

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

**Desenvolvimento do Modelo do Motor a Combustão
Interna Honda GX35 Visando um Sistema de
Aceleração Eletrônica**

Mariana Gonzaga Ribeiro

Orientador: Prof. Fabrício José Pacheco Pujatti, Dr.
Supervisor: Prof. Víctor Costa da Silva Campos, Dr.

Belo Horizonte, Julho de 2020

Monografia

Desenvolvimento do Modelo do Motor a Combustão Interna Honda GX35 Visando um Sistema de Aceleração Eletrônica

Monografia submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado Didático do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para aprovação na disciplina Projeto Final de Curso II.

Belo Horizonte, Julho de 2020

Resumo

Neste trabalho serão apresentados os resultados das simulações teóricas representando do uso de um controlador preditivo eficiente, MPC, no protótipo de combustão da equipe Milhagem UFMG. Um estudo foi feito para entender o comportamento da dinâmica veicular deste protótipo em situações de competição, para o qual o *software GT-Power* foi utilizado para modelar o gasto energético e torque do motor Honda GX-35, utilizado na propulsão do protótipo. Com o sistema modelado e linearizado em torno de um ponto de operação foi possível a construção desse controlador. Para fins de discussão, um modelo da pista de corrida *Sonoma Raceway*, utilizada na competição *Shell Eco Marathon*, foi utilizado nas simulações e algumas tentativas teóricas foram feitas visando um gasto energético otimizado em diferentes estratégias de pista.

Abstract

In this work will be presented the result of a theoretical simulation representing the use of an efficient predictive controller, MPC, in the combustion prototype of the Milhagem UFMG team. A study was done to understand the behavior of the vehicle dynamics of this prototype in competition situations, for which the GT-Power software was used to model the energy expenditure and torque of the Honda GX-35 engine, used in the propulsion of the prototype. With the system modeled and linearized around an operating point, it was possible to build this controller. For discussion purposes, a model of the Sonoma Raceway race track, used in the Shell Eco-Marathon competition, was used in the simulations and some theoretical attempts were made aiming at optimized energy expenditure in different track strategies.

Agradecimentos

Agradeço a todos que me apoiaram nessa jornada de graduação, amigos, colegas, professores e familiares, que acompanharam de alguma forma meus desafios e dúvidas vividos nesses 5 anos de graduação em Engenharia de Controle e Automação na UFMG.

Agradeço a Escola de Engenharia, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Centro de Tecnologia da Mobilidade pelo espaço para existência de projetos extraclasse como equipes de competição. É extremamente enriquecedor ter a oportunidade de fazer a diferença na graduação com um projeto tão impactante pessoal e academicamente.

Agradeço a equipe de competição Milhagem UFMG, não só pela inspiração de execução deste projeto, mas pela oportunidade de me desafiar constantemente. Agradeço aos membros e amigos dessa equipe maravilhosa, que me apoiaram e ajudaram durante minha trajetória na equipe e na execução desta monografia.

Agradeço ao meu orientador Fabrício Pujatti pelo apoio e ajuda, mas agradeço ainda mais por ser orientador do Milhagem UFMG, sem você a equipe não existiria. Agradeço também ao meu supervisor Víctor Costa por embarcar nessa aventura de orientar a equipe Milhagem UFMG também e por todo apoio prestado neste projeto.

Desejo muito sucesso a essa equipe. Obrigada a todos que acreditaram em mim!

Sumário

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Justificativa	1
1.2 Objetivos do Projeto	2
1.3 Local de Realização	2
1.4 Estrutura da Monografia	2
2 Descrição do Processo	3
2.1 Instrumentação do Processo	3
2.1.1 Motor Honda GX35	3
2.1.2 Sensor de Temperatura	4
2.1.3 Sensor de Posição Angular	4
2.1.4 Sensor de Fase	5
2.1.5 Sensor de Pressão	6
2.1.6 Sensor de Oxigênio dos Gases da Exaustão	6
2.1.7 Sistema de Ignição	7
2.1.8 Sistema de Injeção	7
2.1.9 Sistema de Aceleração	8
2.2 Revisão da Literatura	9
2.2.1 Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha	10
2.2.2 Injeção Eletrônica	12
3 Metodologia	15
3.1 Introdução	15
3.2 Equação dinâmica do protótipo	15
3.3 Forças de resistência do protótipo	16
3.3.1 Resistência de rolagem	16

3.3.2	Arrasto aerodinâmico	17
3.3.3	Resistência ao gradiente	18
3.4	Força de tração do protótipo	18
3.4.1	Torque do Motor Honda GX35	18
3.4.2	Aproximação do modelo de torque	20
3.4.3	Transmissão de torque no protótipo	23
3.4.4	Equação da força de tração	23
3.4.5	Esforço de tração máxima	24
3.5	Modelo dinâmico do protótipo	24
3.5.1	Função de transferência do processo real	24
3.5.2	Função de transferência da perturbação	25
3.6	Construção do controle	26
3.6.1	Modelo preditivo	27
3.6.2	Restrições	28
3.6.3	Função de custo	29
3.6.4	Lei de controle	31
4	Resultados	33
4.1	Controlador em reta infinita	34
4.2	Sonoma Raceway com inclinação	34
4.2.1	Mantendo o motor ligado	35
4.2.2	Desligando o motor em alguns pontos	36
4.3	Comparativo com controlador PI	41
4.4	Resultado das tentativas	43
5	Conclusões	45
5.1	Considerações Finais	45
5.2	Propostas de Continuidade	46
	Referências Bibliográficas	47

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de blocos da instrumentação do processo	4
2.2	Estrutura do KSD-9700[1]	5
2.3	Sinal emitido pelo sensor de posição angular[2]	5
2.4	Saída do Sensor de Efeito Hall	6
2.5	Ponte de Wheatstone	6
2.6	Vela Bosch (Adaptado de Denton[3], 2004, p.189)	7
2.7	Bico Injetor (Adaptado de Adler [4], 1993, p.665)	8
2.8	Válvula Borboleta	8
2.9	Condições de operação de um motor de combustão interna (Adaptado de Adler [4], 1993)	9
2.10	Geometria de um motor de combustão interna (Adaptado de Heywood [5], 1988, p. 9)	10
2.11	Ciclo de quatro tempos de um motor de ignição por centelha (Adaptado de Heywood[5], 1988, p.10)	11
2.12	Comparação entre o ciclo Otto teórico e real (Adaptado de Giacosa[6], 1970, p.70)	12
2.13	ECU MoTeC M84 [7])	12
2.14	Bloco de controle em malha fechada da mistura ar/combustível	13
3.1	Forças agindo no veículo	16
3.2	Deflexão do pneu em uma superfície rígida	17
3.3	Esquema de uma aproximação em uma <i>staggered grid</i> : os escalares são calculados no centróide, as quantidades dos vetores nas fronteiras (Adaptado de Gamma Technologies[8], 2016)	19
3.4	Modelo do Honda GX35 no software <i>GT Power</i>	21
3.5	Gráfico do comportamento do torque do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software <i>MatLab</i>	21
3.6	Gráfico do modelo do comportamento do torque do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software <i>MatLab</i>	22
3.7	Estrutura do MPC	27
3.8	Gráfico de consumo de combustível do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software <i>MatLab</i>	29
3.9	Gráfico do modelo comportamento de consumo de combustível do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software <i>MatLab</i>	30
4.1	Sonoma Raceway	33

4.2	Entrada e saída sem inclinação	34
4.3	Elevação ao longo de Sonoma Raceway	35
4.4	Entrada e saída na tentativa b	35
4.5	Percurso - bateria 1	36
4.6	Entrada e saída na tentativa 1.b	37
4.7	Percurso - bateria 2	38
4.8	Entrada e saída na tentativa 2.a	38
4.9	Percurso - bateria 3	39
4.10	Entrada e saída na tentativa 3.b	39
4.11	Percurso - bateria 4	40
4.12	Entrada e saída na tentativa 4.a	40
4.13	Entrada e saída de PI sem inclinação	41
4.14	Entrada e saída de PI com inclinação	42
4.15	Percurso PI - com inclinação e desligamentos	42
4.16	Entrada e saída de PI com inclinação e desligamentos	42

Lista de Tabelas

2.1	Especificações Honda GX35 [9]	4
3.1	Dimensões do motor - Medidas experimentais e retiradas do HONDA[9], 2005)	20

Capítulo 1

Introdução

O sistema estudado nesta monografia é o protótipo, CTM-M84, construído pela equipe Milhagem UFMG com um intuito de participar de competições de eficiência energética. O sistema de propulsão deste protótipo é o motor de combustão de quatro tempos da Honda, Honda GX35, e um estudo foi realizado para entender todos os componentes desta máquina térmica e seu impacto no protótipo.

As situações de competições simuladas e discutidas neste trabalho consideram uma aproximação linear do sistema em torno de um ponto de equilíbrio, a fim de conseguir utilizar estratégias de controle que consigam minimizar o gasto energético do protótipo. Foi aplicado nesta situação um Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC - do inglês, *Model Predictive Controller*), que teve como um dos seus principais atrativos a facilidade de incorporação de restrições nas entradas de controle que otimizam os resultados.

1.1 Motivação e Justificativa

A proposta "Desenvolvimento do modelo do motor a combustão interna Honda GX35 Visando um sistema de aceleração eletrônica" surgiu por uma necessidade da equipe de competição Milhagem UFMG. A equipe em questão participa da competição anual de eficiência energética *Shell Eco-Marathon* e é uma das iniciativas estudantis da Escola de Engenharia da UFMG, sediada no Centro de Tecnologia da Mobilidade no Departamento de Engenharia Mecânica. A empresa de energia Shell realiza eventos voltados para a sustentabilidade e incentiva universitários do Brasil e do mundo a competir buscando construir veículos eficientes e inovadores.

A equipe Milhagem UFMG construiu no ano de 2018 um protótipo a combustão interna para competir na categoria gasolina, o CTM-M84. O motor utilizado para propulsão do veículo é o Honda GX35, que é o objeto de estudo desta monografia. Alinhado com o objetivo da competição *Shell Eco-Marathon* o protótipo CTM-M84 precisa de um controle de injeção eletrônica eficiente energético de forma a otimizar a quantidade de combustível na câmara de combustão.

O motor Honda GX35 é comercialmente vendido para roçadeiras, logo poucos estudos foram desenvolvidos relacionados a eficiência dessa máquina. Com o objetivo de melhorar o consumo do motor na competição *Shell Eco-Marathon Brasil* esta mono-

grafia visa projetar um sistema de aceleração eletrônica eficiente. O projeto proposto segue a linha inovadora da competição da *Shell* e pode auxiliar a equipe Milhagem UFMG a atingir resultados excelentes.

1.2 Objetivos do Projeto

Tendo em vista o exposto acima, este projeto tem por objetivos:

- a) Modelar o motor a combustão interna Honda GX35;
- b) Modelar o gasto energético do motor Honda GX35;
- c) Criar um controlador que otimize o gasto energético do motor em situações de competição;
- d) Testar o uso do controlador em uma competição;

1.3 Local de Realização

O Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM) foi inaugurado em 2008 e pertence ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. O CTM é constituído por 14 laboratórios voltados para ensino, pesquisa e prestação de serviço nas áreas de tecnologia da mobilidade. Este é referência na América Latina em estudos relacionados a motor a combustão interna.

Além dos laboratórios de ensaio e de modelação numérica, o CTM sedia algumas das equipes de competição da UFMG, sendo que a autora deste trabalho participou entre 2017 e 2018 de uma dessas equipes, o Milhagem UFMG.

1.4 Estrutura da Monografia

O trabalho está dividido em cinco capítulos. Este capítulo apresentou uma introdução ao projeto a ser descrito nesta monografia e o local onde o trabalho foi realizado. O Capítulo 2 descreve os princípios básicos de um sistema *powertrain*, ou seja, desde a mecânica do motor a combustão de ignição por centelha até a central eletrônica que controla a injeção deste mesmo motor, e abrange todos os conceitos necessários para um melhor entendimento do projeto. O Capítulo 3 aborda a metodologia de desenvolvimento, seguida pela implementação do controlador visando uma aceleração eletrônica eficiente. No Capítulo 4 tem-se a discussão dos resultados obtidos com as simulações teóricas do uso do controlador. E no Capítulo 5 tem-se a conclusão da monografia e algumas sugestões e dificuldades encontradas na realização do projeto.

Capítulo 2

Descrição do Problema

Desde a concepção e construção do primeiro motor de combustão interna pelo francês Beau De Rochas, em 1862, diversos sistemas de ignição e injeção da mistura ar/combustível vem sendo desenvolvidos. Além de alterações mecânicas e geométricas dos componentes internos dos motores, os dispositivos eletrônicos possibilitam a otimização do sistema a combustão.

Para se obter motores a combustão interna com valores reduzidos de emissões de gases e econômicos no quesito combustível é necessário desenvolver um controle de mistura ar/combustível em torno da condição estequiométrica ($\lambda = 1$). Para além disso é possível reduzir o tempo de enriquecimento nas regiões onde são necessárias, ou seja, desenvolver um controle voltado para a eficiência da aceleração dado as condições de pista. Anterior aos sistemas de controle é preciso entender o sistema em que o motor está inserido, suas limitações e as variáveis a serem trabalhadas.

2.1 Instrumentação do Processo

O processo estudado nesta monografia é descrito pela figura 2.1. Nesta temos uma central eletrônica (ECU) responsável por controlar o sistema de ignição e de injeção de combustível na câmara de combustão do motor. O motor a combustão interna de ignição por centelha precisa trabalhar em faixas de operações eficientes e não prejudiciais a sua estrutura física, desta forma os sensores descritos são de suma importância para estratégias de controle satisfatórias.

A ECU em questão, MoTeC M84, além de controlar os sistemas de partida e de funcionamento do motor, adquire dados para estudos mais específicos. Para realizar o controle eficiente e em tempo real da posição angular da borboleta, seção 2.1.9, são necessárias as informações providas da central.

2.1.1 Motor Honda GX35

O objeto de estudo desta monografia é um motor de combustão interna de ignição por centelha. Este é um motor monocilíndrico de 4 tempos, com um volume deslocado de 35cc da fabricante Honda. As especificações do motor são disponibilizadas pela Honda e estão indicadas na tabela 2.1.

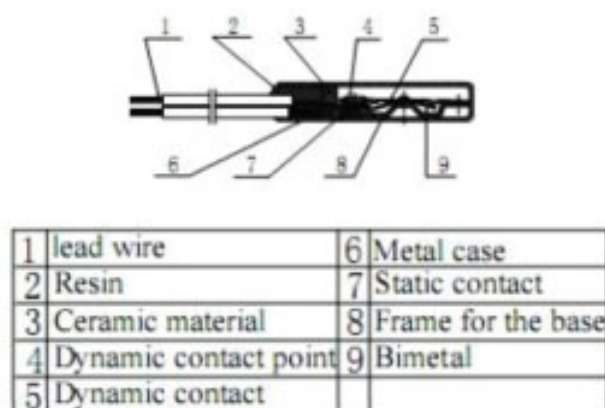


Figura 2.2: Estrutura do KSD-9700[1]

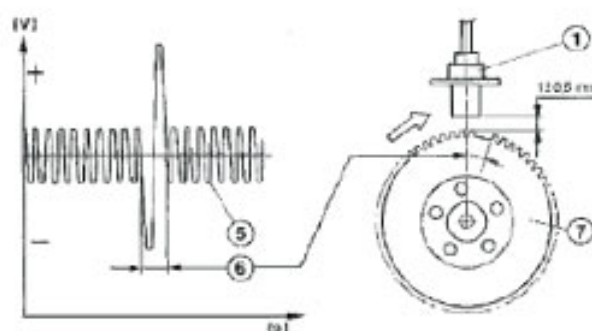


Figura 2.3: Sinal emitido pelo sensor de posição angular[2]

A partir do sincronismo dos sensores é possível acompanhar o movimento do pistão presente na câmara de combustão. O sinal é gerado pela geometria da roda fônica que está em rotação conjunta com o eixo do motor. É com base na informação de qual fase do ciclo operacional o motor se encontra que é possível controlar a injeção de combustível no cilindro e o exato momento de ignição para ocorrer uma combustão estequiométrica e satisfatória.

2.1.4 Sensor de Fase

O sensor de fase, como o próprio nome sugere, é responsável, por exibir por meio de uma onda quadrada, a fase do ciclo operacional do motor. O *Hall 3144* detecta o sinal do campo magnético do ímã colocado no comando de válvulas dentro da câmara de combustão, como demonstrado na figura 2.4. Ou seja, é possível fazer a injeção de combustível de forma eficiente sabendo exatamente as posições das válvulas da câmara de combustão e a posição do pistão com o sensor indutivo descrito na seção 2.1.3.

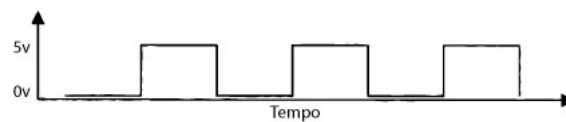


Figura 2.4: Saída do Sensor de Efeito Hall

2.1.5 Sensor de Pressão

O *MAP 16187556* tem a função de informar a pressão no coletor de admissão e/ou pressão barométrica. Essa informação é utilizada para determinar a densidade do ar no cálculo de massa de combustível injetado, além de ser importante para correção do avanço de ignição em função da carga do motor. Este sensor é formado por quatro resistores ligados em série e paralelo, que formam uma ponte de *wheatstone*, como mostrado na figura 2.5. A variação de pressão dentro da câmara de combustão gera pequenas deformações no diafragma do coletor deste sensor, e com isso desequilíbrio na ponte; tornando-a adequada para medir essas pequenas mudanças de pressão na resistência correspondente à tensão. (Carvalho[2], 2005).

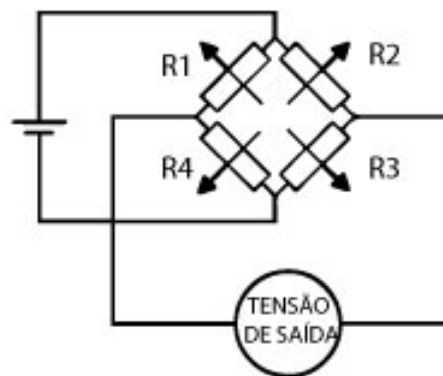


Figura 2.5: Ponte de Wheatstone

2.1.6 Sensor de Oxigênio dos Gases da Exaustão

O sensor localizado no cano de escape do motor fornece o teor de oxigênio expelido da combustão, de forma que para obter uma mistura rica os gases de exaustão terão baixa concentração de oxigênio, tendo em vista que todo ele foi queimado na câmara de combustão. Analogamente para uma mistura pobre os gases da exaustão apresentam um excesso de oxigênio; a partir desta informação, correções podem ser aplicadas para garantir que o motor esteja em uma faixa de operação estequiométrica ou em qualquer outro ponto pré estabelecido. (Denton[3], 2004).

$\lambda < 1 \rightsquigarrow$ mistura rica (deficiência de ar)

$\lambda \approx 1 \rightsquigarrow$ mistura estequiométrica

$\lambda > 1 \rightsquigarrow$ mistura pobre (excesso de ar)

O sensor *Sonda Lambda Bosch LSU 4.2* consiste basicamente em uma peça de óxido de zircônio (ZrO^2) com dois eletrodos de platina. Um lado desse conjunto é exposto aos gases da exaustão e o outro lado exposto ao ar ambiente. Como o ZrO^2 tem uma tendência em atrair os íons de oxigênio que se acumulam na superfície dos eletrodos, há uma diferença de tensão entre o eletrodo com maior contato com oxigênio e seus elétrons livres do que o eletrodo que tem contato com os gases exauridos pela combustão (Carvalho[2], 2005).

2.1.7 Sistema de Ignição

Para causar a detonação na câmara de combustão a vela de ignição fornece uma faísca elétrica provinda de um par de eletrodos, chamados de eletrodos central e de aterramento, separados por um vão, como mostrado na figura 2.6. A faísca é produzida pela aplicação de um pulso de alta tensão entre o eletrodo central e o terra. A tensão real necessária para iniciar o arco varia com o tamanho do espaço, a taxa de compressão e a relação ar-combustível. Uma vez que o arco é iniciado, a tensão necessária para sustentá-lo é muito menor, porque a mistura de gás perto da abertura fica altamente ionizada. O arco é prolongado o suficiente para inflamar a mistura ar-combustível e gerar a combustão (Ribbens[10], 1998).



Figura 2.6: Vela Bosch (Adaptado de Denton[3], 2004, p.189)

Para além da vela de ignição o sistema é composto por um módulo eletrônico e por uma bobina. Esta bobina é um autotransformador e tem a função de gerar a alta tensão para produzir o arco elétrico da vela, o acionamento desse autotransformador é gerado pelo módulo eletrônico *Spark Pro*.

2.1.8 Sistema de Injeção

A injeção de combustível na câmara de combustão é realizada por um sistema composto por uma linha de combustível, uma garrafa PET pressurizada e duas válvulas

de pressão ligadas ao bico injetor. Este injetor é constituído por uma válvula operada por bobinas, como descrito na figura 2.7. O bico deste injetor é conectado ao elemento móvel do solenóide, ou seja, possui movimentos de abrir-e-fechar para permitir-ou-bloquear o fluxo de combustível para a câmara de combustão variando com a tensão de controle que opera este injetor. Quando o sinal de trem de pulsos flui através da bobina do solenoide, o elemento móvel é comutado para cima, a abertura é exposta e o combustível pressurizado pulveriza através desta abertura; no restante do tempo o injetor é desenergizado (Ribbens[10], 1998).

1 Bico; 2 Agulha; 3 Armadura; 4 Mola; 5 Bobina; 6 Terminais elétricos;
7 Filtro de combustível

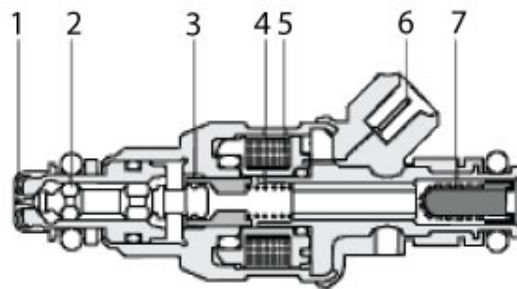


Figura 2.7: Bico Injetor (Adaptado de Adler [4], 1993, p.665)

2.1.9 Sistema de Aceleração

A aceleração de um motor de combustão é medida pela rotação e torque dessa máquina; no sistema estudado nesta monografia esses valores são controlados pelo piloto do veículo. Quando esse piloto pressiona o acelerador existe uma ligação física e mecânica deste com a válvula borboleta, demonstrada pela figura 2.8, ou seja, aumentando a amplitude do acelerador o ângulo da válvula borboleta que está conectado no coletor de admissão de ar também aumenta, logo temos uma maior entrada de ar na câmara de combustão. Um aumento da quantidade de ar exige que o controle da central eletrônica aumente a potência de rotação do motor, tendo em vista os parâmetros estequiométricos estabelecidos pela central eletrônica e medidos pelo sensor *Sonda Lambda Bosch LSU 4.2*, seção 2.1.6(Ribbens[10], 1998).



Figura 2.8: Válvula Borboleta

Determinar o ângulo da válvula borboleta significa saber a vazão mássica de ar da câmara de combustão e a partir dessa informação é possível controlar a mistura de ar com combustível nas diferentes condições de operação do motor de forma eficiente. A figura 2.9 é de suma importância para o estudo de controle dos motores, tendo em vista que as condições para esse controle variam de acordo com as condições de operações de um motor, como por exemplo na variação de temperatura, já citada na seção 2.1.2. No sistema dessa monografia será visado encontrar uma faixa de torque por rotação eficiente nas condições de cargas parciais em que temperatura e pressão não tem uma ampla variação (Pujatti[11], 2007).

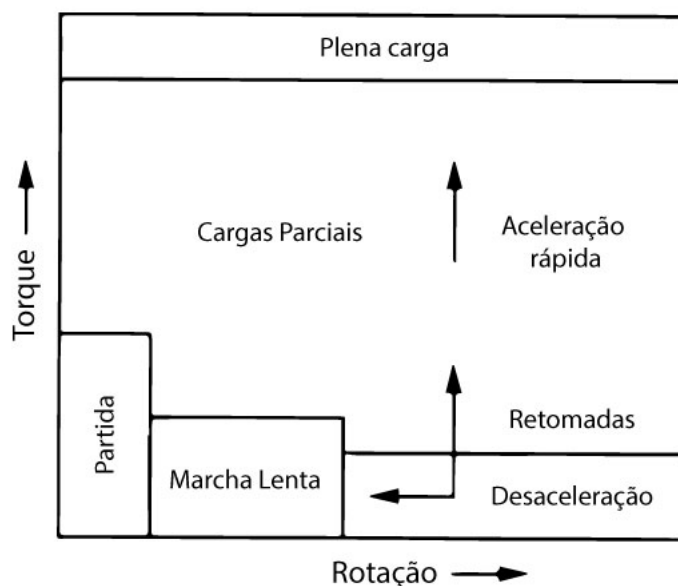


Figura 2.9: Condições de operação de um motor de combustão interna (Adaptado de Adler [4], 1993)

2.2 Revisão da Literatura

Para modelar o sistema em questão é imprescindível saber do funcionamento de processos básicos de um motor de combustão. Desde 1862 quando ocorreu a concepção do primeiro motor os processos envolvendo essa máquina evoluíram, contudo, como não é o objetivo dessa monografia fazer um estudo abrangente de motores de combustão interna foi feito um estudo específico para explicar o funcionamento do Honda GX35.

O motor de combustão interna de ignição por centelha Honda GX35 é comercialmente carburado, ou seja, não existe um sistema de controle de injeção comercial. A adição de todos os instrumentos descritos na seção 2.1 foi necessária para conseguir realizar a injeção eletrônica neste motor, requisito da competição *Shell Eco-Marathon*.

2.2.1 Motores de Combustão Interna de Ignição por Centelha

Os motores de combustão interna ou motores endotérmicos são máquinas térmicas que tem como objetivo transformar a energia calorífica da queima de combustível dentro da câmara de combustão em energia mecânica diretamente utilizável. Os motores de combustão interna de ignição por centelha podem ser alimentados por um carburador ou por injeção, neste segundo caso o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão a controle de uma central eletrônica. A categoria pertence a maior parte dos motores do automobilismo, de tração industrial, motocicletas, aeronaves e boa parte das aplicações náuticas e agrícolas (Giacosa [6], 1970, p. 4-20).

Para compreensão do funcionamento de um motor de combustão interna de ignição por centelha é importante entender a estrutura fundamental desta máquina. Após a decorrência do fenômeno químico combustão o conjunto biela-manivela transforma o movimento linear alternativo do pistão no movimento rotativo do virabrequim que gira entre os mancais principais, como demonstrado na figura 2.10. O ciclo de operação da máquina térmica pode ser descrito com 4 tempos demarcados e sincronizados que representam a relação do posicionamento do pistão com o sincronismo das válvulas de admissão e escape, com o tempo de injeção de combustível na câmara e com a centelha elétrica provinda do sistema de ignição, como descrito na figura 2.11 (Giacosa [6], 1970, p. 4-20).

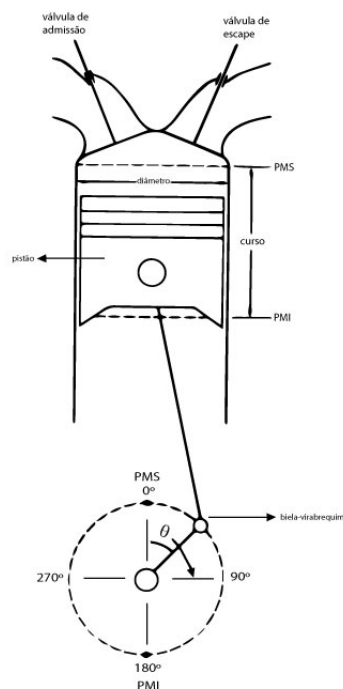


Figura 2.10: Geometria de um motor de combustão interna (Adaptado de Heywood [5], 1988, p. 9)

O primeiro tempo é a admissão, 2.11.a, representado pelo momento que o pistão se encontra em movimento descendente do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), nesta fase ocorre a abertura da válvula de admissão para a

entrada de oxigênio na câmara. Assim que o pistão atinge o PMI a válvula de admissão fecha, dando início ao segundo tempo do ciclo, 2.11.b, a compressão. Nesta etapa ocorre a injeção de combustível na mistura, com ambas as válvulas fechadas e o pistão em movimento ascendente do PMI para o PMS, desta forma o fluido presente no cilindro é comprimido.

Na terceira fase, 2.11.c, tem-se a combustão, tempo que se inicia quando a centelha elétrica produzida pela vela de ignição provoca a detonação do combustível presente. Dado o aumento de pressão no cilindro, a força exercida sobre o pistão vence as inércias e perdas mecânicas surgindo então o movimento descendente do PMS para o PMI. Na quarta e última fase, 2.11.d, a válvula de escape se abre para que os fluidos resultantes da combustão sejam expelidos quando o pistão atinge o PMI novamente. Desta forma transmite-se parte dessa força ao eixo de manivelas através da biela, completando assim um ciclo de trabalho e transformação energética (Pujatti [11], 2007, p. 21).

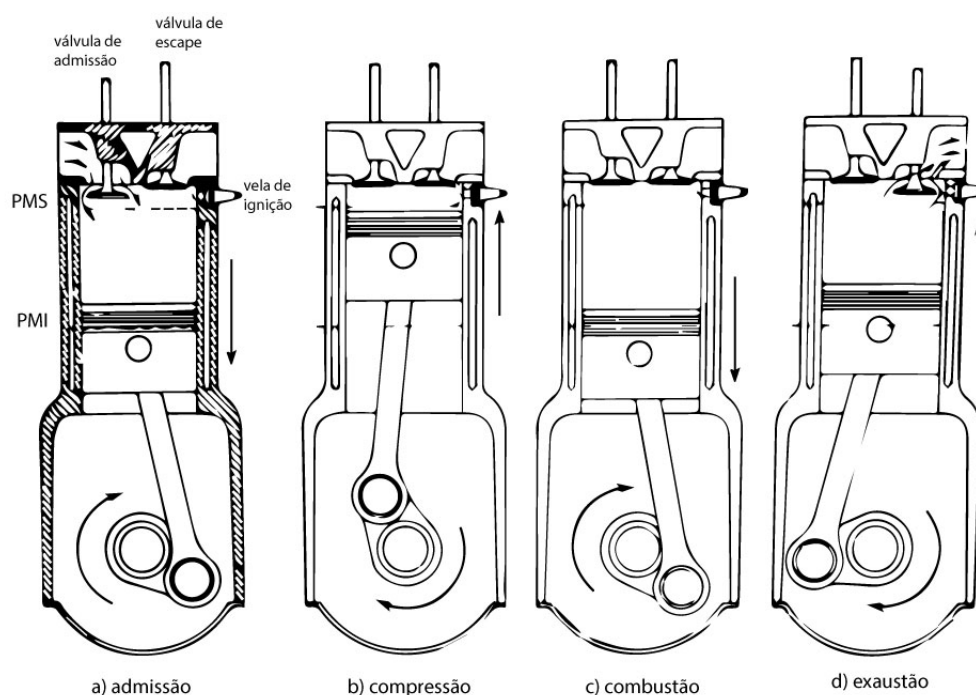


Figura 2.11: Ciclo de quatro tempos de um motor de ignição por centelha (Adaptado de Heywood[5], 1988, p.10)

Este tipo de motor está baseado nos princípios teóricos enunciados por Beau De Rochas (1862), segundo qual a combustão acontece a um volume constante entre o PMS e PMI. Na prática o ciclo de operação descrito, ciclo otto, não é ideal, tendo em vista que existem as perdas de calor do sistema e que o tempo das detonações e das aberturas de válvulas não é irrelevante. A comparação do ciclo Otto teórico e real em um motor a combustão interna é exemplificado na figura 2.12.(Giacosa [6], 1970, p. 4-65).

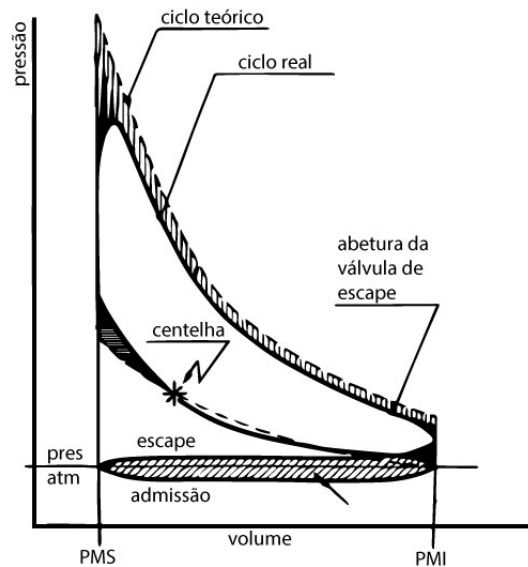


Figura 2.12: Comparação entre o ciclo Otto teórico e real (Adaptado de Giacosa[6], 1970, p.70)

2.2.2 Injeção Eletrônica

A função de uma central eletrônica (ECU) é controlar eletronicamente a quantidade de combustível introduzida no motor e o momento da centelha, tendo em vista as saídas dos sensores descritos na seção 2.1. A MoTeC M84, mostrada na figura 2.13, é a ECU utilizada no sistema descrito nesta monografia, essa unidade de controle de motor além de programável registra os dados para análises mais detalhadas do funcionamento desta máquina (MoTeC [7]).



Figura 2.13: ECU MoTeC M84 [7])

Como descrito na figura 2.14, a MoTeC fecha a malha para controle de injeção atuando diretamente na liberação de combustível na câmara de combustão a partir das informações dos gases advindos da combustão e medidos pelo sensor *Sonda Lambda Bosch LSU 4.2*. A fim de atingir a condição estequiométrica pré definida e tendo em conta um mapa base programável de operação do motor em adjunto com correções,

também programáveis, em função da massa de ar, resposta dinâmica do bico injetor e temperatura, a MoTeC é essencial para o funcionamento deste sistema.

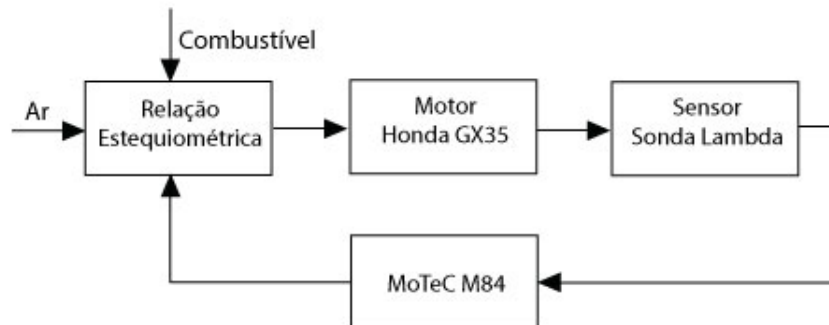


Figura 2.14: Bloco de controle em malha fechada da mistura ar/combustível

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os métodos e procedimentos adotados para realização do trabalho. As dinâmicas veiculares as quais o protótipo CTM-M84 é submetido na competição foram estudadas de forma que fosse possível realizar uma linearização do sistema em torno de um ponto de operação escolhido.

A partir da linearização do comportamento do motor em situação de pista foi possível construir um controlador a fim de otimizar o gasto energético deste.

3.2 Equação dinâmica do protótipo

A figura 3.1 mostra as forças atuantes no protótipo de acordo com Ehsani[12], 2005. A força de tração, F_t , na área de contato entre os pneus da roda e da pista impulsiona o protótipo para frente; esta força é produzida pelo torque do motor e transferido através de um sistema de transmissão para a roda traseira do protótipo. Enquanto o protótipo está em movimento existem algumas forças contrárias que tendem a parar o seu movimento, dessas forças temos a resistência de rolamento do pneu, o arrasto aerodinâmico e a resistência ao gradiente.

De acordo com a segunda lei de Newton o movimento de aceleração descrito na figura 3.1 pode ser escrito como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{tr}}{\delta M_v} . \quad (3.1)$$

em que V é a velocidade, $\sum F_t$, é o somatório de forças de tração total do veículo, $\sum F_{tr}$ é o somatório total de forças de resistência, M_v é a massa total do veículo e o δ é o fator de massa em efeito aos componentes rotativos no sistema de impulsão do protótipo, que neste caso é desprezado devido à transmissão utilizada no protótipo não possuir fatores transversais ao eixo x . A equação 3.1 indica que a velocidade e a aceleração dependem do esforço de tração, resistência e massa do veículo, desta forma será apresentado o estudo de cada uma dessas forças.

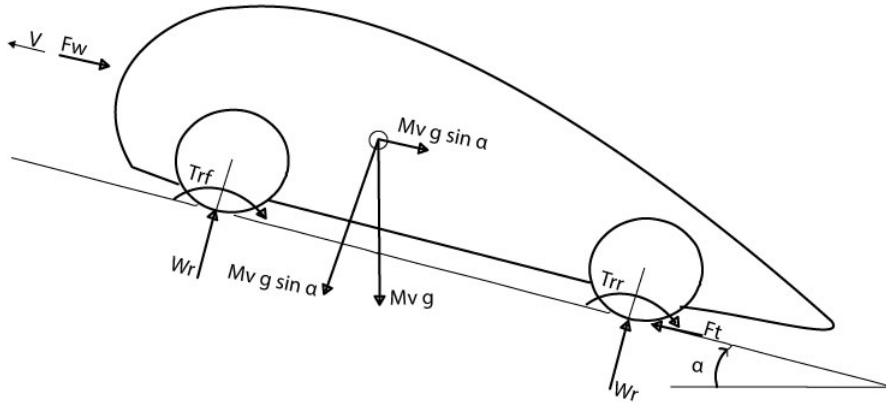


Figura 3.1: Forças agindo no veículo

3.3 Forças de resistência do protótipo

Como mostrado na figura 3.1, dentre as forças que se opõem ao movimento do protótipo se incluem a força de resistência de rolagem, que na figura 3.1 aparece como resistência de torque de rolagem T_{rf} e T_{rr} ; a força de arrasto aerodinâmico, F_w ; e a força de resistência ao gradiente (o termo $M_v \sin \alpha$ na figura 3.1). Todas essas três forças de resistência serão discutidas em detalhes nas seções seguintes (Ehsani[12], 2005).

3.3.1 Resistência de rolagem

A resistência de rolagem dos pneus na pista é causada principalmente pela histerese nos materiais do pneu devido à deflexão do material enquanto a roda está girando. Quando a superfície do pneu entra em contato com o solo acontece uma deformação, como evidenciado na figura 3.2, em que há um armazenamento de energia pelo pneu. Na saída da superfície de contato, o pneu retorna a sua forma original liberando parte dessa energia, contudo essa perda energética ainda é mensurável tendo em vistas as características físicas do pneu e das condições da superfície de contato deste sistema (Ehsani[12], 2005).

Simplificando o fenômeno descrito na figura 3.2 pode-se afirmar que a força de resistência de rolagem é:

$$F_r = P f_r \cos \alpha \quad . \quad (3.2)$$

em que α é o ângulo de inclinação da pista e o coeficiente de resistência de rolagem f_r é descrito em função do material, da temperatura, da pressão e da geometria do pneu. O pneu utilizado pela equipe Milhagem UFMG é o pneu 44-406 da *Michelin* que tem o coeficiente de resistência de rolagem, f_r , 0.002 de acordo com as especificações do produto. O P total do conjunto protótipo e piloto utilizado foi 980.665N. Ou seja,

$$F_r = 1.9613 \cos \alpha \quad . \quad (3.3)$$

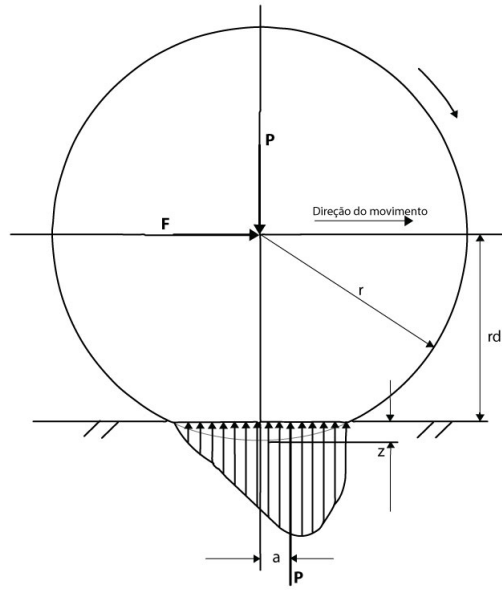


Figura 3.2: Deflexão do pneu em uma superfície rígida

É importante ressaltar que por mais que o protótipo tenha três rodas, a força total de resistência de rolagem é adimensional ao fenômeno.

3.3.2 Arrasto aerodinâmico

Um veículo viajando a uma velocidade particular no ar encontra uma força que resiste ao seu movimento, esta força é conhecida como arrasto aerodinâmico, e resulta principalmente em dois componentes: arrasto da forma e da fricção do material da superfície. Essa força pode ser expressa por: (Thiriet[13], 2018).

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_d (V + V_r)^2 . \quad (3.4)$$

em que ρ é a massa específica do ar, que varia conforme a altitude, pressão ambiente e temperatura do ar; neste caso foi considerada 1.18415. C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico que caracteriza a forma do protótipo, A_f é a área frontal do mesmo e V_r é o componente da velocidade do vento na direção do movimento do veículo. No protótipo CTM-M84 a área frontal foi desenhada no software *SolidWorks* como $0.3004m^2$ e o coeficiente de arrasto aerodinâmico encontrado em simulações realizadas no software *Star CCM* é 0.14881. Desta forma, considerando que a atmosfera está parada, temos que força de resistência de arrasto aerodinâmico é obtida a partir da função:

$$F_w = 0.0265 \Delta v_r^2 . \quad (3.5)$$

Sabendo que velocidade angular é a velocidade longitudinal sobre o raio da roda foi possível colocar essa força resistiva em função da velocidade angular do motor (assim como os outros termos da equação de movimento),

$$v_r = \frac{w_m \times r}{G} . \quad (3.6)$$

em que v_r é a velocidade angular da roda do protótipo, r é o raio da roda e G é a relação de reduções referentes a transmissão de velocidade angular do motor do protótipo para a roda. Desta forma é possível reescrever a força de resistência de arrasto aerodinâmico em função da velocidade angular do motor:

$$F_w = 4.8601 \times 10^{-6} \Delta w_m^2 . \quad (3.7)$$

3.3.3 Resistência ao gradiente

Quando um veículo sobe ou desce um declive, seu peso produz um componente, que é sempre direcionado para a direção descendente. Este componente se opõe ao movimento de subida ou ajuda o movimento de descida, essa força de classificação geralmente é chamada de resistência ao gradiente e pode ser expressa como (Ehsani[12], 2005):

$$F_g = M_v g \sin \alpha . \quad (3.8)$$

Ou seja, no caso do protótipo M84, como descrito na figura 3.1, temos que a força de resistência ao gradiente é:

$$F_g = 980.665 \sin \alpha . \quad (3.9)$$

3.4 Força de tração do protótipo

O sistema de propulsão do protótipo CTM-M84 possui menos variáveis e componentes do que o sistema de veículos de passeio convencionais, contudo ambos consistem em uma máquina geradora de torque e um sistema de transmissão para as rodas. No caso do protótipo estudado a máquina térmica em questão é o motor Honda GX35, a transmissão de energia é feita de forma linear com algumas reduções e, com isso, o esforço de tração nas rodas pode ser expresso como:

$$F_t = \frac{\tau_r}{r_d} . \quad (3.10)$$

em que τ_r é o torque da roda e r_d é o raio percebido pelo deslocamento evidenciado na figura 3.2. Nessa seção será demonstrado como foi encontrado o toque do motor que é transmitido para a roda gerando o deslocamento do protótipo.

3.4.1 Torque do Motor Honda GX35

A fim de descobrir como o motor Honda GX35 se comporta gerando o torque necessário para propulsão do protótipo foi utilizado um programa comercial de modelagem computacional de máquinas térmicas. O software utilizado foi o *GT-ISE* da empresa *Gamma Technologies*, que possui um ambiente específico para a modelagem de motores

de combustão interna denominado *GT-Power*. Nele, o modelo aplicado é baseado na dinâmica dos fluidos em uma dimensão, representando o fluxo e a transferência de calor nos dutos e componentes do motor.

Este modelo de escoamento é possível a partir da solução da equação de Navier-Stokes, a qual resolve as equações da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento, conservação da energia; calculando também as transferências de calor, as perdas por atrito e a combustão (Gamma Technologies[8], 2016).

Nele todo o sistema é discretizado em vários volumes, onde cada separação entre o escoamento é representado por um único volume de duas dimensões, e cada duto é dividido em um ou mais volumes; esses volumes estão conectados nos seus limites. As variáveis escalares (pressão, temperatura, densidade, energia interna, entalpia, concentração de espécies, etc.) são consideradas uniformes em cada volume. As variáveis vetoriais (fluxo mássico, velocidade, fluxo de fração mássica, etc.) são calculados no limite de cada volume. Este tipo de discretização, também evidenciado na figura 3.3, é referido como *staggered grid* (Gamma Technologies[8], 2016).

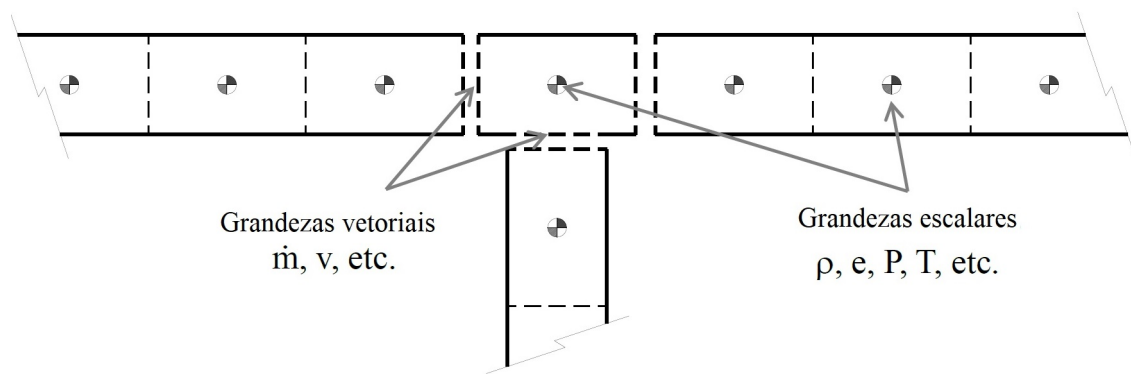


Figura 3.3: Esquema de uma aproximação em uma *staggered grid*: os escalares são calculados no centróide, as quantidades dos vetores nas fronteiras (Adaptado de Gamma Technologies[8], 2016)

Criação do modelo no *GT-Power*

A criação de um modelo no programa *GT-Power* ocorre a partir da junção de "blocos" específicos que representam os sistemas constituintes do motor, estes são interligados seguindo a lógica do escoamento do fluido. Sendo que as válvulas, pistão e cilindro são componentes presentes na própria biblioteca do *GT-Power*, portanto é necessário adicionar a estes a geometria e demais informações de funcionamento.

Os parâmetros não adquiridos experimentalmente foram definidos através de recomendações de literatura existentes ou nos manuais do *GT-Power*, disponibilizados pela *Gamma Technologies*.

A Tabela 3.1 apresenta as informações do motor colocadas para simulação do modelo. Os dados do fluxo das válvulas de admissão e escape, parâmetros de atrito, queda de pressão de entrada e temperatura dos dutos foram obtidos através de estudos realizados e disponibilizados pela equipe de eficiência energética *Chalmers Vera Team* da

Bore [mm]	39
Stroke [mm]	30
Conrod length [mm]	51.55
Compression ratio [-]	8.2
TDC Clearance Height [mm]	1.92
Intake valve diameter [mm]	15.5
Exhaust valve diameter [mm]	14
Intake port diameter/length [mm]	10/24
Exhaust port diameter/length [mm]	12.5/40
Exhaust runner diameter/length [mm]	13/325
Intake runner diameter/length [mm]	12/400
Intake valve opening [CAD]	10 BTDC
Intake valve closing [CAD]	57 ABDC
Exhaust valve opening [CAD]	48 BBDC
Exhaust valve closing [CAD]	28 ATDC
Max lift [mm]	2.754

Tabela 3.1: Dimensões do motor - Medidas experimentais e retiradas do HONDA[9], 2005)

Chalmers University of Technology, Suécia (Willermark [14], 2009).

Para fins de simulação, no bico injetor foi utilizado a octanagem de gasolina próxima da gasolina utilizada na competição, *Shell V-Power*, dado disponibilizado pelo CTM-UFMG.

Em relação ao coletor de admissão e ao cano de escape, por serem peças fabricadas pelos membros da equipe Milhagem UFMG foi necessário modelar o comportamento interno dos fluidos desses componentes. Ambas as peças foram desenvolvidas no software *SolidWorks*, logo precisaram de um tratamento estrutural geométrico e eliminação de válvulas feita no software *SpaceClaim*. Com as geometria tratadas, foi possível subdividir as peças em pequenos dutos na extensão do software *GT-ISE (GEM3D)*. Essas subdivisões quando exportadas para o *GT-Power*, geram objetos que representam os dutos do sistema real. A figura 3.4 ilustra os respectivos "blocos" e dutos criados.

3.4.2 Aproximação do modelo de torque

Com o estudo estático do funcionamento do motor Honda GX35 no software *GT Power* foi possível estimar parâmetros para um modelo dinâmico controlável. O método utilizado foi dos mínimos quadrados, desenvolvido por Gauss nas suas observações astronômicas, o qual prediz que o comportamento do torque obtido a partir de apenas três ou quatro observações do motor é estritamente correto supondo que o movimento ocorre exatamente de acordo com o gráfico dessas observações, evidenciado na figura 3.5 (Aguirre[15], 2007).

A partir da figura 3.5 é possível visualizar o comportamento de torque do motor em relação a abertura de borboleta e da velocidade angular deste. Considerando que a variação angular na borboleta interfere de forma linear na pressão média efetiva

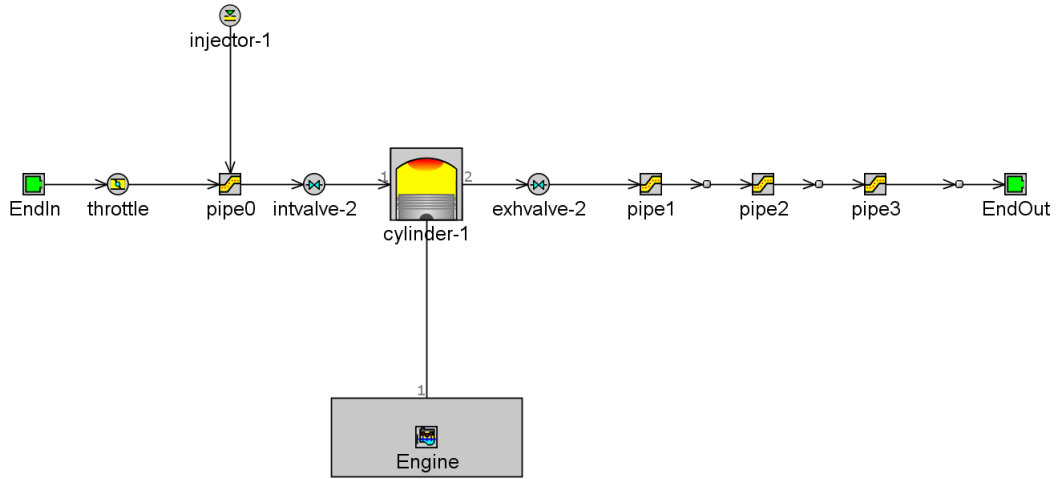


Figura 3.4: Modelo do Honda GX35 no software *GT Power*

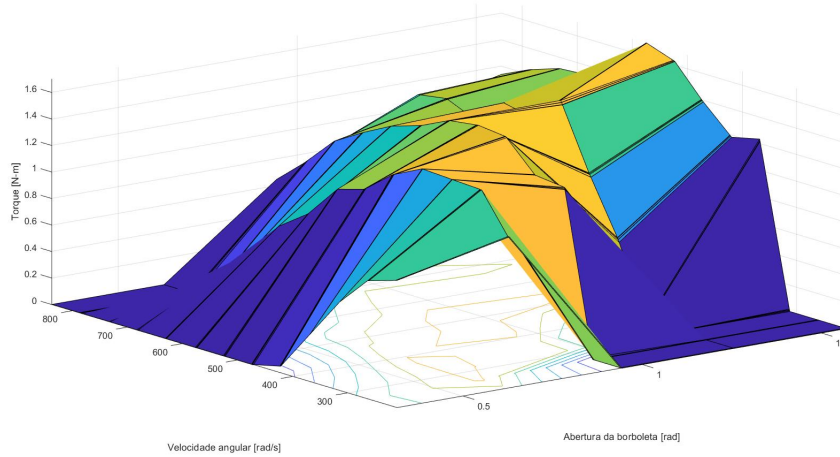


Figura 3.5: Gráfico do comportamento do torque do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software *MatLab*

dentro da câmara de combustão e que a velocidade angular do eixo do motor tem um comportamento quadrático também em relação a pressão do câmara foi possível fazer uma aproximação desse comportamento, evidenciado na figura 3.6.

A partir dos princípios do método dos mínimos quadrados é possível encontrar um estimador que funcione como um resultado natural levando em consideração as incertezas de medição presente nos dados observados. Desta forma a figura 3.6 pode ser descrita por uma família de equações, 3.11, visto que o torque pode ser descrito em função da velocidade angular, w_n , e da abertura da borboleta δ_n :

$$\tau_n = f(w_n, \delta_n) . \quad (3.11)$$

Sendo que n representa restrições para que essa família seja verdadeira. Como

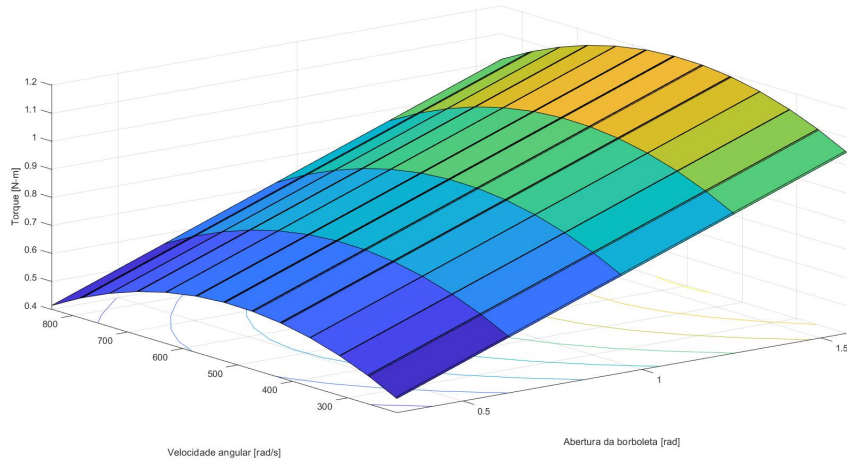


Figura 3.6: Gráfico do modelo do comportamento do torque do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software *MatLab*

essas restrições foram aproximadas e evidenciadas na figura 3.6 é possível reescrever essa função como:

$$\tau_n = a_1 w + a_2 w^2 + a_3 \delta . \quad (3.12)$$

em que $[a_1, a_2, a_3]$ passa a ser considerado o vetor de parâmetros a estimar, que pode também ser escrito da forma matricial:

$$\tau = \begin{bmatrix} w_n & w_n^2 & \delta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} . \quad (3.13)$$

$$\tau = XA .$$

Considerando que o sistema dinâmico em questão é invariante no tempo e que os sinais medidos são estacionários, sabemos que a função f e o vetor A não variam entre as n -equações descritas. Ou seja, todas as n -equações são, de fato, da mesma equação. Sabe-se então que a estimativa dos parâmetros dinâmicos do sistema usando-se mínimos quadrados é (Aguirre[15], 2007):

$$X^T \tau = X^T X A . \quad (3.14)$$

$$A = (X^T X)^{-1} X^T \tau . \quad (3.15)$$

Com o auxílio do software *MatLab* e utilizando a figura 3.6 como referência foi possível identificar o vetor de parâmetros:

$$A = \begin{bmatrix} 0.0018 \\ -1.7917 \times 10^{-6} \\ 0.4738 \end{bmatrix} .$$

Desta forma, para este trabalho, vamos considerar que o torque do motor se comporta de acordo com a função:

$$\tau_m = 0.0018w_m - 1.7917 \times 10^{-6}w_m^2 + 0.4738\delta . \quad (3.16)$$

3.4.3 Transmissão de torque no protótipo

O torque e a velocidade angular do eixo de saída do motor são transmitido para a roda através de um sistema de transmissão. Esse torque percebido pela roda pode ser expresso como (Ehsani[12], 2005):

$$\tau_r = i_g \eta_t \tau_m . \quad (3.17)$$

em que i_g é a relação de redução da transmissão definida como $i_g = \frac{W_{in}}{W_{out}}$ (W_{in} é a velocidade angular de entrada, W_{out} é a velocidade angular de saída). Na equação equação 3.17, η_t é a eficiência da linha de transmissão, considerando todas as perdas mecânicas do processo, e τ_m é o torque provindo do motor Honda GX35, valor encontrado na equação 3.16 (Ehsani[12], 2005).

A relação de redução da transmissão no protótipo CTM-M84, i_g , foi medida experimentalmente como 18.08 e dado os cálculos de perda do sistema pode-se considerar que a eficiência da linha de transmissão, η_t , é 0.81. Desta forma temos que o torque percebido pela roda é

$$\tau_r = 0.2197w_m - 2.5063 \times 10^{-4}w_m^2 - 5.6940\delta . \quad (3.18)$$

3.4.4 Equação da força de tração

A equação 3.10 relaciona o torque percebido pela roda, τ_r , com o raio percebido pelo deslocamento do movimento do protótipo. Um teste foi realizado com o protótipo CTM-M84 para descobrir o raio percebido pelo seu deslocamento. Nele foram simuladas condições de competição com a carga peso esperada, pneu específico e local com chão similar. Logo foi feita uma marcação no pneu e no chão, foram contadas dez voltas de deslocamento e por fim foi possível calcular o raio percebido através da equação de perímetro

$$P = 2\pi r_d . \quad (3.19)$$

desta forma, temos que

$$r_d = 0.241 . \quad (3.20)$$

Considerando todos os processos realizados nas seções acima a equação dinâmica que representa a força de tração do protótipo, equação 3.10, pode ser escrita como:

$$F_t = 0.1101w_m - 1.0854 \times 10^{-4}w_m^2 - 28.7011\delta . \quad (3.21)$$

3.4.5 Esforço de tração máxima

Quando o esforço de tração de um veículo excede a limitação do esforço de tração máximo devido à capacidade adesiva entre o pneu e o solo, as rodas giram no solo sem ocorrer locomoção, a capacidade adesiva entre o pneu e o solo é, por vezes, a principal limitação do desempenho do veículo. No caso do protótipo construído pela equipe Milhagem UFMG esse deslizamento é tratado como prioritário de forma que possa ser desconsiderado sabendo da significativa perda de desempenho que esse deslizamento acarretaria para a competição (Ehsani[12], 2005).

3.5 Modelo dinâmico do protótipo

Como visto na segunda lei de Newton, equação 3.22, o movimento do protótipo CTM-M84 pode ser descrito como

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{tr}}{\delta M_v} . \quad (3.22)$$

já que os estudos dessa monografia foram realizados em função da velocidade angular do motor e não da velocidade linear do protótipo é necessário realizar correções já descritas na equação 3.6, logo esta pode ser descrita como:

$$\frac{M_v \times r}{G} \frac{dw_m}{dt} = F_t - (F_r + F_w + F_g) . \quad (3.23)$$

em que, novamente, M_v foi considerado $100kg$, r é o raio da roda, G é a relação de reduções referentes a transmissão de velocidade angular do motor do protótipo para a roda, $\frac{dw}{dt}$ é a aceleração angular do motor ao longo da sua trajetória. Do outro lado da igualdade, a força de tração do protótipo, F_t , foi discutida na seção 3.4, as forças de resistência, tanto resistência de rolagem, F_r , resistência ao arrasto aerodinâmico, F_w e resistência ao gradiente, F_g , foram discutidas na seção 3.3.

$$1.3551 \frac{dw_m}{dt} = 0.1101w_m - 1.1340 \times 10^{-4}w_m^2 + 28.7011\delta - 1.9613\cos\alpha - 980.655\sin\alpha . \quad (3.24)$$

3.5.1 Função de transferência do processo real

A partir da equação dinâmica, 3.24, é possível dividir pelo princípio de superposição o sistema em duas equações linearizadas em torno do ponto de operação ideal. Este ponto foi escolhido dado a restrição da competição *Shell Eco-Marathon*, a qual prevê que a velocidade média de uma tentativa é $25Km/h$. Realizando as correções unitárias sabe-se que o protótipo deve manter a velocidade angular média de $28.34rad/s$ e considerando a relação de transmissão o motor deve manter a velocidade angular de $512.47rad/s$.

Considerando que velocidade angular e o ângulo de abertura de borboleta são respectivamente:

$$w = Y + \Delta y \quad . \quad (3.25)$$

$$\delta = X + \Delta x \quad . \quad (3.26)$$

Temos a seguinte equação:

$$1.3551(Y + \Delta y)' = 0.1101(Y + \Delta y) - 1.1340 \times 10^{-4}(Y + \Delta y)^2 + 28.7011(X + \Delta x) \quad . \quad (3.27)$$

Pela linearização usando série de Taylor e considerando que o ponto de operação da saída velocidade angular é $Y = 512.47$, tem-se que:

$$1.3551\Delta y' = \frac{\partial f}{\partial y}|_{Y,X}\Delta y + \frac{\partial f}{\partial x}|_{Y,X}\Delta x \quad . \quad (3.28)$$

$$1.3551\Delta y' \approx (0.1101 - 1.1340 \times 10^{-4} * 2 * Y)\Delta y + 28.7011\Delta x \quad . \quad (3.29)$$

$$1.3551\Delta y' \approx -0.0061\Delta y + 28.7011\Delta x \quad . \quad (3.30)$$

Aplicando LaPlace:

$$(1.3551s + 0.0061)\Delta y = 28.7011\Delta x \quad . \quad (3.31)$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{28.7011}{1.3551s + 0.0061} = \frac{4696}{221.7s + 1} \quad . \quad (3.32)$$

3.5.2 Função de transferência da perturbação

A segunda parte da divisão da equação dinâmica, 3.24, em torno do ponto de operação ideal pode ser vista como uma perturbação do modelo real. Ou seja, estamos considerando que a angulação da pista é vista no sistema como um distúrbio. Na competição *Shell Eco-Marathon* a pista é pensada e construída de forma que esse ângulo seja próximo de 0, contudo para não desprezar essa perturbação foi escolhido o valor de 0.01745° .

Considerando que velocidade angular e o ângulo de inclinação da pista são respectivamente:

$$w = Y + \Delta y \quad . \quad (3.33)$$

$$\alpha = Z + \Delta z \quad . \quad (3.34)$$

Temos que

$$1.3551(Y + \Delta y)' = 0.1101(Y + \Delta y) - 1.1340 \times 10^{-4}(Y + \Delta y)^2 - 1.9613\cos(Z + \Delta z) - 980.655\sin(Z + \Delta z) . \quad (3.35)$$

Pela linearização usando série de Taylor e considerando que o ponto de operação da saída velocidade angular é $Y = 512,47$, e que o ângulo ideal é $Z = 0.01745$ tem-se que:

$$1.3551\Delta y' = \frac{\partial f}{\partial z}|_{Y,Z}\Delta y + \frac{\partial f}{\partial z}|_{Y,Z}\Delta z . \quad (3.36)$$

$$1.3551\Delta y' \approx (0.1101 - 1.1340 \times 10^{-4} * 2 * Y)\Delta y - 1.9613\sin Z\Delta z - 980.655\cos Z\Delta z . \quad (3.37)$$

$$1.3551\Delta y' \approx -0.0061\Delta y - 980.5499\Delta z . \quad (3.38)$$

Aplicando LaPlace:

$$(1.3551s + 0.0061)\Delta y = -980.5499\Delta z . \quad (3.39)$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{-980.5499}{1.3551s + 0.0061} = \frac{-1.604 \times 10^5}{221.7s + 1} . \quad (3.40)$$

3.6 Construção do controle

Como nas competições em que o protótipo CTM-M84 participa o principal objetivo é gastar a menor quantidade de combustível respeitando o limite máximo de tempo proposto, foi escolhido fazer um controlador preditivo para atingir esses objetivos. O controle preditivo baseado em modelo (MPC) não designa uma estratégia de controle específica, mas abarca o conceito de predição e obtenção do sinal de controle através da minimização de uma determinada função objetivo e considera o erro futuro e as restrições nas variáveis de processo.

O princípio que aparece em maior ou menor grau em todos os controles preditivos é basicamente:

- Uso explícito de um modelo para prever a saída do processo em instantes futuros (horizonte);
- Cálculo de uma sequência de controles minimizando uma função de custo;
- Estratégia de retrocesso, para que a cada instante o horizonte seja deslocado em direção ao futuro, o que envolve a aplicação do primeiro sinal de controle da sequência calculado em cada etapa.

A estratégia utilizada prevê que as saídas futuras para um determinado horizonte N , chamado de horizonte de previsão, são previstos a cada instante t usando o modelo de processo. Essas saídas previstas $y(t + k|t)$ para $k = 1...N$ dependem dos valores conhecidos até o instante t (entradas e saídas passadas) e dos futuros sinais de controle $u(t + k|t)$ para $k = 0...N - 1$, que devem ser enviados ao sistema e calculados (Camacho[16], 1999).

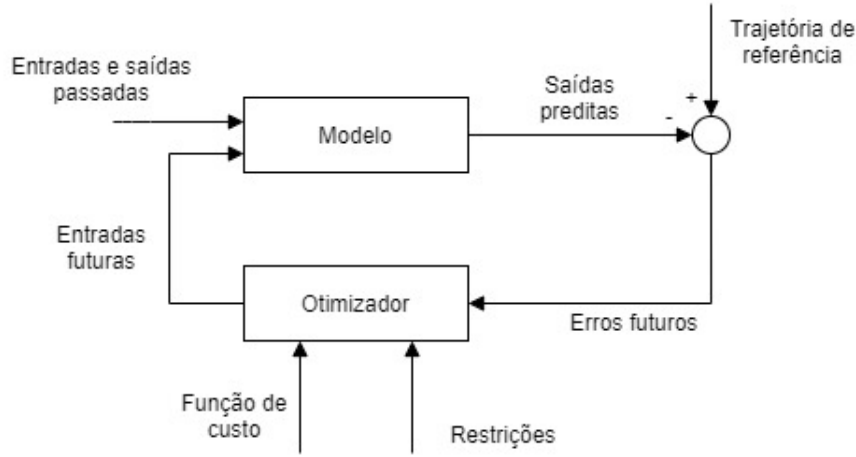


Figura 3.7: Estrutura do MPC

O sinal de controle $u(t|t)$ é enviado ao processo enquanto os outros futuros sinais de controle calculados são rejeitados, tendo em vista que no instante de amostragem seguinte o $y(t+1)$ já é conhecido, ou seja, a etapa de descobertas dos próximos sinais de controle é repetida com esse novo valor e todas as sequências são atualizadas. Assim, $u(t+1|t+1)$ é calculado e em princípio este será diferente de $u(t+1|t)$ devido às novas informações de entrada disponíveis (Camacho[16], 1999).

Para implementar esta estratégia, a estrutura básica mostrada na figura 3.7 é utilizada. Um modelo é usado para prever os resultados futuros da planta, com base nos valores atuais/passados e nas ações de controle futuro ideais propostas para aquele instante. Essas ações são calculadas pelo otimizador, levando em consideração a função de custo (onde o erro de rastreamento futuro é considerado) e as restrições.

3.6.1 Modelo preditivo

O modelo preditivo usado no sistema do CTM-M84 pode ser separado em duas partes: o modelo de processo real e o modelo de perturbação, ambas as partes são necessárias para a previsão. Ambos os modelos foram discutidos nas seções 3.5.1 e 3.5.2 respectivamente.

O sistema do modelo de processo real em tempo contínuo é:

$$G(s) = \frac{4696}{221.7s - 1} \quad (3.41)$$

E considerando que o tempo t é 0.1s, esse em tempo discreto pode ser descrito como:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b}{z-a} = \frac{2.118z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (3.42)$$

Analogamente o sistema do modelo de perturbação em tempo contínuo é

$$D(s) = \frac{-1.604 \times 10^5}{221.7s - 1} . \quad (3.43)$$

E pode ser discretizado como:

$$D(z) = \frac{Y(z)}{\alpha(z)} = \frac{d}{z-a} = \frac{-72.38z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (3.44)$$

É possível, pelo princípio da superposição, rescrever essas equações representando o modelo preditivo como:

$$y(k) = ay(k-1) + bu(k-1) + d\alpha(k-1); \quad (3.45)$$

Considerando N tempos de predição temos que a equação que representa o modelo de predição é:

$$\begin{aligned} y_p(1) &= ay(0) + bu(0) + d\alpha(0) \\ y_p(2) &= ay(1) + bu(1) = a^2y(0) + ab u(0) + ad\alpha(0) + bu(1) + d\alpha(1) \\ y_p(3) &= ay(2) + bu(2) = a^3y(0) + a^2bu(0) + a^2d\alpha(0) + ab u(1) + ad\alpha(1) + bu(2) + d\alpha(2) \\ &\dots \\ y_p(N) &= ay(N-1) + bu(N-1) = a^N y(0) + \sum_{i=0}^{N-1} a^{N-1-i} bu(i) + a^{N-1-i} d\alpha(i) \\ &\dots \end{aligned}$$

A fim de trabalhar no *MatLab* essa equação foi colocada na forma matricial:

$$Y_p = Ay(0) + BU + D\alpha; \quad (3.46)$$

3.6.2 Restrições

Na prática, todos os processos estão sujeitos a restrições. O atuador em questão no sistema do CTM-M84, descrito na seção 2.1.9, têm um campo de ação limitado e uma taxa de rotação determinada, tendo em vista que é uma válvula borboleta, limitadas pelas posições de totalmente aberto ou fechado e pela taxa de resposta.

A entrada do modelo preditivo é a variação entre o ponto de operação e a entrada naquele instante, como evidenciado na seção 3.5.1. Como foi escolhido como ponto de operação a velocidade $Y = 512.47 \text{ rad/s}$ é possível calcular que para o momento de aceleração nula, ou seja que as forças restritivas se igualem as forças de tração, a abertura da borboleta é $\delta = -0.9285 \text{ rad}$. Desta forma, por limitações físicas a variação desse movimento deve permanecer entre:

$$-0.6423 < \delta < 0.9285 .$$

3.6.3 Função de custo

Como o objetivo da competição é eficiência energética, a lei que rege esse controlador é a equação de consumo de combustível dada a velocidade angular do motor e abertura de borboleta do sistema. Sabendo que sua função de custo é quadrática, seu mínimo poderá ser obtido como uma função explícita e linear de entradas/saídas passadas e com trajetória de referência futura. Para isso foi utilizado o estudo do motor no software *GTPower*.

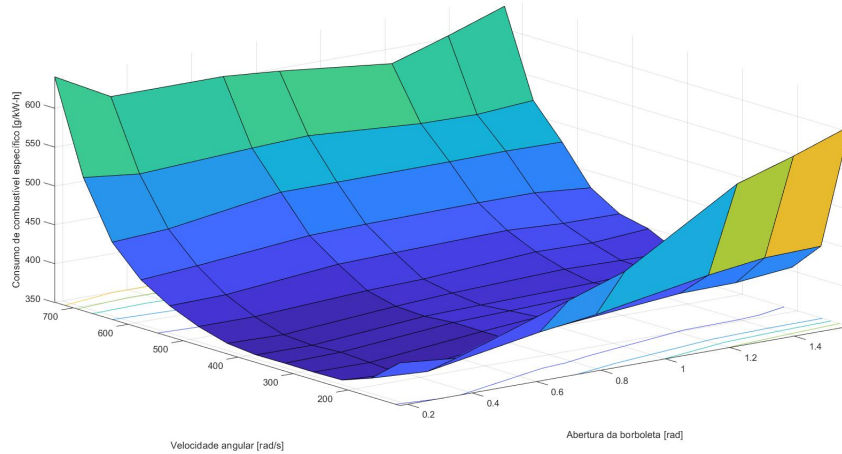


Figura 3.8: Gráfico de consumo de combustível do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software *MatLab*

A partir da figura 3.8 é possível considerar que a variação angular da borboleta interfere de forma quadrática no gasto de combustível do sistema, assim como a velocidade angular do motor. Desta forma, seguindo o método dos mínimos quadráticos, a aproximação desse comportamento contendo 5 restrições está evidenciado na figura 3.9 e pode ser descrito como:

$$\gamma_n = b_1\delta + b_2\delta^2 + b_3w + b_4w^2 + b_5 \quad . \quad (3.47)$$

em que $[b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]$ passa a ser considerado o vetor de parâmetros a estimar, que pode também ser escrito da forma matricial:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \delta & \delta^2 & w_n & w_n^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} \quad .$$

Com o auxílio do software *MatLab*, e utilizando o método dos mínimos quadrados para ajustar uma função quadrática no seu custo, como evidenciado anteriormente, e

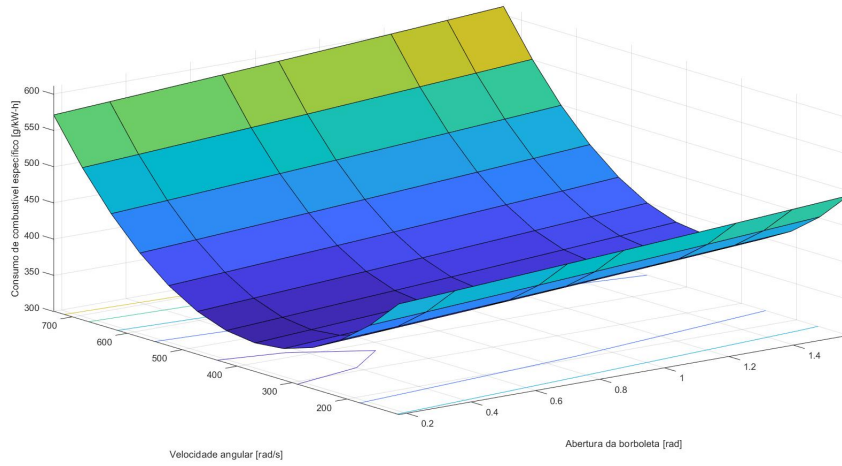


Figura 3.9: Gráfico do modelo comportamento de consumo de combustível do motor Honda GX35 dada a variação da abertura de borboleta no software *MatLab*

utilizando a figura 3.9 como referência foi possível identificar o vetor de parâmetros:

$$B = \begin{bmatrix} 25.7505 \\ 1.7440 \\ -1.2312 \\ 0.0017 \\ 558.9159 \end{bmatrix} .$$

$$\gamma = 25.7505\delta + 1.7440\delta^2 - 1.2312w_m + 0.0017w_m^2 + 558.9159 . \quad (3.48)$$

Tendo em vista o ponto de operação descrito nas seções anteriores é possível descobrir que neste ponto específico o custo é $J = 350.5638$ e a equação representando a variação da entrada e da saída com esse ponto pode ser descrita como:

$$\gamma = 22.5116\delta + 1.7440\delta^2 + 0.5055w_m + 0.0017w_m^2 + 558.9159 . \quad (3.49)$$

Desta forma, combinando o consumo com o desejo de se impor uma rotação de referência no motor, podemos escrever essa equação como:

$$J = \sum_{i=0}^N -51.6787u(i) + 19.6477u(i)^2 - 0.8765y(i) + 0.0011y(i)^2 + 530.270 - p(y(i) - r)^2 . \quad (3.50)$$

em que p é um peso variante das simulações descritas no próximo capítulo, tendo em vista a necessidade da resposta do controle se aproximar da referência, r .

3.6.4 Lei de controle

Para obter os valores $u(t+k|t)$ é necessário minimizar a função J da equação 3.50. Para isso, o valor das saídas previstas $y(t+k|t)$ é calculado em função dos valores passados de entradas/saídas e de futuros sinais de controle, utilizando o modelo escolhido e substituindo na função de custo, obtendo uma expressão cuja minimização leva aos valores procurados.

Usando a definição matricial na função de custo temos que

$$J = -51.6787U + 19.6477UU' - 0.8765Y_p + 0.0011Y_pY_p' + 530.270 + 2 \times p(Y_p - r)^2 . \quad (3.51)$$

Desprezando os termos que não dependem da ação de controle tendo em vista que não afetam o ponto que o custo é mínimo, e substituindo o termo Y_p pela sua equação, 3.46, a equação de custo pode ser descrita como:

$$J = -51.6787U + 19.6477UU' - 0.8765BU + 2 \times 0.0011BUy(0)^2 + 0.0011BB'UU' + 2 \times pBUy(0) - pBB'UU' . \quad (3.52)$$

Para otimizar esta função de custo no *MatLab* foi utilizado a função *quadprog* do *Optimization Toolbox*, a qual resolve funções objetivas quadráticas com restrições lineares, resultando em um tempo de solução satisfatório. A função encontra um mínimo para o problema especificado por:

$$\min_U \frac{1}{2}U^T H U + f^T U, \text{ sendo } \begin{cases} A \cdot U \leq b, \\ Aeq \cdot U = beq, \end{cases}$$

Desta forma, no sistema do protótipo CTM-M84 temos as seguintes funções no *MatLab*:

$$\begin{aligned} H &= 2 \times 19.6477 + 2 \times 0.0011B^2 + 2pB^2 \\ f &= -51.6787 - 0.8765 + 2 \times 0.0011y(0)BA + 2py(0)BA + 2prB \\ Aeq &= \begin{bmatrix} B \\ -B \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ beq &= \begin{bmatrix} y_u - A * y(0) \\ -y_l + A * y(0) \\ u_u \\ u_l \end{bmatrix} \end{aligned}$$

A partir dessa descrição, foram realizadas diversas simulações no *MatLab* que serão discutidas na próxima seção.

Capítulo 4

Resultados

Os resultados desse controlador foram simulados no *MatLab* por impossibilidades externas de testar no protótipo CTM-M84 real. Para que as simulações dos testes fossem mais próximas da realidade, foram utilizados os dados da pista *Sonoma Raceway* disponibilizados pela equipe americana *Duke Electric Vehicles*, a qual utilizou um sistema de telemetria para conseguir o mapa da pista em questão.

A fim de deixar as simulações mais realistas os dados disponibilizados pela *Duke Electric Vehicles* foram tratados na *Automated Driving Toolbox* do *MatLab*, a qual fornece ferramentas para projetar, simular e testar sistemas automobilísticos, gerando assim imagens de estudo como a figura 4.1.

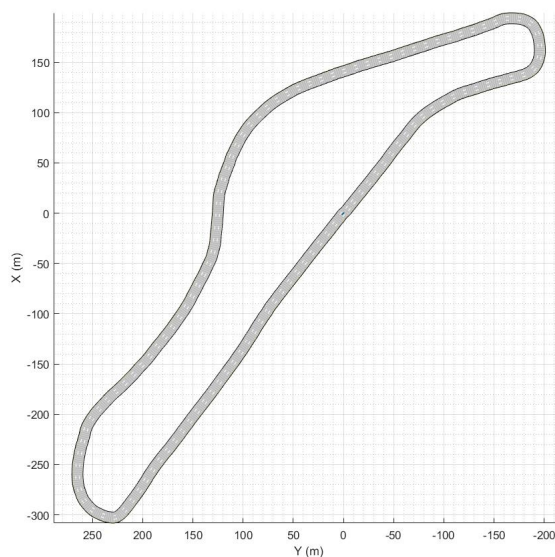


Figura 4.1: Sonoma Raceway

Nas próximas sessões serão discutidas tentativas realizadas de forma a representar a *Shell Eco Marathon*. Na competição as regras são: cada protótipo deve respeitar o tempo máximo de 28 min por tentativa, uma média de 7 voltas na pista, visando atingir o menor gasto energético possível, representado pelo custo médio em $g/KW - h$.

4.1 Controlador em reta infinita

O primeiro teste de controlador foi feito de forma a não considerar a inclinação da pista, ou seja, essa tentativa foi feita considerando que a pista *Sonoma Raceway* é uma reta infinita de inclinação 0° .

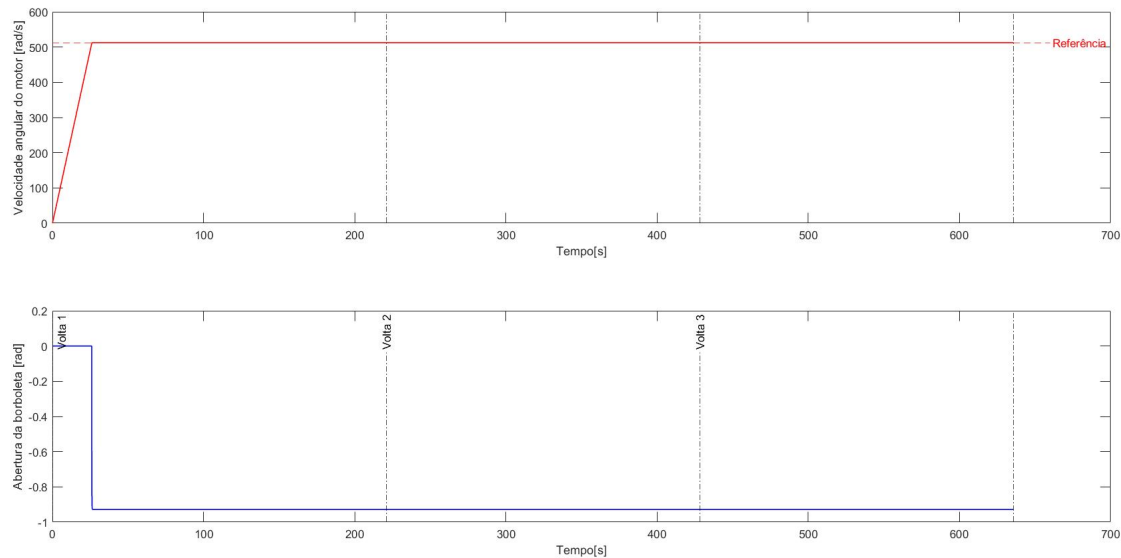


Figura 4.2: Entrada e saída sem inclinação

Tentativa	Sem inclinação
Referência [rad/s]	512.47
Consumo médio [g/kW.h]	398.00
Tempo [min]	24.38

Na figura 4.2, é possível observar que o protótipo atinge a velocidade de referência sem grandes dificuldades e fica estável durante toda a tentativa, respeitando o limite temporal imposto pela competição *Shell Eco Marathon* com o custo médio de $398.00g/kW.h$.

4.2 Sonoma Raceway com inclinação

Considerando a inclinação da pista *Sonoma Raceway*, informação também disponibilizada pela equipe *Duke Electric Vehicles*, foi possível entender a variação de angulação em todo o percurso utilizando o método de interpolação no *Matlab*, representado pela figura 4.3 .

Importante ressaltar que a informação de inclinação da pista é recebido como uma perturbação do nosso sistema,

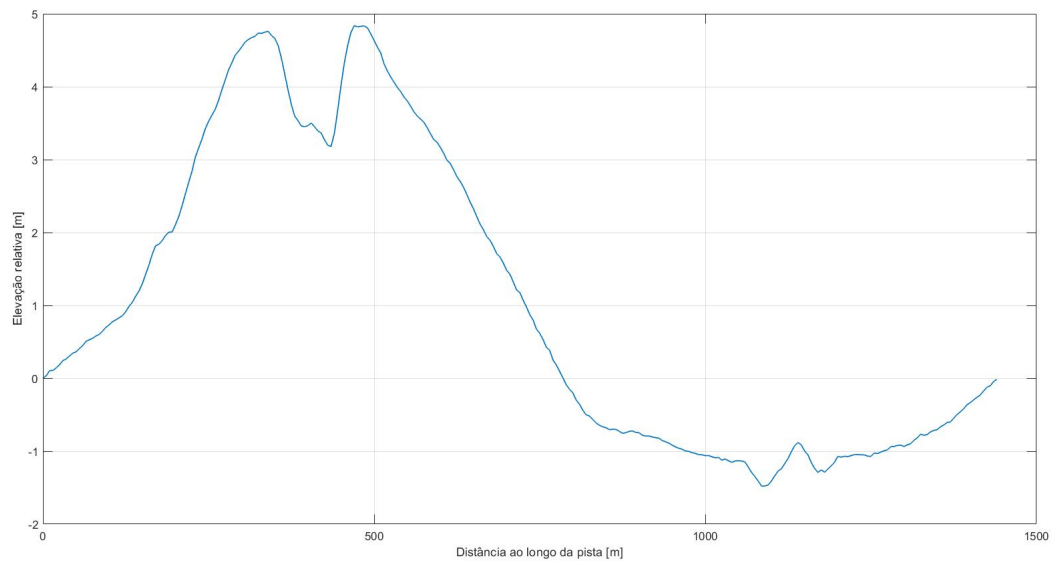


Figura 4.3: Elevação ao longo de Sonoma Raceway

4.2.1 Mantendo o motor ligado

Essa tática envolve deixar o motor ligado por todo o percurso em um ponto de consumo ótimo escolhido a partir do gráfico 3.8. Foram feitos 4 tentativas com as seguintes velocidades de referência: 437.32, 458.57, 503.76 e 512.47. A figura 4.4 mostra o comportamento da abertura da borboleta e da velocidade angular do motor em função do tempo das voltas. Importante ressaltar que esse gráfico evidencia as 3 primeiras voltas, e o cálculo de tempo e custo médio são feitos com os dados de 7 voltas.

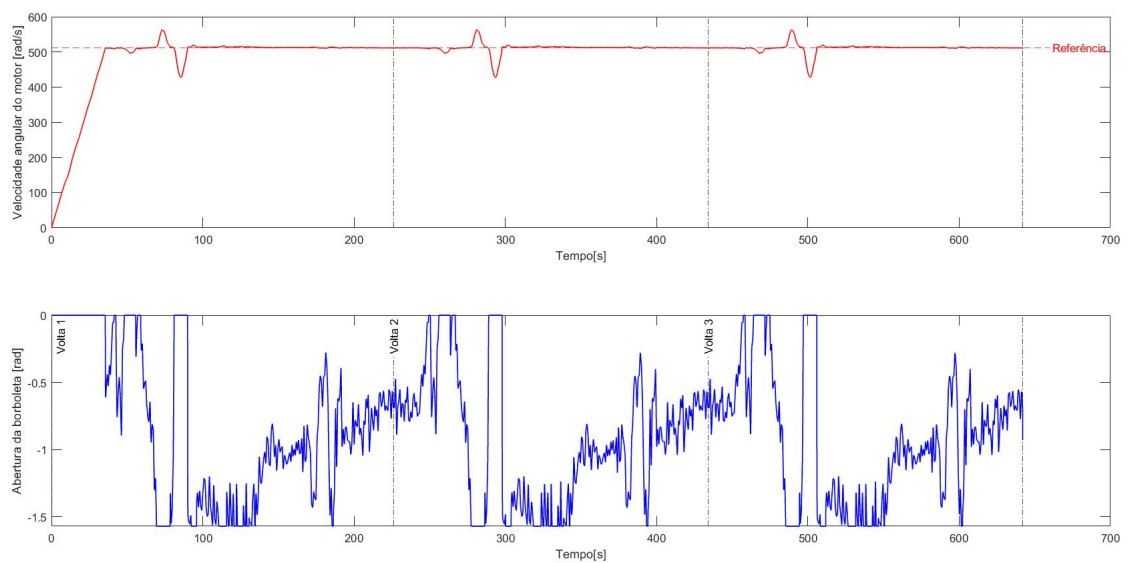


Figura 4.4: Entrada e saída na tentativa b

O comportamento da abertura da borboleta mostra que as inclinações da pista não contém um grande desafio para manter o controlador no ponto de referência estabelecido.

Tentativa	a	b	c	d
Referência [rad/s]	437.32	458.57	503.76	512.47
Custo médio [g/kW.h]	371.63	387.04	394.48	398.08
Tempo [min]	28.66	27.36	25.82	24.56

É possível observar que o tempo e gasto energético médio na velocidade de referência 512.47 são similares, mostrando que a pista majoritariamente não tem bruscas inclinações e está próximo de representar uma reta infinita. O melhor custo nessa bateria de tentativas, seguindo as regras da competição, foi de 387.04g/kW.h com a velocidade de referência 458.57.

4.2.2 Desligando o motor em alguns pontos

É muito discutido na equipe Milhagem UFMG a possibilidade de ligar o motor em pontos estratégicos da pista, de forma que o movimento de inércia do protótipo consiga realizar um grande deslocamento, e dessa forma menos combustível seria queimado na competição. Foram realizadas 4 baterias de tentativas seguindo essa metodologia, a fim de diminuir consumo.

Bateria de teste 1

Nessa bateria de tentativas a ideia é desligar o motor em 2 pontos da pista, os pontos pré curva, como evidenciado na figura 4.5 pelas cores vermelhas.

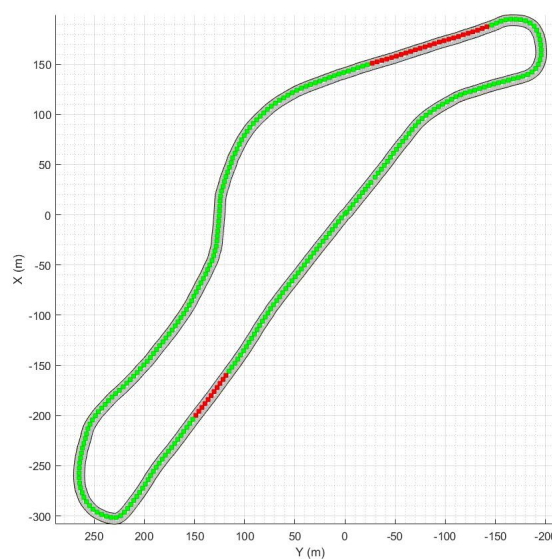


Figura 4.5: Percurso - bateria 1

As 4 tentativas dessa bateria foram feitas com as seguintes velocidades de referência: 503.76, 512.47, 537.89 e 550.74, sendo que as duas primeiras são as duas últimas velocidades utilizadas no teste com motor ligado. A figura 4.6 mostra o comportamento da abertura da borboleta e da velocidade angular do motor em função do tempo das voltas, especificamente na tentativa 1.b.

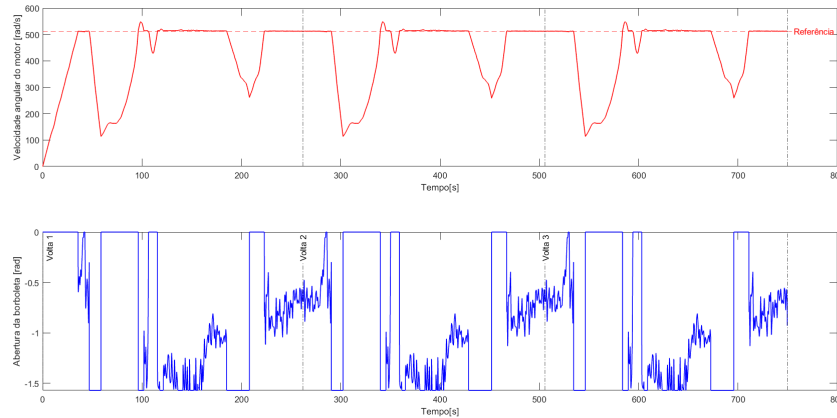


Figura 4.6: Entrada e saída na tentativa 1.b

Tentativa	1.a	1.b	1.c	1.d
Referência [rad/s]	503.76	512.47	537.89	550.74
Consumo médio [g/kW.h]	394.48	393.26	398.81	403.71
Tempo [min]	30.13	28.75	26.31	25.35

É possível evidenciar que as duas primeiras tentativas, com esses dois momentos de motor desligados, não tem força suficiente para completar as voltas respeitando as regras da competição. O melhor custo nessa bateria de tentativas, seguindo as regras da competição, foi de 398.81g/kW.h com a velocidade de referência 537.89.

Bateria de teste 2

Nessa bateria de tentativas a ideia é desligar o motor em outros ponto 2 pontos da pista, ou seja além dos pontos pré curva foram escolhidos pontos de reta de forma a otimizar o momento de motor desligado, como evidenciado na figura 4.7 pelas cores vermelhas.

As 4 tentativas dessa bateria foram feitas com as seguintes velocidades de referência: 537.89, 550.74, 575.95 e 590.00, sendo que as duas primeiras são as duas últimas velocidades utilizadas no teste da bateria 1. A figura 4.8 mostra o comportamento da abertura da borboleta e da velocidade angular do motor em função do tempo das voltas, especificamente na melhor tentativa dessa bateria, 2.a.

Nessa segunda bateria é possível evidenciar com esses momentos de desligamento do motor todas as tentativas seriam válidas na competição, contudo os resultados não

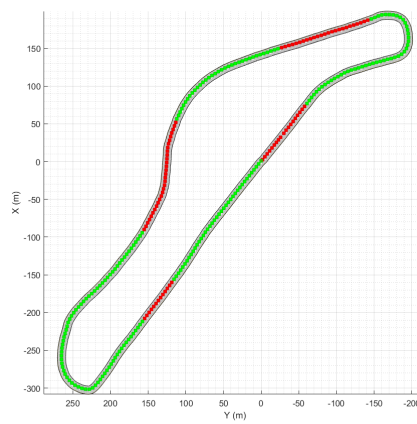


Figura 4.7: Percurso - bateria 2

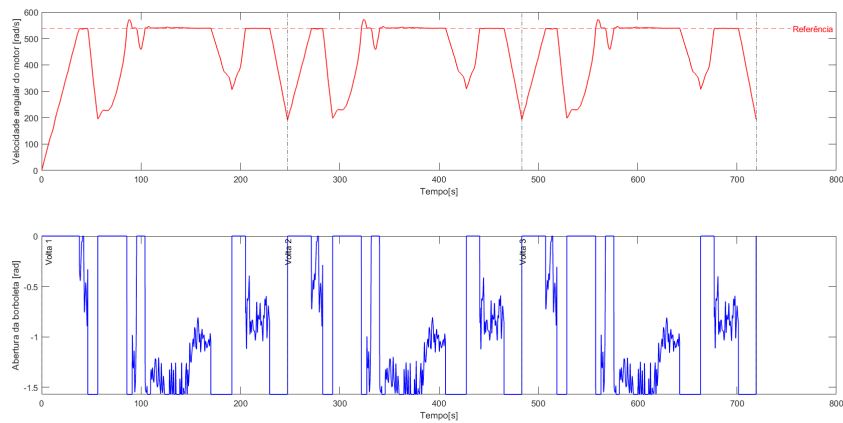


Figura 4.8: Entrada e saída na tentativa 2.a

Tentativa	2.a	2.b	2.c	2.d
Referência [rad/s]	537.89	550.74	575.95	590.00
Consumo médio [g/kW.h]	394.92	398.85	409.47	416.80
Tempo [min]	27.71	26.62	24.82	24.01

superaram a tentativa anterior. O melhor custo nessa bateria de tentativas, analogamente a bateria 1 foi seguindo a velocidade de referência 537.89, contudo com custo aumentou de 398.81g/kW.h para 394.92g/kW.h.

Bateria de teste 3

A bateria de testes 3 é marcada pelo aumento do tempo de motor desligado onde a pista não tem grandes variações de angulação, como evidenciado na figura 4.9 pelas cores vermelhas.

As 4 tentativas dessa bateria foram feitas com as seguintes velocidades de referência: 575.95, 590.00, 605.87 e 628.31, sendo que as duas primeiras são as duas últimas

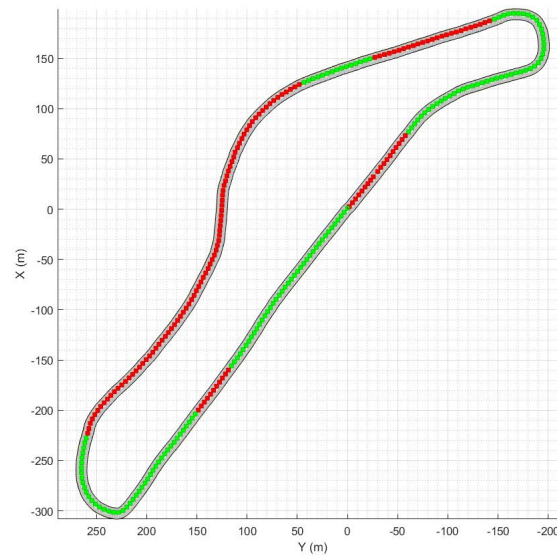


Figura 4.9: Percurso - bateria 3

velocidades utilizadas no teste da bateria 2. A figura 4.10 mostra o comportamento da abertura da borboleta e da velocidade angular do motor em função do tempo das voltas, especificamente na melhor tentativa dessa bateria, 3.b.

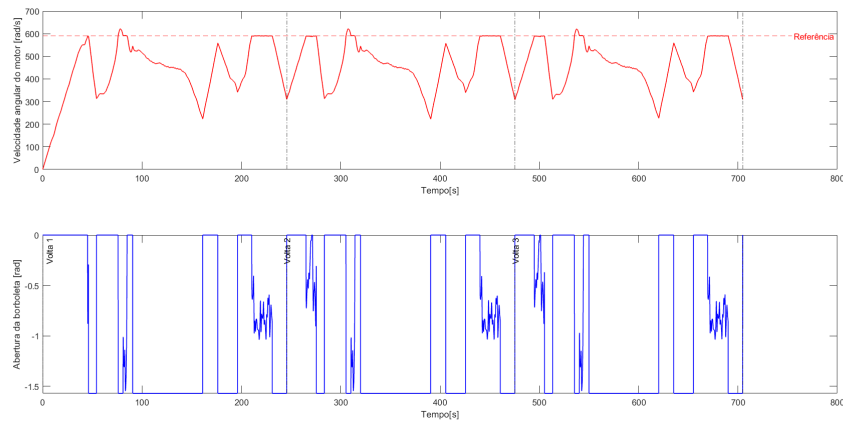


Figura 4.10: Entrada e saída na tentativa 3.b

Tentativa	3.a	3.b	3.c	3.d
Referência [rad/s]	575.95	590.00	605.87	628.31
Consumo médio [g/kW.h]	389.35	393.61	400.05	411.10
Tempo [min]	28.30	27.02	25.78	24.36

Nessa terceira bateria é possível evidenciar que a primeira tentativa não tem força suficiente para completar as voltas respeitando o tempo da competição. O melhor custo nessa bateria de tentativas é 393.61g/kW.h com a velocidade de referência 575.95rad/s.

Bateria de teste 4

A quarta e última bateria foi feita para deixar a resposta do controle mais parecida com um trem de pulso possível, ou seja, foi a bateria em que basicamente a abertura de borboleta varia rapidamente de 0° a 90° . E é possível verificar como ficou os momentos de motor desligados durante a pista na figura 4.11 pelas cores vermelhas.

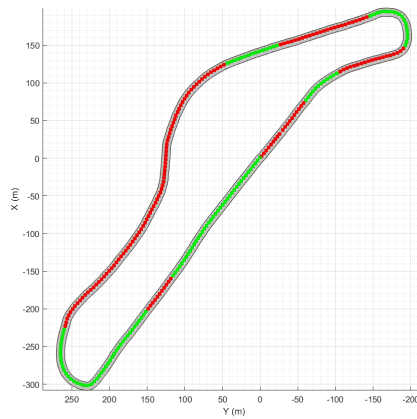


Figura 4.11: Percurso - bateria 4

As 3 tentativas dessa bateria foram feitas com as seguintes velocidades de referência: 605.87, 628.31 e 657.16, sendo que as duas primeiras são as duas últimas velocidades utilizadas no teste da bateria 3 e que aumentando a velocidade o motor morre e não consegue terminar a tentativa. A figura 4.12 mostra o comportamento da abertura da borboleta e da velocidade angular do motor em função do tempo das voltas, especificamente na melhor tentativa dessa bateria, 4.a.

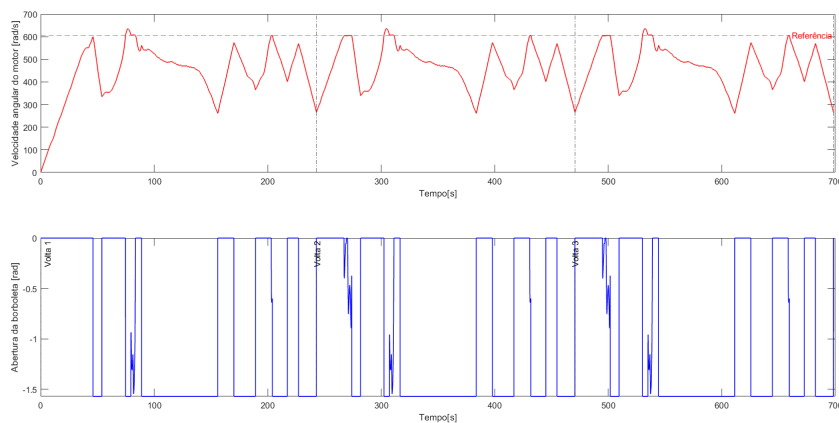


Figura 4.12: Entrada e saída na tentativa 4.a

Nesta quarta bateria é possível evidenciar o melhor custo nessa bateria de tentativas é $392.71g/kW.h$ com a velocidade de referência $605.87rad/s$.

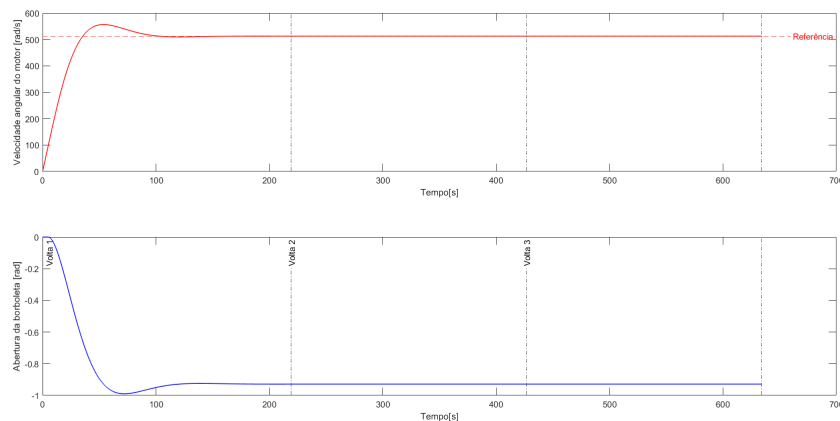
Tentativa	4.a	4.b	4.c
Referência [rad/s]	605.87	628.31	657.16
Consumo médio [g/k.-h]	392.71	402.93	419.31
Tempo [min]	26.82	25.18	23.41

4.3 Comparativo com controlador PI

A fim de comparar o controlador preditivo com outro controlador, com o auxílio do software *MatLab* foi possível testar o comportamento de um controlador PI simples. Este controlador foi construído de forma tenha uma resposta robusta no tempo para conseguir manter o protótipo em funcionamento por toda a trajetória:

$$C(z) = \frac{0.003826z - 0.003808}{z - 1} \quad (4.1)$$

A figura 4.13 mostra o teste desse controlador PI na pista desconsiderando sua inclinação. É possível observar que por mais que a resposta deste controlador apresente um *overshooting*, este consegue se manter na referência desejada. Por fim, por mais que os tempos das tentativas, do MPC e do PI, sejam parecidas, a resposta do controlador PI demora mais para atingir a constância da referência.



sub

Figura 4.13: Entrada e saída de PI sem inclinação

Na figura 4.14 é possível verificar que a demora do seu tempo de resposta não consegue se manter na referência estabelecida, contudo para fins de competição esse não é um problema. O consumo do PI teve um aumento considerável comparado ao MPC na mesma situação, sendo que este segundo teve sua melhor tentativa nesta mesma.

A estratégia de desligar o motor em momentos estratégicos também não funcionou bem no PI, sendo que a figura 4.15 representa os únicos momento que esse controlador conseguiu se manter desligado sem efetivamente perder toda a velocidade de inércia. Seu consumo também teve um aumento considerável e não pode ser considerado satisfatório comparativamente.

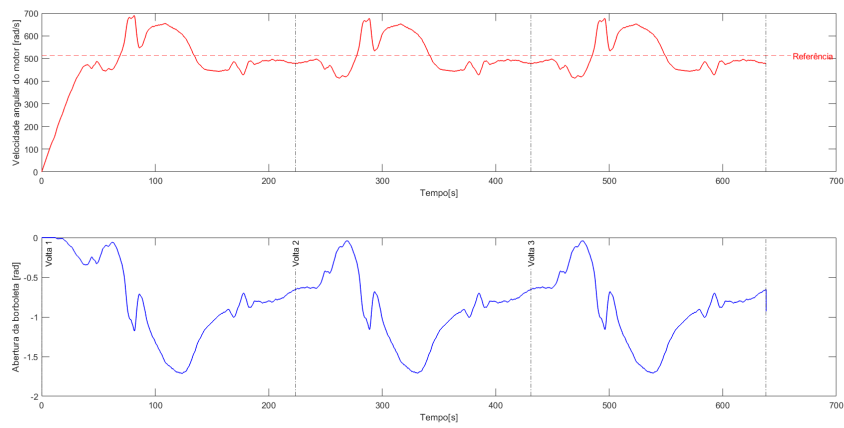


Figura 4.14: Entrada e saída de PI com inclinação

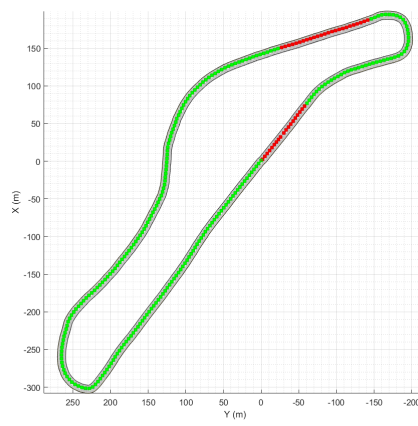


Figura 4.15: Percurso PI - com inclinação e desligamentos

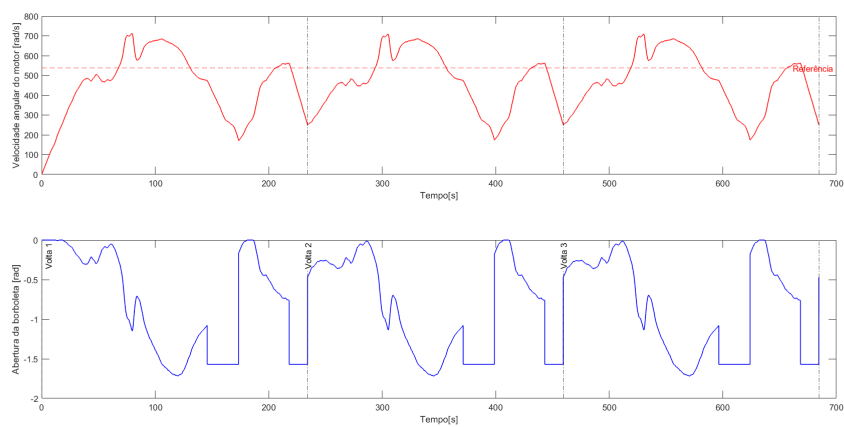


Figura 4.16: Entrada e saída de PI com inclinação e desligamentos

Em suma, comparando o gasto energético das três tentativas feitas, nenhuma delas teve um melhor resultado se comparado ao MCP. Comparando entre si, a melhor tentativa válida de competição com o controlador PI foi com a estratégia de manter o motor ligado por todo o percurso.

Tentativa	S/ inclinação	C/ inclinação	C/ inclinação e desligamentos
Referência [rad/s]	512.47	512.47	537.89
Consumo médio [g/kW.h]	399.14	407.24	414.81
Tempo [min]	24.39	24.46	26.42

4.4 Resultado das tentativas

Desta forma, temos que o *ranking* com as 3 melhores tentativas são:

Posição	Tentativa	Consumo [g/kW.h]	Referência [rad/s]	Tempo [min]
1º Lugar	0.a	387.04	458.57	27.36
2º Lugar	4.a	392.71	605.87	26.82
3º Lugar	3.b	393.61	590.00	27.02

É interessante entender que é mais fácil para o piloto fazer o controle de abertura de borboleta com variações mais bruscas de 0° a 90° , ou seja, utilizando a estratégia liga-desliga. Por mais que esta seja uma estratégia interessante em sistema sem controlador, quando adicionamos um controlador, preditivo ou PI, a tentativa que teve um melhor resultado foi deixando o controlador agir sem interrupções. Importante ressaltar que isto se deve ao fato de ao utilizar a estratégia liga-desliga e ao mesmo tempo respeitar a regra temporal da competição é necessário colocar a velocidade de referência alta e longe da faixa de menor gasto energético, de acordo com o estudo feito no *GT-Power* e evidenciado na figura 3.8.

Capítulo 5

Conclusões

Para a execução do projeto, algumas etapas de desenvolvimento tiveram de ser seguidas: familiarização com o sistema, estudo dos módulos envolvidos, leitura dos requisitos, elaboração de documento descrevendo todo o processo de implementação e relacionamento com os diversos módulos, implementação e testes.

No presente trabalho, foi apresentado e simulado teoricamente o sistema em que o protótipo Milhagem UFMG está envolvido na competição *Shell Eco Marathon*. Inicialmente, foi apresentada uma visão geral de todo sistema de propulsão do CTM-M84, tanto na parte da mecânica, com um estudo sobre motores, até a parte eletrônica com todos os sensores e atuadores envolvidos no *powertrain*.

A metodologia utilizada para descrever esse sistema não linear foi desenvolvida e pode ser dividida entre: entender o comportamento da dinâmica veicular do sistema, simular o torque do motor no *software GT-Power* para entender o gasto e o comportamento da velocidade angular desse motor em função da abertura da borboleta, e por fim foi possível linearizar o sistema em função de um ponto de operação para construir um controle preditivo MPC.

Finalmente, os resultados foram obtidos em simulações representando a competição *Shell Eco Marathon*. Esses indicam que o uso de um controlador preditivo é capaz de encontrar uma solução factível que mantém o protótipo dentro das regras da competição e que consiga um gasto energético mínimo e satisfatório.

5.1 Considerações Finais

Neste trabalho foi observado que a estratégia de liga-desliga é uma boa metodologia para se aplicar nas competições da equipe Milhagem UFMG, contudo com a presença de um controlador MPC a melhor estratégia a ser utilizada é manter o motor rodando na sua faixa de menor gasto energético, de acordo com o estudo feito no *GT-Power* e evidenciado na figura 3.8.

Não foi possível comparar os dados obtidos teoricamente neste trabalho com informações reais do motor, já que este ainda não chegou a completar tentativas nas competições que participou. Contudo este estudo servirá de base para análises futuras da equipe Milhagem UFMG, tendo em vista que além do projeto do controle MPC, também foi feito um estudo sobre o motor Honda GX-35 e o protótipo em situações

de pista.

5.2 Propostas de Continuidade

Neste trabalho não foi possível testar o uso do controlador no protótipo real, logo a proposta de continuidade deste é colocar esse controlador em um Arduino para que fosse possível verificar e comparar a teoria da prática. O motor Honda GX35 foi modelado de forma que representasse o sistema da melhor forma possível, mas ainda sim questões como temperatura, batimento físico dentre outros poderiam causar dificuldades do motor efetivamente seguir o controlador.

Referências Bibliográficas

- [1] CO., L. S. B. E. Ksd-9700 series thermal protector.
- [2] CARVALHO, T. C. de O. Definição da arquitetura de central eletrônica para controle da ignição e da injeção de combustível em motores de combustão interna. p. 10–80, 2005. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFMG.
- [3] DENTON, T. *Automobile Electrical and Electronic Systems*. 3. ed. London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 170-239 p.
- [4] RÖDER, U. A. H. B. J. *Automotive Handbook*. 3. ed. Automotive Equipment Business Sector, Department for Technical Information (KH/VDT): Robert Bosch GmbH, 1993.
- [5] HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1. ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1988. 9-11 p.
- [6] GIACOSA, D. *Motores Encotérmicos*. 11. ed. Barcelona: Editorial científico-medica, 1970. 3-65 p.
- [7] MOTEC. Product datasheet m84. Australia.
- [8] LLC, G. T. Flow theory manual. 2016.
- [9] HONDA. Owner's manual gx25-gx35. 2005.
- [10] RIBBENS, W. B. *Understanding Automotive Electronics*. 5. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann Publishing Co., 1998. 11-19 p.
- [11] PUJATTI, F. J. P. Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha. p. 14–60, 2007. Departamento de Engenharia Mecânica, Univeridade Federal de Minas Gerais.
- [12] EHSANI YIMIN GAO, S. E. G. A. E. M. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design*. 1. ed. Florida: CRC press LLC, 2005. 21-46 p.
- [13] THIRIET, A. B. Estudo de metodologias de avaliação da força de resistência ao deslocamento de um veículo. p. 19–34, 2018. Departamento de Engenharia Mecânica, Univeridade Federal de Minas Gerais.
- [14] WILLERMARK, F. D. D. Gt-power simulation report. 2009. SEMCON.
- [15] AGUIRRE, L. A. *Intordução à identificação de sistema - Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. 1. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 220-250 p.

- [16] CAMACHO, C. B. E. F. *Model Predictive Control*. 1. ed. 50 George Street, Glasgow G1 QE,UK: Springer-Verlag London Limited, 1999. 13-29 p.