estão próximos do seu limite.
- **Consumo de combustível:** Estimativa do consumo instantâneo em litros por hora (L/h) e litros por 100 km (L/100km).
- **Compensação de deadtime (ms):** Tempo morto do injetor adicionado ao pulso para compensar o atraso de abertura.

18.2.2 Ignition State (Estado da Ignição)

A tela **ignition_state** exibe o estado do sistema de ignição:

- **Avanço base (°):** Avanço de ignição obtido da tabela principal, antes de correções.
- **Avanço final (°):** Avanço efetivo aplicado após todas as correções.
- **Correção por CLT (°):** Ajuste de avanço por temperatura do líquido de arrefecimento.
- **Correção por IAT (°):** Ajuste de avanço por temperatura do ar de admissão.
- **Retardo por knock (°):** Quantidade de retardo de ignição aplicado pelo controlador de detonação.
- **Dwell time (ms):** Tempo de carregamento da bobina atual.

- **Modo de ignição:** Indica o modo ativo (sequencial, desperdiçada, etc.).
- **Correção por Flex Fuel (°):** Ajuste de avanço baseado no teor de etanol.
- **Trim por cilindro (°):** Correção individual de avanço por cilindro, se configurada.

18.2.3 Knock Controller (Controlador de Detonação)

A tela **knock_controller** exibe o estado do sistema de detecção e controle de detonação:

- **Nível de knock por cilindro:** Amplitude do sinal do sensor de knock para cada cilindro, permitindo identificar qual cilindro está detonando.
- **Threshold de detecção:** Nível de referência acima do qual o sinal é considerado detonação.
- **Retardo acumulado por cilindro (°):** Quantidade de retardo de ignição atualmente aplicada a cada cilindro como resposta à detonação.
- **Contador de eventos:** Número de eventos de detonação detectados por cilindro desde a última reinicialização.
- **Taxa de recuperação:** Velocidade com que o retardo de knock é removido após cessar a detonação.
- **Frequência do filtro (kHz):** Frequência central do filtro passa-banda utilizado para detecção de knock.
- **Janela de detecção (°):** Faixa angular do ciclo do motor na qual a detecção de knock está ativa para cada cilindro.

18.2.4 Boost Control (Controle de Boost)

A tela **boost_control** exibe o estado do sistema de controle de pressão de boost:

- **Pressão alvo (kPa):** Pressão de boost desejada, interpolada da tabela de alvo.
- **Pressão atual (kPa):** Pressão de boost medida pelo sensor MAP.
- **Erro (kPa):** Diferença entre pressão alvo e pressão atual.
- **Duty cycle da válvula (%):** Duty cycle atualmente aplicado à válvula solenoide de controle de boost (wastegate ou blow-off).
- **Componente P (%):** Contribuição proporcional do PID ao duty cycle.
- **Componente I (%):** Contribuição integral do PID.
- **Componente D (%):** Contribuição derivativa do PID.
- **Duty base (%):** Duty cycle base (open-loop) antes da correção PID.
- **Modo de controle:** Indica se o sistema está em malha aberta, malha fechada ou em transição.
- **Limitações ativas:** Indica se algum limitador de boost está ativo (limite por CLT, limite por IAT, limite por EGT, etc.).

18.2.5 Idle State (Estado da Marcha Lenta)

A tela **idle_state** exibe o estado do sistema de controle de marcha lenta:

- **RPM alvo:** Rotação de marcha lenta desejada, considerando temperatura, carga elétrica e ar condicionado.
- **RPM atual:** Rotação medida do motor.
- **Erro de RPM:** Diferença entre RPM alvo e RPM atual.
- **Posição da válvula IAC (%):** Abertura atual da válvula de controle de ar de marcha lenta (se aplicável).
- **Correção de ignição (°):** Ajuste de avanço de ignição aplicado pelo controlador de marcha lenta.
- **Duty do acelerador eletrônico (%):** Se o controle de marcha lenta for feito via borboleta eletrônica, exibe a posição comandada.
- **Estado do controlador:** Indica se o sistema está em marcha lenta ativa, transição para marcha lenta, ou fora de marcha lenta.
- **Componentes PID:** Contribuições P, I e D do controlador de marcha lenta.
- **Compensação por CLT:** Ajuste de RPM alvo e abertura de válvula por temperatura do motor.
- **Compensação por AC:** Ajuste aplicado quando o compressor de ar condicionado está ativo.
- **Compensação por carga elétrica:** Ajuste aplicado quando cargas elétricas elevadas são detectadas (faróis, desembaçador, etc.).

18.2.6 Electronic Throttle (Acelerador Eletrônico)

A tela **electronic_throttle** exibe o estado do sistema de controle do corpo de borboleta eletrônico (DBW — *Drive-By-Wire*):

- **Posição do pedal (%):** Posição do pedal de acelerador (APP — *Accelerator Pedal Position*).
- **Posição alvo da borboleta (%):** Posição desejada da borboleta, calculada a partir da posição do pedal e das tabelas de pedal-para-borboleta.
- **Posição atual da borboleta (%):** Posição medida da borboleta pelo TPS.
- **Erro de posição (%):** Diferença entre posição alvo e posição atual.
- **Duty do motor da borboleta (%):** Duty cycle aplicado ao motor DC do corpo de borboleta (valores positivos = abertura, negativos = fechamento).
- **Componentes PID:** Contribuições P, I e D do controlador de posição da borboleta.

- **Estado do sistema:** Indica o modo de operação (normal, modo de emergência (*limp home*), falha, calibração).
- **Sensores redundantes:** Valores dos sensores TPS1, TPS2, APP1, APP2 e diagnóstico de plausibilidade entre eles.
- **Flags de erro:** Indicadores de falha como discordância entre sensores, sensor fora de faixa, motor travado, etc.

Segurança DBW

O sistema de borboleta eletrônica possui múltiplas camadas de proteção. Se uma falha é detectada nos sensores ou no atuador, a ECU automaticamente reduz a abertura máxima da borboleta ou desliga o motor da borboleta completamente, fazendo a mola de retorno fechar a borboleta para a posição de emergência. Essas proteções são exibidas na tela de monitoramento e não podem ser desabilitadas.

18.2.7 Lambda Monitor (Monitoramento Lambda)

A tela **lambda_monitor** exibe o estado do sistema de monitoramento e controle lambda:

- **Lambda medido:** Valor lambda lido pela sonda wideband (ou narrowband).
- **Lambda alvo:** Valor lambda desejado, interpolado da tabela de lambda alvo.
- **Erro lambda:** Diferença entre lambda medido e lambda alvo.
- **Correção de malha fechada (%):** Porcentagem de correção de combustível aplicada pelo controlador lambda.
- **Estado da sonda:** Indica se a sonda está aquecida e fornecendo leituras válidas.
- **Modo de controle:** Malha aberta (aquecimento, aceleração, WOT) ou malha fechada.
- **Limites de correção:** Correção máxima e mínima permitidas pelo controlador.
- **Lambda por banco:** Em motores com múltiplos bancos, exibe o lambda medido e a correção individual de cada banco.

18.2.8 Wideband State (Estado da Sonda Wideband)

A tela **wideband_state** exibe informações detalhadas sobre o controlador wideband (WideLink ou compatível):

- **Corrente de bombeamento (Ip):** Corrente da célula de bombeamento em microampères (μA).
- **Resistência interna da sonda (Ω):** Indicador de temperatura e saúde do elemento sensor. Valores típicos de operação: 80–300 Ω .
- **Temperatura da sonda ($^{\circ}C$):** Temperatura estimada do elemento sensor.

- **Tensão de referência Nernst (mV):** Tensão da célula de Nernst, utilizada para o controle de aquecimento. Valor nominal: 450 mV.
- **Duty do aquecedor (%):** Duty cycle aplicado ao aquecedor da sonda para manter a temperatura operacional.
- **Estado do aquecimento:** Fases do aquecimento (pré-aquecimento, rampa, regulação, pronto).
- **Diagnóstico:** Indicadores de falha como sonda desconectada, curto-circuito no aquecedor, sonda envenenada, etc.
- **Versão do firmware:** Versão do firmware do controlador WideLink.

18.2.9 Trigger Central (Central de Trigger)

A tela **trigger_central** exibe o estado do sistema de decodificação do sinal do sensor de rotação (*trigger*):

- **RPM:** Rotação atual do motor decodificada a partir do sinal de trigger.
- **Tipo de trigger:** O tipo de roda fônica configurado (ex.: 36-1, 60-2, VR, Hall).
- **Sincronização:** Indica se a ECU está sincronizada com o ciclo do motor (crank + cam) ou apenas com a rotação (crank only).
- **Contadores de erro:** Número de erros de decodificação detectados (dentes faltantes, dentes extras, perda de sincronismo).
- **Duty do sinal:** Duty cycle do sinal do sensor de trigger, útil para diagnosticar problemas de gap ou sensor.

18.2.10 Trigger State (Estado do Trigger)

A tela **trigger_state** complementa a tela *trigger_central* com informações mais detalhadas sobre os canais de trigger:

- **Canal primário (crank):** Estado do canal primário — frequência, contagem de dentes, erros, nível do sinal.
- **Canal secundário (cam):** Estado do canal secundário (sensor de fase) — eventos detectados, sincronização, erros.
- **Ângulo atual (°):** Posição angular atual do virabrequim em graus.
- **Tempo entre dentes (µs):** Intervalo de tempo entre os últimos dentes detectados. Variações excessivas indicam problemas mecânicos ou de sinal.
- **Gap ratio:** Razão entre os intervalos dos dentes normais e o gap (dente faltante). Utilizado pelo algoritmo de detecção de gap para sincronização.
- **Eventos VVT:** Se VVT (comando de válvulas variável) estiver configurado, exibe a posição angular do(s) comando(s) de válvulas.

- **Instabilidade do trigger:** Indicador numérico da estabilidade do sinal de trigger. Valores baixos indicam sinal limpo; valores altos indicam ruído ou problemas mecânicos.



Erros de trigger

Se os contadores de erro de trigger estiverem incrementando, isso indica um problema que deve ser investigado antes de qualquer calibração. Causas comuns incluem: gap excessivo ou insuficiente entre o sensor e a roda fônica, interferência eletromagnética no cabo do sensor, danos mecânicos na roda fônica, sensor com impedância incorreta para o tipo de entrada configurado (VR vs. Hall), ou aterramento inadequado do sensor.

18.2.11 Utilizando as Telas de Monitoramento para Diagnóstico

As telas de monitoramento em tempo real são ferramentas poderosas para diagnóstico. Algumas dicas de uso:

- **Comparação alvo vs. atual:** Em qualquer subsistema com controle de malha fechada (lambda, boost, marcha lenta, borboleta), compare sempre o valor alvo com o valor atual. Uma discrepância persistente indica problema mecânico, sensor defeituoso ou calibração inadequada do PID.
- **Monitoramento de componentes PID:** Se o componente integral estiver saturado (no limite máximo ou mínimo), isso indica que o sistema de malha fechada não consegue atingir o alvo. Investigue a causa mecânica antes de aumentar os ganhos.
- **Contadores de erro:** Contadores que incrementam continuamente indicam problemas ativos. Contadores estáticos indicam problemas intermitentes ou eventos passados.
- **Datalog:** Todas as variáveis exibidas nas telas de monitoramento podem ser gravadas no datalog para análise posterior. Utilize o datalog para capturar eventos transitórios que são difíceis de observar em tempo real.



Registro de dados

Para diagnóstico de problemas intermitentes, configure o datalog com todas as variáveis relevantes do subsistema suspeito e realize um teste de estrada reproduzindo as condições em que o problema ocorre. A análise do datalog após o teste frequentemente revela a causa raiz de forma mais clara do que a observação em tempo real.

19 Bomba de Combustível de Alta Pressão (HPFP)

Motores com injeção direta de combustível (GDI — *Gasoline Direct Injection*) requerem pressões de combustível significativamente superiores às utilizadas em sistemas de injeção indireta (PFI). Enquanto um sistema PFI opera tipicamente entre 3 e 5 bar de pressão, um sistema GDI necessita de pressões entre **50 e 350 bar** (dependendo da condição operacional), podendo ultrapassar 200 bar em condições de plena carga. A bomba de combustível de alta pressão (*High Pressure Fuel Pump* — HPFP) é o componente responsável por elevar a pressão do combustível desde o nível fornecido pela bomba de baixa pressão (tanque) até o nível requerido pelo rail de injeção direta.

A ECU MotroLink Manager da MotroLink oferece controle completo da HPFP, incluindo gerenciamento do perfil do lóbulo mecânico, compensação de deadtime da válvula solenoide, pressão alvo em função das condições operacionais, compensação feed-forward e correção por massa de combustível.

19.1 Teoria: Injeção Direta e HPFP

19.1.1 Por que a Injeção Direta Requer Alta Pressão

Na injeção direta, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão, ao contrário da injeção indireta, onde o combustível é pulverizado no coletor de admissão. Essa diferença fundamental impõe requisitos muito mais rigorosos em termos de pressão de injeção, pelos seguintes motivos:

1. **Contrapressão da câmara de combustão:** Na injeção indireta, o combustível é injetado contra a pressão relativamente baixa do coletor de admissão (tipicamente 20–100 kPa absolutos). Na injeção direta, o injetor deve vencer a pressão dentro do cilindro, que durante a fase de compressão pode atingir **15 a 30 bar** em motores naturalmente aspirados e **40 a 80 bar** em motores turbinados com alta taxa de compressão. A pressão do combustível deve ser substancialmente maior que a pressão do cilindro para garantir a penetração e atomização do jato.
2. **Atomização do combustível:** A qualidade da combustão depende diretamente do grau de atomização do combustível — ou seja, do tamanho das gotículas formadas pelo spray do injetor. Gotículas menores evaporam mais rapidamente, misturam-se melhor com o ar e queimam de forma mais completa e uniforme.

A relação entre pressão de injeção e tamanho de gotícula segue uma lei aproximadamente proporcional ao inverso da raiz quadrada da diferença de pressão (ΔP):

$$d_{gota} \propto \frac{1}{\sqrt{\Delta P}} \quad (1)$$

Onde d_{gota} é o diâmetro médio das gotículas e ΔP é a diferença entre a pressão do rail e a pressão do cilindro. Assim, dobrar o ΔP reduz o diâmetro das gotículas em aproximadamente 30%. Pressões de injeção de 200+ bar produzem gotículas com diâmetro médio de Sauter (SMD) na faixa de **10 a 20 μm** , adequadas para combustão eficiente.

3. **Janela de injeção reduzida:** Na injeção direta, a janela angular disponível para injetar o combustível é muito mais curta do que na injeção indireta. Enquanto um

injetor PFI pode injetar durante uma fração grande do ciclo do motor (até 360° ou mais de abertura), um injetor GDI frequentemente precisa concluir a injeção em janelas de **30 a 90° de virabrequim**. Para injetar a massa necessária de combustível nessa janela curta, o fluxo volumétrico instantâneo deve ser elevado, o que requer alta pressão.

4. **Formação de mistura estratificada:** Em modos de operação com mistura estratificada (carga parcial), o combustível é injetado tardiamente na fase de compressão para formar uma nuvem rica próxima à vela de ignição, cercada por ar pobre. Essa estratégia requer penetração precisa e atomização extremamente fina do jato de combustível, o que só é possível com alta pressão.

19.1.2 Arquitetura do Sistema de Combustível GDI

Um sistema de combustível GDI típico possui dois estágios de pressurização:

1. **Estágio de baixa pressão:** A bomba elétrica no tanque de combustível (bomba de alimentação) fornece combustível a uma pressão de **3 a 7 bar** para a entrada da HPFP. Essa pressão é regulada e deve ser mantida estável para o funcionamento correto da HPFP.
2. **Estágio de alta pressão (HPFP):** A bomba de alta pressão, acionada mecanicamente por um lóbulo no comando de válvulas (ou excêntrico dedicado), eleva a pressão de 3–7 bar para **50 a 350 bar**, conforme comandado pela ECU. A regulação de pressão é feita pela válvula solenoide da HPFP, controlada eletronicamente pela ECU.

19.1.3 Princípio de Funcionamento da HPFP

A HPFP é essencialmente uma bomba de pistão acionada por um lóbulo excêntrico no comando de válvulas. O ciclo de funcionamento é:

1. **Fase de aspiração:** Quando o lóbulo permite que o pistão desça (fase descendente), a válvula de entrada se abre e o combustível da baixa pressão preenche a câmara da bomba.
2. **Fase de compressão:** Quando o lóbulo empurra o pistão para cima (fase ascendente), a pressão na câmara aumenta.
3. **Controle da válvula solenoide:** A válvula solenoide de controle determina quando a compressão efetiva começa. Enquanto a válvula está aberta (desenergizada), o combustível pode fluir de volta para o circuito de baixa pressão, e a pressão no rail não aumenta. Quando a válvula fecha (energizada), o combustível é efetivamente comprimido e forçado para o rail de alta pressão.
4. **Regulação de pressão:** A ECU controla a pressão do rail ajustando o instante (ângulo do lóbulo) em que a válvula solenoide é fechada. Fechar a válvula mais cedo na fase de compressão resulta em maior volume de combustível bombeado e maior pressão. Fechar mais tarde resulta em menor volume e menor pressão.

! Bomba de baixa pressão

O funcionamento correto da HPFP depende criticamente da pressão de alimentação fornecida pela bomba de baixa pressão. Se a pressão de alimentação cair abaixo do mínimo especificado (tipicamente 3 bar), a HPFP não conseguirá atingir a pressão alvo, e podem ocorrer fenômenos de cavitação que danificam a bomba. Monitore sempre a pressão de baixa pressão e certifique-se de que a bomba de alimentação está dimensionada adequadamente para o fluxo requerido.

19.2 Perfil do Lóbulo

O perfil do lóbulo da HPFP determina a relação entre a posição angular do comando de válvulas e o volume deslocado pelo pistão da bomba. Essa curva é fundamental para que a ECU calcule corretamente o instante de fechamento da válvula solenoide.

19.2.1 Curva: Volume de Bombeamento (%) vs. Ângulo (°)

A curva de perfil do lóbulo descreve o **volume de bombeamento** (em porcentagem do volume máximo deslocável) em função do **ângulo do lóbulo** (em graus do comando de válvulas, de 0° a 360° para um lóbulo simples, ou de 0° a 120°/180° para lóbulos múltiplos).

A curva possui formato aproximadamente sinusoidal ou em forma de “S” e é dividida nas seguintes regiões:

- **Rampa ascendente (compressão):** O pistão se move para cima, comprimindo o combustível na câmara. Nessa região, o volume de bombeamento aumenta de 0% a 100%. A taxa de variação (derivada) da curva determina o fluxo instantâneo de combustível.
- **Ponto morto superior (PMS):** O ponto onde o pistão atinge seu curso máximo e o volume bombeado é 100%. Neste ponto, o fluxo instantâneo é zero (inversão de direção).
- **Rampa descendente (aspiração):** O pistão retorna, reduzindo a pressão na câmara e permitindo a entrada de combustível fresco. O volume de bombeamento decresce de 100% para 0%.
- **Ponto morto inferior (PMI):** O ponto onde o pistão está na posição mais baixa. O ciclo recomeça.

Os pontos de calibração da curva de perfil do lóbulo são:

- **Eixo X:** Ângulo do lóbulo em graus (tipicamente 16 a 32 pontos, distribuídos uniformemente ou concentrados nas regiões de transição).
- **Eixo Y:** Volume de bombeamento em porcentagem (0–100%).

i Perfis pré-carregados

A ECU MotroLink Manager inclui perfis de lóbulo pré-calibrados para as bombas HPFP mais comuns do mercado (Bosch HDP, Hitachi HPF, Continental/Siemens

HDP1/HDP5, Delphi GDI). Se a bomba utilizada corresponder a um dos perfis disponíveis, selecione-o diretamente. Se for uma bomba com perfil desconhecido, será necessário levantar a curva experimentalmente ou consultar o fabricante.

19.2.2 Perfil Mecânico vs. Controle Eletrônico

É importante compreender a distinção entre o perfil mecânico do lóbulo e o controle eletrônico:

- **Perfil mecânico:** É uma propriedade fixa da bomba e do lóbulo do comando de válvulas. Determina o volume máximo teórico que pode ser bombeado por ciclo e a forma da curva de deslocamento. Não pode ser alterado pela ECU.
- **Controle eletrônico:** A ECU controla a fração do volume disponível que é efetivamente bombeada para o rail, ajustando o momento de fechamento da válvula solenoide. Se a válvula é fechada no início da rampa de compressão, praticamente todo o volume é bombeado. Se é fechada perto do PMS, apenas uma pequena fração é bombeada.

A ECU utiliza o perfil do lóbulo para calcular o ângulo exato de fechamento da válvula solenoide necessário para atingir o volume de combustível requerido em cada ciclo. Sem o perfil correto, a ECU não consegue determinar a relação entre o ângulo de comando e o volume entregue, resultando em oscilação de pressão e controle impreciso.

Perfil incorreto

Utilizar um perfil de lóbulo que não corresponde à bomba instalada resultará em controle de pressão instável. Os sintomas incluem: oscilação de pressão do rail, overshoots de pressão durante transientes, incapacidade de atingir a pressão alvo e, em casos extremos, picos de pressão que podem danificar o rail, os injetores ou a bomba. Verifique sempre se o perfil selecionado corresponde ao hardware instalado.

19.3 Deadtime da Válvula

A válvula solenoide da HPFP possui um tempo de resposta finito entre o instante em que o comando elétrico é enviado pela ECU e o instante em que a válvula efetivamente fecha e inicia a compressão do combustível. Esse atraso é denominado **deadtime** (ou tempo morto) da válvula.

19.3.1 Curva: Tensão da Bateria (V) vs. Deadtime (ms)

O deadtime da válvula solenoide é fortemente influenciado pela **tensão de alimentação** (tensão da bateria). Tensões mais baixas resultam em corrente de excitação menor, o que aumenta o tempo necessário para a força eletromagnética vencer a mola de retorno e mover a armadura da válvula. A relação é descrita por uma curva de compensação:

- **Eixo X:** Tensão da bateria em Volts (tipicamente de 6,0V a 16,0V, com 8 a 16 pontos de calibração).
- **Eixo Y:** Deadtime em milissegundos (tipicamente de 0,3 ms a 3,0 ms).

A curva de deadtime possui formato hiperbólico: o deadtime aumenta rapidamente conforme a tensão diminui abaixo de 10 V, e se estabiliza para tensões acima de 14 V. Valores típicos para bombas automotivas:

- A 14,0 V (tensão nominal com motor em funcionamento): 0,4–0,8 ms.
- A 12,0 V (tensão de bateria sem carga): 0,6–1,2 ms.
- A 10,0 V (bateria fraca ou partida): 1,0–2,0 ms.
- A 8,0 V (condição extrema de subtensão): 1,5–3,0 ms.

19.3.2 Importância da Compensação de Deadtime

A compensação de deadtime é **crítica** para o controle preciso da pressão do rail. Sem ela, a ECU calculará incorretamente o instante efetivo de fechamento da válvula:

- **Deadtime subestimado (compensação insuficiente):** A válvula fecha mais tarde do que a ECU espera, resultando em **menos combustível bombeado** do que o calculado. A pressão do rail ficará abaixo do alvo, especialmente em tensões de bateria baixas.
- **Deadtime superestimado (compensação excessiva):** A ECU comanda o fechamento excessivamente antecipado, resultando em **mais combustível bombeado** do que o necessário. A pressão do rail ficará acima do alvo, podendo causar picos de pressão perigosos.

Sobrepressão no rail

Um deadtime excessivamente compensado pode causar picos de pressão que excedem a capacidade do rail e dos injetores. Componentes do sistema de combustível de alta pressão são projetados para pressões específicas (tipicamente 200–350 bar conforme a aplicação). Exceder esses limites pode causar vazamento de combustível em alta pressão, que representa risco de incêndio grave. Calibre o deadtime com cautela e monitore sempre a pressão real do rail durante os ajustes.

19.3.3 Procedimento de Calibração do Deadtime

Para calibrar a curva de deadtime:

1. Configure a pressão alvo para um valor fixo e moderado (ex.: 100 bar).
2. Com o motor em marcha lenta estável, monitore a pressão real do rail e o duty cycle da HPFP.
3. Varie a tensão do sistema elétrico (utilizando uma fonte de alimentação ajustável ou cargas elétricas) para diferentes pontos da curva.
4. Em cada tensão, ajuste o valor de deadtime até que a pressão real corresponda ao alvo sem oscilação.
5. Repita para todas as tensões de interesse (8 V a 16 V).

Dados do fabricante

Sempre que disponíveis, utilize os dados de deadtime fornecidos pelo fabricante da bomba como ponto de partida. Os valores podem ser encontrados na documentação técnica da bomba ou em bases de dados de calibração. O ajuste fino pode ser necessário para compensar variações de produção e envelhecimento do solenoide.

19.4 Pressão Alvo

A ECU MotroLink Manager determina a pressão alvo do rail de combustível de alta pressão a partir de uma **tabela 2D** que relaciona **RPM** e **carga do motor** (TPS, MAP ou outra variável selecionável) à pressão desejada em bar.

19.4.1 Tabela: RPM × Carga → Pressão Alvo (bar)

- **Eixo X:** RPM do motor (tipicamente 8 a 16 pontos, de 500 a 8000 rpm).
- **Eixo Y:** Carga do motor — pode ser configurada como TPS (%), MAP (kPa), ou carga calculada (%).
- **Conteúdo das células:** Pressão alvo do rail em bar (tipicamente 50 a 350 bar).

A interpolação bilinear é aplicada entre os pontos da tabela para garantir transições suaves de pressão durante a operação.

19.4.2 Estratégia de Calibração da Pressão Alvo

A pressão alvo deve ser calibrada considerando os seguintes fatores:

- **Marcha lenta e carga baixa (50–80 bar):** Pressões menores são suficientes, pois a contrapressão do cilindro é baixa, a demanda de combustível é pequena e a janela de injeção é ampla. Pressões baixas reduzem o ruído da bomba, o desgaste mecânico e o consumo parasita de energia.
- **Carga parcial (80–150 bar):** A pressão é aumentada progressivamente para melhorar a atomização e permitir janelas de injeção mais curtas. Em modos estratificados, a pressão nessa faixa é crítica para a formação adequada da nuvem de combustível.
- **Plena carga (150–350 bar):** Pressões máximas são necessárias para:
 - Vencer a alta contrapressão do cilindro em motores turbo.
 - Garantir atomização fina mesmo com grandes massas de combustível.
 - Permitir a injeção de toda a massa de combustível na janela angular disponível.
 - Em motores turbo de alto desempenho, pressões de 200–350 bar são comuns em WOT.
- **Altas rotações:** Independentemente da carga, a pressão alvo pode ser elevada em altas rotações para compensar a redução da janela de injeção (em milissegundos) causada pela maior velocidade angular do motor.

Pressão mínima de operação

Nunca calibre a pressão alvo abaixo do mínimo especificado para os injetores GDI utilizados. Pressão insuficiente resulta em atomização grosseira (gotículas grandes), combustão incompleta, aumento de emissões de material particulado (fumaça), depósitos nos injetores e diluição do óleo lubrificante por combustível líquido que escorre pelas paredes do cilindro (*fuel wash*).

19.4.3 Rampa de Pressão e Taxa de Variação

A ECU limita a taxa de variação da pressão alvo (rampa de subida e descida) para evitar transientes bruscos que podem causar:

- **Oscilação do controlador:** Mudanças bruscas de alvo podem excitar modos oscilatórios no controlador de pressão.
- **Estresse mecânico:** Variações rápidas de pressão causam fadiga nos componentes do rail e das linhas de combustível.
- **Ruído acústico:** Transientes de pressão geram pulsos de ruído audíveis na bomba e no rail.

A taxa de rampa é configurável em bar/segundo, com valores típicos de 50–200 bar/s para subida e 100–500 bar/s para descida (a descida pode ser mais rápida pois depende apenas do consumo dos injetores e de vazamento controlado).

19.5 Compensação Feed-Forward

O controle de pressão da HPFP utiliza um controlador PID em malha fechada. No entanto, durante transientes rápidos (aceleração brusca, mudança de marcha, entrada em boost), o PID pode ser lento demais para reagir, causando quedas temporárias de pressão (*fuel pressure dip*). Para mitigar esse problema, a ECU implementa uma **compensação feed-forward** (antecipativa) que adiciona uma quantidade de combustível extra baseada na demanda instantânea prevista.

19.5.1 Tabela: RPM × Consumo → Correção Antecipativa

- **Eixo X:** RPM do motor (8 a 16 pontos).
- **Eixo Y:** Consumo de combustível estimado — pode ser expresso como fluxo volumétrico (cc/min), massa por ciclo (mg/ciclo) ou duty cycle dos injetores (%).
- **Conteúdo das células:** Correção antecipativa em porcentagem do duty cycle da HPFP (%) ou em volume adicional (cc). Este valor é adicionado ao comando da HPFP antes da correção PID.

19.5.2 Princípio da Compensação Feed-Forward

A compensação feed-forward funciona como um “mapa base” para o controlador da HPFP, análogo à tabela VE no controle de combustível:

1. A ECU calcula a demanda de combustível instantânea com base no tempo de injeção, número de cilindros e RPM.
2. A tabela feed-forward converte essa demanda em uma estimativa do volume de combustível que a HPFP deve fornecer por ciclo.
3. Esse valor feed-forward é somado ao duty base da HPFP, **antes** da correção PID de malha fechada.
4. O PID corrige apenas o erro residual entre a pressão alvo e a pressão real, resultando em correções menores e resposta mais rápida.

Calibração da tabela feed-forward

Uma tabela feed-forward bem calibrada reduz drasticamente a carga sobre o controlador PID, resultando em controle de pressão mais estável e responsivo. Para calibrar: (1) Com o PID desabilitado, preencha a tabela feed-forward até que a pressão do rail se aproxime do alvo em condições estáticas (RPM e carga constantes). (2) Habilite o PID com ganhos moderados para corrigir o erro residual. (3) Ajuste iterativamente a tabela feed-forward e os ganhos PID até obter resposta suave em transientes.

19.5.3 Dinâmica de Transientes

A compensação feed-forward é especialmente importante nos seguintes cenários:

- **Tip-in (aceleração brusca):** A demanda de combustível aumenta rapidamente, e sem feed-forward a pressão do rail cairia até que o PID reagisse. A compensação antecipativa pré-carrega a HPFP, mantendo a pressão estável.
- **Tip-out (desaceleração brusca):** A demanda cai rapidamente, e sem compensação a pressão subiria temporariamente. O feed-forward reduz imediatamente o comando da HPFP.
- **Transição para boost:** Quando a turbina começa a produzir boost, a contrapressão no cilindro aumenta e a demanda de combustível pode dobrar em frações de segundo. O feed-forward antecipa essa necessidade.
- **Corte de combustível:** Durante o *fuel cut* em desaceleração, a demanda cai a zero. O feed-forward deve reduzir o comando da HPFP para evitar sobrepressão.

19.6 Compensação por Massa de Combustível

A eficiência volumétrica da HPFP não é constante — ela varia em função da pressão do rail e da massa de combustível sendo bombeada por ciclo. Isso ocorre devido a efeitos de compressibilidade do combustível, vazamentos internos da bomba (*leakage*), e comportamento dinâmico da válvula solenoide. Para compensar essas não linearidades, a ECU utiliza uma **tabela de compensação por massa de combustível**.

19.6.1 Tabela: Massa (mg) $\times$ Pressão (bar) $\rightarrow$ Fator de Correção

- **Eixo X:** Massa de combustível por cilindro por ciclo em miligramas (mg). Tipicamente de 5 mg (marcha lenta) a 200 mg (plena carga turbo), com 8 a 16 pontos.
- **Eixo Y:** Pressão do rail em bar. Tipicamente de 50 bar a 350 bar, com 8 a 16 pontos.
- **Conteúdo das células:** Fator de correção adimensional (tipicamente 0,80 a 1,20). O valor 1,00 indica que nenhuma correção é necessária. Valores acima de 1,00 indicam que a bomba precisa deslocar mais volume do que o calculado nominalmente. Valores abaixo de 1,00 indicam que a bomba é mais eficiente que o nominal naquela condição.

19.6.2 Fatores que Afetam a Eficiência da Bomba

- **Compressibilidade do combustível:** O combustível não é perfeitamente incompressível. Em pressões elevadas (200+ bar), uma fração significativa do volume deslocado pelo pistão é “consumida” pela compressão do combustível já presente na câmara da bomba, antes que a pressão atinja o nível do rail e o combustível comece a fluir para o rail. Quanto maior a pressão do rail, maior a fração de volume perdida para compressibilidade, e maior o fator de correção necessário.
- **Vazamento interno (*leakage*):** Toda bomba de pistão possui algum grau de vazamento entre o pistão e o cilindro. Esse vazamento é proporcional à pressão e ao tempo de exposição. Em baixas rotações (tempo de ciclo longo), o vazamento acumulado por ciclo é maior, exigindo correção. Em altas rotações, o vazamento por ciclo é menor.
- **Dinâmica da válvula solenoide:** O tempo de abertura e fechamento da válvula solenoide não é infinitamente rápido. Em condições onde a janela de bombeamento é muito curta (altas rotações, demanda elevada), o tempo de transição da válvula representa uma fração significativa da janela total, reduzindo a eficiência efetiva.
- **Temperatura do combustível:** O combustível mais quente é menos denso e mais compressível. Em condições de temperatura elevada (retorno de combustível após circulação pelo rail), a eficiência da bomba diminui e o fator de correção deve ser aumentado.
- **Tipo de combustível:** Etanol (E85/E100) possui propriedades físicas diferentes da gasolina (densidade, viscosidade, compressibilidade). A tabela de compensação pode necessitar de ajuste ao alternar entre combustíveis ou em aplicações flex fuel.

19.6.3 Procedimento de Calibração

A calibração da tabela de compensação por massa de combustível é um processo iterativo:

1. **Configuração inicial:** Preencha toda a tabela com o valor 1,00 (sem correção).
2. **Teste em regime estacionário:** Estabilize o motor em diversas combinações de RPM e carga, monitorando:

- Pressão alvo vs. pressão real do rail.
 - Duty cycle da HPFP.
 - Correção PID (componente integral).
3. **Identificação de desvios:** Se o PID estiver consistentemente corrigindo na mesma direção (componente integral acumulado positivo ou negativo) em uma determinada condição, isso indica que o comando feed-forward precisa de correção naquela região da tabela.
 4. **Ajuste da tabela:** Aumente o fator de correção onde o PID está corrigindo positivamente (bomba entregando menos que o esperado) e diminua onde está corrigindo negativamente (bomba entregando mais que o esperado).
 5. **Iteração:** Repita o teste e ajuste até que a correção PID esteja próxima de zero em todas as condições estacionárias. O PID deve corrigir apenas durante transientes, não em regime permanente.

! Monitoramento da pressão

Durante toda a calibração da HPFP, monitore a pressão do rail em tempo real com atenção especial a picos e quedas. Mantenha os limites de segurança de pressão máxima configurados na ECU. A ECU possui uma proteção de sobrepressão que reduz o comando da HPFP se a pressão exceder o limite configurado, mas essa proteção é um último recurso — a calibração deve evitar que essa condição ocorra em operação normal.

⚡ Pressão extrema

O sistema de combustível de alta pressão opera com pressões que podem causar lesões graves em caso de vazamento. Um jato de combustível a 200+ bar pode penetrar a pele e causar lesões internas graves. Nunca abra ou desconecte linhas de combustível de alta pressão com o motor em funcionamento ou com o rail pressurizado. Aguarde a despressurização completa (monitore a pressão do rail no software) antes de qualquer intervenção mecânica no sistema de alta pressão.

20 Dicas de Calibração e Boas Práticas

Este capítulo reúne orientações práticas, listas de verificação e valores de referência que auxiliam tanto calibradores iniciantes quanto experientes a obter resultados consistentes e seguros. As recomendações aqui apresentadas foram compiladas a partir de experiência real em bancada e em veículos, e devem ser tratadas como diretrizes — sempre adapte ao contexto específico do seu projeto.

20.1 Ordem Recomendada de Calibração

A sequência abaixo representa o fluxo mais seguro e eficiente para levar um motor do estado “sem calibração” até uma calibração completa e validada. Respeitar essa ordem evita retrabalho e reduz significativamente o risco de danos ao motor.

1. **Configuração Básica da ECU** — Antes de qualquer tentativa de partida, configure no MotroLink Manager :
 - Tipo de motor (número de cilindros, ciclo, ordem de ignição).
 - Tipo de injeção (sequencial, semi-sequencial, batch).
 - Tipo de ignição (sequencial, wasted spark).
 - Tipo de combustível e relação estequiométrica.
 - Tipo de roda fônica (número de dentes, dentes faltantes).
 - Tipo de sensor de rotação (relutância variável ou Hall).
2. **Sensores e Entradas** — Configure e valide cada sensor individualmente:
 - Calibre o TPS (mínimo e máximo) pelo assistente do MotroLink Manager .
 - Verifique a leitura do MAP com o motor desligado (deve indicar pressão atmosférica).
 - Confirme que CLT e IAT estão lendo valores coerentes com a temperatura ambiente.
 - Verifique a tensão da bateria lida pela ECU.
 - Se houver sensor de pressão de óleo ou combustível, valide a leitura.
3. **Sincronismo do Trigger** — Este passo é crítico:
 - Gire o motor no arranque (sem partida) e verifique se o MotroLink Manager exibe RPM estável.
 - Confirme que não há erros de sincronismo (“sync loss count” deve permanecer em zero).
 - Verifique o sinal do trigger no osciloscópio do MotroLink Manager , se disponível.
4. **Primeira Partida** — Com as proteções ativas:
 - Configure o limitador de rotação em um valor conservador (ex.: 3000–3500 RPM).
 - Ajuste um enriquecimento de partida generoso (errar para rico é mais seguro).

- Defina o *cranking pulse width* entre 8 e 15 ms como ponto de partida.
- Tente a partida monitorando RPM, lambda e pressão de óleo.

5. **Marcha Lenta (Idle)** — Estabilize o motor em marcha lenta:

- Ajuste a posição base do atuador de marcha lenta (IAC) ou a abertura do corpo de borboleta eletrônico (ETB).
- Defina o RPM-alvo de marcha lenta.
- Configure o controle PID de marcha lenta (se utilizado).
- O motor deve manter RPM estável com lambda próximo de 1,0 (14,7:1 para gasolina).

6. **Tabela VE (Eficiência Volumétrica)** — Calibração da mistura:

- Comece pelas regiões de baixa carga e baixa rotação.
- Avance gradualmente para regiões de maior carga e rotação.
- Utilize a sonda lambda de banda larga como referência primária.
- Em regime estacionário, ajuste cada célula para atingir o lambda-alvo.
- Nas regiões de carga parcial, mire lambda 1,0.
- Em WOT, mire lambda entre 0,82 e 0,88 (gasolina) ou conforme o combustível.

7. **Tabela de Ignição (Avanço)** — Calibração do ponto de ignição:

- Comece com valores conservadores (ex.: 10 extdegree BTDC em toda a tabela).
- Avance gradualmente em cada célula, monitorando knock e torque.
- Em motores sem sensor de detonação, seja especialmente conservador em altas cargas.
- Valide o offset do trigger com uma pistola de ponto antes de ajustar o avanço.

8. **Correções e Compensações** — Refine o comportamento em condições variáveis:

- Correção por temperatura do motor (CLT): enriquecimento a frio, empobrecimento a quente.
- Correção por temperatura do ar (IAT): compensação de densidade.
- Enriquecimento de aceleração (AE): ajuste o *acceleration enrichment* por TPS e/ou MAP.
- DFCO (*Deceleration Fuel Cut-Off*): defina os limiares de ativação e desativação.
- Enriquecimento pós-partida (*after-start enrichment*).

9. **Funções Avançadas** — Configure recursos adicionais:

- Controle de detonação (*knock control*).
- Controle de *boost* (se turbo/supercharged).
- Controle de VVT (*Variable Valve Timing*), se aplicável.

- Saídas auxiliares (ventoinhas, bomba de combustível, nitro, etc.).
- Controle de largada (*launch control*) e *anti-lag* (ALS).

10. Validação Final — Confirme que tudo está correto:

- Realize datalogs completos em diversas condições (cidade, estrada, WOT).
- Verifique todas as faixas de RPM e carga no datalog.
- Confirme estabilidade de marcha lenta a quente e a frio.
- Faça um backup completo da calibração validada.

! Não pule etapas

Cada etapa depende da anterior. Tentar calibrar a tabela de ignição sem antes ter a tabela VE razoavelmente correta, por exemplo, pode levar a conclusões erradas sobre o avanço ideal e causar detonação.

20.2 Checklist Pré-Partida

Antes de tentar a primeira partida com a ECU MotroLink , percorra **todos** os itens abaixo. Marque cada item conforme for verificado.

1. Fiação e Alimentação Elétrica

- Todos os conectores estão firmemente encaixados na ECU.
- Os fios de alimentação (12V e GND) estão conectados diretamente à bateria com fusíveis adequados.
- O relé principal da ECU está funcionando corretamente.
- Não há fios expostos, em curto ou com isolamento danificado.

2. Sistema de Combustível

- A bomba de combustível liga ao acionar a ignição (prime).
- A pressão de combustível está dentro da faixa especificada pelo fabricante do regulador.
- Não há vazamentos visíveis nas conexões, mangueiras e trilho de injeção.
- Os bicos injetores estão corretamente conectados aos cilindros correspondentes.
- O *dead time* dos injetores está configurado no MotroLink Manager conforme dados do fabricante.

3. Sistema de Ignição

- As bobinas estão conectadas aos cilindros corretos conforme a ordem de ignição.
- As velas de ignição estão instaladas com o gap correto.
- O tipo de ignição (sequencial, wasted spark) está configurado corretamente.
- O dwell está configurado conforme especificação das bobinas.

4. Sensores

- O sensor de posição da borboleta (TPS) está calibrado (mínimo e máximo definidos no MotroLink Manager).
- O sensor MAP lê pressão atmosférica com o motor desligado.
- Os sensores CLT e IAT indicam temperatura ambiente coerente.
- O sensor de pressão de óleo está instalado e configurado (se disponível).
- A sonda lambda de banda larga está conectada e o controlador está operacional.

5. Sincronismo (Trigger)

- O tipo de roda fônica está corretamente configurado (número de dentes, dentes faltantes).
- O tipo de sensor (VR ou Hall) está configurado corretamente.
- Ao girar o motor no arranque, o MotroLink Manager exibe RPM (confirmando leitura do sensor).
- O contador de erros de sincronismo (“sync loss”) permanece em zero durante o cranking.
- O offset do trigger foi verificado (idealmente com pistola de ponto).

6. Limitadores e Proteções

- O limitador de rotação está configurado em um valor conservador (3000–3500 RPM para primeira partida).
- A proteção por temperatura do motor está ativa (corte ou alerta em temperatura elevada).
- A proteção por pressão de óleo está configurada (se sensor disponível).

7. Segurança Pessoal e do Ambiente

- Extintor de incêndio acessível e dentro da validade.
- Área de trabalho ventilada (risco de monóxido de carbono).
- Peças soltas, ferramentas e materiais inflamáveis afastados do motor.
- Proteção auditiva disponível.
- Uma segunda pessoa presente ou ciente do trabalho sendo realizado.

8. Software e Comunicação

- O MotroLink Manager está instalado e comunicando com a ECU.
- O firmware da ECU está atualizado para a versão recomendada.
- Um backup da calibração base foi salvo antes de qualquer modificação.
- O datalogger do MotroLink Manager está configurado e pronto para gravar.



Pressão de óleo

Em motores que possuem sensor de pressão de óleo conectado à ECU, configure a proteção para cortar a injeção caso a pressão de óleo caia abaixo do limite seguro

com o motor em funcionamento. Isso pode salvar o motor em caso de falha na lubrificação.

20.3 Checklist Pós-Calibração

Após concluir a calibração, utilize esta lista para garantir que nenhum aspecto foi esquecido antes de considerar o trabalho finalizado.

1. Cobertura da Tabela VE

- Todas as células acessíveis da tabela VE foram ajustadas (verificar no datalog se há regiões não visitadas).
- O lambda medido está dentro de $\pm 3\%$ do lambda-alvo em regime estacionário.
- A transição entre células adjacentes é suave (sem degraus abruptos nos valores VE).

2. Cobertura da Tabela de Ignição

- O avanço foi verificado em todas as regiões de operação acessíveis.
- O avanço em WOT foi validado com monitoramento de knock (sensor ou áudio).
- Os valores de avanço são progressivos e sem inversões ilógicas.

3. Correções de Temperatura

- O enriquecimento a frio (warm-up enrichment) foi testado com partida a frio real.
- A correção por IAT está ativa e com valores coerentes.
- O motor atinge e mantém lambda-alvo após atingir temperatura de operação.

4. Proteções Ativas

- O controle de detonação (knock) está ativo e configurado (se sensor instalado).
- O limitador de rotação está definido no valor final correto.
- A proteção por temperatura do motor está ativa.
- A proteção por pressão de óleo está ativa (se sensor disponível).

5. DFCO e Desaceleração

- O corte de combustível em desaceleração (DFCO) está funcionando.
- O motor retoma suavemente ao sair do DFCO (sem engasgos ou estouro no escapamento).

6. Marcha Lenta

- A marcha lenta é estável com o motor quente (variação < 50 RPM).
- A marcha lenta é estável com o motor frio (variação < 100 RPM).
- A marcha lenta se recupera rapidamente após carga elétrica (faróis, ar-condicionado).

- O RPM de marcha lenta está no valor-alvo definido.

7. Enriquecimento de Aceleração

- Não há hesitação (*flat spot*) ao acelerar bruscamente em qualquer faixa de rotação.
- Não há enriquecimento excessivo (fumaça preta ao acelerar).

8. Revisão de Datalogs

- Datalogs foram gravados em condições variadas: cidade, estrada, WOT, partida a frio.
- Nenhum evento de knock foi registrado durante uso normal.
- As temperaturas do motor permanecem dentro dos limites seguros.
- O lambda em WOT está na faixa de segurança para o combustível utilizado.

9. Backup Final

- Um backup completo da calibração final foi salvo no computador.
- O backup foi nomeado com data e descrição do veículo/motor.
- Uma cópia de segurança foi armazenada em local separado (nuvem, pendrive, etc.).



Documentação

Registre as principais decisões de calibração e os valores finais mais relevantes (RPM de marcha lenta, lambda-alvo em WOT, avanço máximo em WOT, pressão de boost alvo). Essas informações são valiosas para manutenções futuras ou para replicar a calibração em outro veículo similar.

20.4 Erros Comuns e Como Evitá-los

A seguir estão os erros mais frequentes cometidos durante a calibração, acompanhados de explicações sobre por que são problemáticos e como evitá-los.

20.4.1 Tabela VE com Resolução Inadequada

Erro: Criar uma tabela VE com poucas linhas/colunas (muito grosseira) ou com excesso de linhas/colunas (muito fina).

Problema: Uma tabela grosseira não permite ajuste preciso em regiões de transição. Uma tabela excessivamente fina torna a calibração impraticável e pode causar instabilidade, pois pequenas diferenças entre células adjacentes geram oscilações na mistura.

Solução: Utilize a resolução padrão sugerida pelo MotroLink Manager como ponto de partida. Concentre maior resolução nas regiões de marcha lenta e transição. Em regiões de WOT onde a variação é gradual, menos pontos são suficientes.

20.4.2 Avanço de Ignição Excessivo sem Sensor de Detonação

Erro: Avançar agressivamente a ignição buscando máxima performance sem ter um sensor de knock instalado e configurado.

Problema: A detonação pode ocorrer sem ser perceptível pelo calibrador (especialmente em altas rotações) e causar danos severos ao motor em questão de segundos.

Solução: Se não houver sensor de detonação, utilize valores de avanço conservadores, especialmente em alta carga. Deixe pelo menos 2–3 extdegree de margem em relação ao MBT estimado. Considere fortemente a instalação de um sensor de knock.



Detonação silenciosa

Em altas rotações, a detonação pode ser inaudível ao ouvido humano e ao microfone. O sensor de knock piezoelétrico é a única forma confiável de detectá-la nessas condições. Sem ele, não avance além de valores sabidamente seguros para o motor em questão.

20.4.3 Não Configurar o Limitador de Rotação Antes da Primeira Partida

Erro: Deixar o limitador de rotação no valor padrão de fábrica (que pode ser alto) ou desativado durante a primeira partida.

Problema: Se houver um problema na calibração (mistura muito rica ou muito pobre, ponto de ignição errado), o motor pode acelerar descontroladamente. Sem limitador, pode atingir rotações destrutivas.

Solução: Sempre configure o limitador em um valor baixo e seguro (3000–3500 RPM) antes da primeira partida. Aumente gradualmente conforme a calibração avança e é validada.

20.4.4 Dead Time dos Injetores Incorreto

Erro: Utilizar valores de *dead time* (tempo morto) incorretos para os injetores instalados.

Problema: O *dead time* é o tempo que o injetor leva para abrir mecanicamente antes de começar a fluir combustível. Se esse valor estiver errado, a quantidade real de combustível injetada será diferente da calculada pela ECU. Isso afeta toda a tabela VE e torna impossível uma calibração correta, especialmente em baixas cargas onde o tempo de injeção é curto.

Solução: Obtenha os dados de *dead time* do fabricante dos injetores. Esses valores variam com a tensão da bateria — configure a tabela de compensação por tensão no MotroLink Manager. Se os dados do fabricante não estiverem disponíveis, utilize valores genéricos para injetores de impedância similar e refine empiricamente.

20.4.5 TPS Não Calibrado

Erro: Não executar o procedimento de calibração do TPS (definir mínimo e máximo) no MotroLink Manager.

Problema: Sem calibração, o TPS pode não indicar 0% com a borboleta fechada nem 100% com a borboleta totalmente aberta. Isso afeta o enriquecimento de aceleração, a detecção de WOT, o funcionamento do DFCO e qualquer estratégia baseada em posição da borboleta.

Solução: Execute o assistente de calibração do TPS no MotroLink Manager antes de qualquer tentativa de partida. Verifique que a leitura indica 0% com borboleta fechada e 100% (ou próximo) com borboleta totalmente aberta.

20.4.6 Offset do Trigger Incorreto

Erro: Não verificar ou ajustar corretamente o offset (defasagem) do sensor de rotação em relação ao PMS (Ponto Morto Superior).

Problema: Se o offset estiver errado, todo o mapa de ignição estará defasado. Um offset de 10 extdegree a mais ou a menos pode significar a diferença entre funcionamento normal e detonação severa, ou entre boa performance e perda significativa de potência.

Solução: Utilize uma pistola de ponto (timing light) para verificar o avanço real no virabrequim e compare com o valor comandado pelo MotroLink Manager. Ajuste o offset até que os valores coincidam. Faça isso com o motor em marcha lenta e avanço fixo.

Offset incorreto pode destruir o motor

Um offset do trigger incorreto pode resultar em avanço de ignição muito maior que o esperado, causando detonação severa e danos catastróficos ao motor. Sempre verifique o offset com pistola de ponto antes de avançar a ignição além de valores conservadores.

20.4.7 Não Monitorar Temperaturas Durante a Calibração

Erro: Focar exclusivamente em lambda e RPM durante a calibração, ignorando as temperaturas do motor (CLT), do ar de admissão (IAT) e dos gases de escapamento (EGT, se disponível).

Problema: A temperatura do motor influencia diretamente a tendência à detonação. Calibrar com o motor frio e assumir que os mesmos valores serão seguros com o motor totalmente aquecido é um erro perigoso. Temperaturas de escapamento excessivas podem indicar mistura pobre não detectada pela sonda lambda (em caso de falha de cilindro individual, por exemplo).

Solução: Sempre monitore CLT e IAT no MotroLink Manager durante a calibração. Aguarde o motor atingir a temperatura de operação antes de calibrar regiões de alta carga. Se disponível, utilize sensores EGT para monitorar cada cilindro individualmente.

20.4.8 Interpolação Inadequada entre Células da Tabela

Erro: Ajustar células individuais da tabela VE ou de ignição de forma isolada, criando degraus abruptos entre células adjacentes.

Problema: Quando o motor opera entre dois pontos da tabela, a ECU interpola entre eles. Se houver uma diferença muito grande entre células vizinhas, a transição será abrupta, causando oscilações na mistura ou no avanço e dirigibilidade ruim.

Solução: Após ajustar uma célula, verifique se os valores das células vizinhas formam uma transição suave. O MotroLink Manager oferece visualização 3D da tabela — use-a para identificar picos e vales indesejados. Utilize a função de suavização (*smoothing*) quando disponível.

20.5 Uso do Datalogger para Validação

O datalogger integrado ao MotroLink Manager é uma das ferramentas mais poderosas para validar e refinar a calibração. Saber o que monitorar e como interpretar os dados é essencial.

20.5.1 Canais Essenciais para Monitoramento

Configure o datalogger do MotroLink Manager para registrar, no mínimo, os seguintes canais:

- **RPM** — Rotação do motor.
- **MAP** — Pressão absoluta do coletor de admissão (kPa).
- **TPS** — Posição da borboleta (%).
- **Lambda medido** — Valor lido pela sonda lambda de banda larga.
- **Lambda alvo** — Valor-alvo configurado na tabela de alvos.
- **Avanço de ignição** — Ponto de ignição efetivo (extdegreeBTDC), incluindo correções.
- **CLT** — Temperatura do líquido de arrefecimento (extdegreeC).
- **IAT** — Temperatura do ar de admissão (extdegreeC).
- **Tempo de injeção** — Pulso do injetor (ms).
- **VE atual** — Valor da tabela VE na célula ativa.
- **Tensão da bateria** — Tensão de alimentação (V).
- **Knock count** — Contador de eventos de detonação (se sensor instalado).
- **Knock retard** — Retardo de ignição aplicado pelo controle de knock (extdegree).
- **Duty cycle do injetor** — Ciclo de trabalho do injetor (%).
- **Posição do IAC / ETB** — Posição do atuador de marcha lenta (%).

Taxa de amostragem

Para análise detalhada, utilize uma taxa de amostragem de pelo menos 20 Hz (20 amostras por segundo). Em situações de WOT e análise de knock, taxas mais altas (50–100 Hz) são preferíveis para capturar eventos rápidos.

20.5.2 O Que Procurar nos Datalogs

Desvio de Lambda: Compare o lambda medido com o lambda-alvo. Em regime estacionário, o desvio deve ser inferior a $\pm 3\%$. Desvios maiores indicam que a tabela VE precisa de ajuste naquela região. Se o desvio é consistentemente positivo (medido $>$ alvo), a região está pobre e o valor VE deve ser aumentado; se negativo, a região está rica e o valor VE deve ser diminuído.

Eventos de Knock: O contador de knock deve permanecer em zero durante operação normal. Eventos esporádicos em WOT com combustível de baixa qualidade podem ser aceitáveis se o sistema de controle de knock retarda a ignição adequadamente. Eventos frequentes indicam avanço excessivo ou problemas mecânicos.

Retardo de Knock: Monitore o retardo de knock aplicado. Se o sistema está constantemente retirando avanço (ex.: mais de 3 extdegree de retardo frequente), o mapa de ignição base está agressivo demais naquela região. Reduza o avanço base e permita que o controle de knock trabalhe apenas como proteção, não como compensação permanente.

Tendências de Temperatura (CLT): A temperatura do motor deve estabilizar dentro da faixa normal (80–100 extdegreeC para a maioria dos motores). Se a temperatura está subindo progressivamente durante uso em carga, pode indicar mistura pobre, avanço excessivo ou problema no sistema de arrefecimento.

Tendências de Temperatura (IAT): Em motores turbo com intercooler, monitore a IAT para verificar a eficiência do intercooler. IAT excessiva reduz a performance e aumenta o risco de detonação.

Duty Cycle do Injetor: Em WOT e rotação máxima, o duty cycle não deve ultrapassar 85%. Valores acima disso indicam que os injetores estão no limite e podem não fornecer combustível suficiente, gerando mistura perigosamente pobre.

Estabilidade de Marcha Lenta: Em dataloggs de marcha lenta, o RPM deve apresentar variação mínima (< 50 RPM pico a pico com motor quente). Oscilações maiores indicam necessidade de ajuste no controle PID de marcha lenta ou na tabela VE na região de idle.

Enriquecimento de Aceleração: Durante transientes de aceleração, observe se o lambda tem um breve enriquecimento seguido de retorno rápido ao alvo. Um empobrecimento transitório (lambda subindo brevemente) indica AE insuficiente; um enriquecimento excessivo prolongado indica AE demais.

20.5.3 Metodologia de Análise

1. **Gravação:** Grave dataloggs em condições representativas de uso real. Inclua partida a frio, aquecimento, condução urbana, estrada e, quando seguro, acelerações em WOT.
2. **Revisão por região:** No MotroLink Manager, filtre o datalog por faixas de RPM e carga para analisar cada região da tabela separadamente.

3. **Identificação de problemas:** Procure por padrões anômalos — picos de lambda, eventos de knock, oscilações de RPM, temperaturas anormais.
4. **Ajuste iterativo:** Faça ajustes baseados nos dados, grave novos datalogs e compare. A calibração é um processo iterativo.
5. **Comparação:** O MotroLink Manager permite sobrepor múltiplos datalogs para comparar o antes e depois de uma alteração.

20.6 Pontos de Restauração

Criar backups regulares da calibração é uma prática essencial que pode poupar horas de trabalho. O MotroLink Manager permite salvar e carregar calibrações completas com facilidade.

20.6.1 Quando Criar um Backup

Crie um ponto de restauração (backup da calibração) nos seguintes momentos:

- **Antes de atualizar o firmware da ECU** — Atualizações de firmware podem alterar a estrutura de parâmetros. Ter um backup garante que você pode reverter caso algo não funcione como esperado.
- **Antes de alterações significativas na calibração** — Se você vai mudar a estratégia de enriquecimento de aceleração, o controle de marcha lenta, ou qualquer parâmetro que afeta amplas regiões de operação, salve o estado atual antes.
- **Antes de uma sessão em dinamômetro** — Sessões de dinamômetro envolvem muitas alterações rápidas. Ter o estado pré-dinamômetro salvo permite reverter caso algo saia errado.
- **Após concluir uma etapa importante** — Ao finalizar a calibração de marcha lenta, ou a tabela VE, ou a tabela de ignição, salve um backup com nome descritivo.
- **Antes de alterar hardware** — Se vai trocar injetores, bobinas, turbo ou qualquer componente que exija recalibração, salve a calibração atual.
- **Periodicamente durante sessões longas** — Em sessões de calibração que duram várias horas, salve backups intermediários a cada hora ou a cada mudança significativa.

20.6.2 Boas Práticas de Nomeação

Utilize nomes descritivos para os arquivos de backup. Um bom formato inclui:

- Data (AAAA-MM-DD).
- Nome do veículo ou motor.
- Descrição do estado (ex.: “idle_ok”, “VE_completa”, “pre_dyno”).
- Exemplo: 2026-03-06_Civic_VE_completa_pre_ignicao.mlk

! Armazenamento externo

Não mantenha os backups apenas no computador utilizado na calibração. Copie para um pendrive, HD externo ou serviço de armazenamento em nuvem. Falhas de disco ou formatações acidentais podem eliminar horas ou dias de trabalho.

20.7 Valores Típicos por Tipo de Motor

A tabela a seguir apresenta valores de referência típicos para diferentes configurações de motor. Esses valores servem como **ponto de partida** e devem ser ajustados durante a calibração para cada motor específico.

⚠ Valores de referência apenas

Os valores apresentados nesta tabela são aproximações baseadas em médias de aplicações reais. Cada motor é único — diferenças de compressão, came, escapamento, tipo de cabeçote, altitude e outros fatores exigem ajustes específicos. Nunca utilize esses valores como calibração final sem validação no motor real.

Parâmetro	4-cil. Aspirado (Gasolina)	4-cil. Turbo (Gasolina)	4-cil. Turbo (E85)	V8 Aspirado (Gasolina)
Faixa VE típica (%)	25 – 95	25 – 120+	25 – 130+	25 – 100
Avanço marcha lenta (extdegreeBTDC)	12 – 18	10 – 16	10 – 16	12 – 20
Avanço máx. carga parcial (extdegreeBTDC)	28 – 38	22 – 32	24 – 34	30 – 40
Avanço WOT alta rotação (extdegreeBTDC)	28 – 36	16 – 24	18 – 28	30 – 38
RPM marcha lenta	750 – 900	800 – 950	800 – 950	600 – 800
Lambda alvo marcha lenta	1,00	1,00	1,00	1,00
Lambda alvo WOT	0,85 – 0,90	0,78 – 0,85	0,82 – 0,88	0,85 – 0,90
Enriq. cranking a 20 extdegreeC (ms)	8 – 14	10 – 16	14 – 22	10 – 16
Enriq. cranking a 0 extdegreeC (ms)	14 – 22	16 – 24	20 – 30	16 – 24
Enriq. cranking a –10 extdegreeC (ms)	20 – 30	22 – 32	28 – 40	22 – 32
Enriq. pós-partida (%)	15 – 30	15 – 30	20 – 40	15 – 30
Warm-up enrich. a 20 extdegreeC (%)	10 – 20	10 – 20	12 – 25	10 – 20
Warm-up enrich. a 0 extdegreeC (%)	25 – 40	25 – 40	30 – 50	25 – 40

Continua na próxima página...

Parâmetro	4-cil. Aspirado (Gasolina)	4-cil. Turbo (Gasolina)	4-cil. Turbo (E85)	V8 Aspirado (Gasolina)
Pressão de combustível (kPa)	300 (3 bar)	300 (3 bar)	300 – 400	300 (3 bar)
RPM limitador sugerido	6500 – 8000	6000 – 7500	6000 – 7500	5500 – 7000
DFCO ativação (RPM)	1800 – 2200	1800 – 2200	1800 – 2200	1500 – 2000
DFCO desativação (RPM)	1400 – 1700	1400 – 1700	1400 – 1700	1200 – 1500
Relação estequiométrica	14,7:1	14,7:1	9,8:1	14,7:1
Dwell típico (ms) a 14 V	2,5 – 3,5	2,5 – 3,5	2,5 – 3,5	2,5 – 4,0

i E85 e flex fuel

Motores operando com E85 requerem aproximadamente 40% mais combustível que gasolina para atingir a mesma relação lambda. Isso se reflete em valores VE aparentemente mais altos e tempos de injeção significativamente maiores. Se os injetores não tiverem vazão suficiente, o duty cycle atingirá 100% antes da rotação máxima, limitando a potência.

i Altitude

Os valores de VE e avanço podem variar significativamente com a altitude. Em locais acima de 900 metros, o motor aspirado naturalmente perderá potência proporcional à redução da pressão atmosférica. Motores turbo podem compensar parcialmente com maior pressão de boost, mas o turbo operará mais próximo do seu limite.

Apêndice A — Glossário de Calibração

Este glossário reúne os principais termos técnicos utilizados neste manual e na área de calibração de ECUs automotivas. Os termos estão organizados em ordem alfabética.

AE — Acceleration Enrichment

Enriquecimento de aceleração. Adição temporária de combustível durante transientes de aceleração (abertura rápida da borboleta) para compensar o atraso na evaporação do combustível nas paredes do coletor de admissão e manter a mistura adequada.

AFR — Air-Fuel Ratio

Relação ar-combustível. Proporção em massa entre o ar e o combustível na mistura admitida pelo motor. Para gasolina, a relação estequiométrica é de 14,7:1. Pode ser expressa como valor absoluto (ex.: 12,5:1) ou como lambda.

ALS — Anti-Lag System

Sistema anti-lag. Estratégia utilizada em motores turboalimentados para manter a pressão do turbo elevada durante momentos de borboleta fechada (como trocas de marcha), geralmente injetando combustível e atrasando a ignição para manter gases quentes fluindo pela turbina.

Alpha-N

Estratégia de controle de combustível que utiliza a posição da borboleta (TPS) e a rotação do motor (RPM) como eixos principais da tabela de combustível, em vez da pressão do coletor (MAP). Comum em motores com perfis de came agressivos onde o sinal de MAP é instável em baixas rotações.

ATDC — After Top Dead Center

Após o Ponto Morto Superior. Referência angular do virabrequim indicando posição após o pistão atingir o ponto mais alto do seu curso. Usado para descrever eventos como o início da combustão ou a abertura de válvulas.

BTDC — Before Top Dead Center

Antes do Ponto Morto Superior. Referência angular do virabrequim indicando posição antes do pistão atingir o ponto mais alto. O avanço de ignição é tipicamente expresso em graus BTDC (ex.: 15 extdegree BTDC significa que a centelha ocorre 15 extdegree antes do PMS).

CAN — Controller Area Network

Protocolo de comunicação serial amplamente utilizado na indústria automotiva para interconectar módulos eletrônicos do veículo. Permite que a ECU comunique-se com outros dispositivos como painéis digitais, módulos de transmissão e sensores inteligentes.

CLT — Coolant Temperature

Temperatura do líquido de arrefecimento do motor. Sensor fundamental para correções de combustível e ignição em função da temperatura do motor. Utilizado para enriquecimento a frio, controle de ventoinhas e proteção contra superaquecimento.

Cranking

Fase de partida. Período em que o motor está sendo girado pelo motor de arranque, mas ainda não alcançou rotação sustentada. Durante o cranking, a ECU utiliza mapas específicos de enriquecimento e temporização para facilitar a partida.

Dead Time

Tempo morto do injetor. Intervalo de tempo entre o sinal elétrico de abertura do injetor e o início efetivo do fluxo de combustível. Depende da tensão de alimentação e das características mecânicas do injetor. Deve ser compensado pela ECU para garantir dosagem precisa de combustível.

DFCO — Deceleration Fuel Cut-Off

Corte de combustível em desaceleração. Estratégia que interrompe a injeção de combustível quando o motorista solta o acelerador e o motor está acima de uma rotação mínima. Reduz o consumo de combustível e as emissões durante frenagens e descidas.

Duty Cycle

Ciclo de trabalho. Proporção de tempo em que um atuador permanece acionado em relação ao período total do ciclo. Expresso em porcentagem. Para injetores, indica a fração do tempo disponível em que o injetor permanece aberto. Um duty cycle acima de 85% indica que o injetor está próximo do seu limite de vazão.

Dwell

Tempo de carga da bobina de ignição. Período em que a corrente elétrica flui pela bobina, carregando-a com energia magnética antes da centelha. Um dwell insuficiente resulta em centelha fraca; um dwell excessivo pode superaquecer e danificar a bobina.

ECU — Electronic Control Unit

Unidade de controle eletrônico. Módulo eletrônico responsável pelo gerenciamento do motor, controlando injeção de combustível, ignição, marcha lenta e diversas outras funções. No contexto deste manual, refere-se à ECU MotroLink .

EGT — Exhaust Gas Temperature

Temperatura dos gases de escapamento. Medida por termopares instalados nos coletores de escapamento. Útil para monitorar a saúde de cada cilindro individualmente — diferenças significativas entre cilindros podem indicar problemas de mistura, injetor defeituoso ou vazamento.

ETB — Electronic Throttle Body

Corpo de borboleta eletrônico (*drive-by-wire*). Borboleta controlada eletronicamente pela ECU em vez de mecanicamente pelo cabo do acelerador. Permite controle preciso de marcha lenta, controle de tração e outras funções avançadas.

Feed-Forward

Controle *feed-forward* (pré-alimentação). Estratégia de controle que antecipa a ação necessária com base na entrada, em vez de reagir ao erro como um controlador PID puro. Na calibração, refere-se a termos de controle que atuam proativamente, como a posição base do IAC em função da temperatura.

HPFP — High Pressure Fuel Pump

Bomba de combustível de alta pressão. Utilizada em sistemas de injeção direta para pressurizar o combustível a valores entre 30 e 200+ bar. O controle da HPFP pela ECU é essencial para manter a pressão-alvo em todas as condições de operação.

IAC — Idle Air Control

Controle de ar de marcha lenta. Atuador (válvula de passo, solenóide ou motor DC) que regula a quantidade de ar que contorna a borboleta, permitindo à ECU controlar a rotação de marcha lenta. A ECU ajusta o IAC para manter o RPM-alvo de marcha lenta.

IAT — Intake Air Temperature

Temperatura do ar de admissão. Sensor utilizado para correção de densidade do ar admitido. Ar mais quente é menos denso, exigindo menor quantidade de combustível para manter a relação ar-combustível correta.

Knock

Detonação. Combustão anormal em que a mistura ar-combustível se auto-inflama antes ou depois da frente de chama normal, gerando ondas de pressão que podem causar danos severos ao motor. Detectada por sensores piezoelétricos (knock sensors) montados no bloco do motor.

Lambda

Relação lambda (λ). Forma normalizada de expressar a relação ar-combustível. Lambda 1,0 representa a mistura estequiométrica. Lambda $> 1,0$ indica mistura pobre (excesso de ar); lambda $< 1,0$ indica mistura rica (excesso de combustível). Lambda é independente do tipo de combustível, ao contrário do AFR.

LTFT — Long Term Fuel Trim

Correção de combustível de longo prazo. Ajuste aprendido pela ECU ao longo do tempo para compensar desvios persistentes na mistura ar-combustível. Valores altos de LTFT indicam que a tabela VE base precisa de ajuste.

MAP — Manifold Absolute Pressure

Pressão absoluta do coletor de admissão. Sensor que mede a pressão no coletor de admissão em valores absolutos (kPa). É o sensor primário na estratégia Speed Density para estimar a massa de ar admitida pelo motor.

MAF — Mass Air Flow

Fluxo de massa de ar. Sensor que mede diretamente a massa de ar que entra no motor (em g/s). Alternativa ao MAP na estimativa de carga do motor. Não é utilizado na estratégia Speed Density, mas pode ser empregado como sensor auxiliar.

MBT — Maximum Brake Torque

Máximo torque de frenagem. Ponto de avanço de ignição que produz o máximo torque para uma dada condição de operação. Avançar a ignição além do MBT não produz ganho de torque e aumenta o risco de detonação.

PID — Proportional-Integral-Derivative

Controlador proporcional-integral-derivativo. Algoritmo de controle em malha fechada utilizado em diversas funções da ECU, como controle de marcha lenta, con-

trole de boost e controle de lambda. Os ganhos P, I e D determinam a resposta do controlador a erros.

Priming

Injeção de *priming* (preparação). Pulso de combustível enviado aos injetores quando a ignição é ligada (antes do arranque) para umedecer as paredes do coletor de admissão e facilitar a partida. A quantidade varia conforme a temperatura do motor.

RPM — Revolutions Per Minute

Rotações por minuto. Unidade de medida da velocidade de rotação do motor. Determinada pela ECU a partir do sinal do sensor de rotação (trigger) montado na roda fônica.

Speed Density

Estratégia de cálculo de combustível que utiliza a velocidade do motor (RPM) e a densidade do ar (estimada via MAP e IAT) para determinar a massa de ar admitida por ciclo. É a estratégia primária utilizada pela ECU MotroLink .

STFT — Short Term Fuel Trim

Correção de combustível de curto prazo. Ajuste instantâneo feito pela ECU em malha fechada com base na leitura da sonda lambda. Oscilações rápidas são normais; desvios persistentes grandes indicam erro na tabela VE.

Stoichiometric

Estequiométrico. Proporção exata de ar e combustível na qual toda a mistura é completamente consumida na combustão, sem excesso de ar ou combustível. Para gasolina, é 14,7:1 (AFR) ou lambda 1,0. Para E85, é aproximadamente 9,8:1.

TPS — Throttle Position Sensor

Sensor de posição da borboleta. Potenciômetro ou sensor sem contato que indica a abertura da borboleta de aceleração em porcentagem (0% = fechada, 100% = totalmente aberta). Essencial para enriquecimento de aceleração, detecção de WOT e estratégia Alpha-N.

VE — Volumetric Efficiency

Eficiência volumétrica. Razão entre a massa de ar efetivamente admitida pelo cilindro e a massa teórica que caberia no cilindro à pressão atmosférica. A tabela VE é o elemento central da calibração de combustível na estratégia Speed Density.

VR — Variable Reluctance

Relutância variável. Tipo de sensor de rotação que gera um sinal de tensão alternada (AC) proporcional à velocidade de passagem dos dentes da roda fônica. Não requer alimentação externa, mas a amplitude do sinal varia com o RPM.

VSS — Vehicle Speed Sensor

Sensor de velocidade do veículo. Fornece à ECU a informação de velocidade do veículo (km/h), utilizada em funções como controle de velocidade de cruzeiro, DFCO baseado em velocidade e limitador de velocidade.

VVL — Variable Valve Lift

Levantamento variável de válvulas. Sistema mecânico que altera a altura de abertura das válvulas de admissão e/ou escapamento em função das condições de operação. A ECU pode controlar a transição entre perfis de came (ex.: VTEC da Honda).

VVT — Variable Valve Timing

Comando variável de válvulas. Sistema que ajusta continuamente a fase (timing) das válvulas de admissão e/ou escapamento. Controlado pela ECU via solenóides de óleo que atuam em atuadores no eixo de comando. Melhora a eficiência volumétrica, a economia e as emissões.

Wasted Spark

Centelha desperdiçada. Estratégia de ignição em que cada bobina dispara duas vezes por ciclo do motor — uma vez no cilindro em compressão (centelha útil) e uma vez no cilindro companheiro em escapamento (centelha desperdiçada). Simplifica a fiação e não requer sensor de fase (came).

WOT — Wide Open Throttle

Borboleta totalmente aberta. Condição de aceleração máxima. Em WOT, a ECU tipicamente enriquece a mistura (λ 0,80–0,90) para maximizar a potência e proteger o motor contra temperaturas excessivas de combustão.

Apêndice B — Revisões do Manual

A tabela a seguir registra o histórico de revisões deste manual de calibração.

Versão	Data	Descrição
1.0	Março 2026	Versão inicial do manual.