

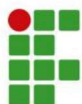
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMUEL JUDÁ MARQUES FREIRE

SIMULAÇÃO E MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO
MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA COM MATLAB/SIMULINK

GOIÂNIA

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: **Samuel Judá Marques Freire**

Matrícula: **20191011060270**

Título do Trabalho: **Simulação e Modelagem de um Veículo Elétrico Utilizando Máquina a Relutância Chaveada com MATLAB/Simulink**

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O referido autor declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Assinado digitalmente na ZapSign por
Samuel Judá Marques Freire
Data: 23/04/2025 00:10:10.097 (UTC-0300)

Goiânia, 18/04/2025.

Samuel Judá Marques Freire

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SAMUEL JUDÁ MARQUES FREIRE

SIMULAÇÃO E MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO
MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA COM MATLAB/SIMULINK

Trabalho de Conclusão de Curso, submetido à
Coordenação de Engenharia Elétrica,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do Título em
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias

GOIÂNIA

2025

F866s Freire, Samuel Judá Marques.

Simulação e modelagem de um veículo elétrico utilizando Máquina a Relutância Chaveada com Matlab/Simulink / Samuel Judá Marques Freire. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2025.

641 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Veículo Elétrico Híbrido (VEH) - modelo computacional. 2. Veículo Elétrico Híbrido (VEH) - simulação computacional. 3. Máquina a Relutância Chaveada (MRC). I. Dias, Renato Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 629.229 3

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e quatro dias do mês de março do ano de dois mil e vinte cinco, às dezenove horas, via webconferência, realizou-se a sessão pública de defesa de Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia. O trabalho foi intitulado como SIMULAÇÃO E MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA COM MATLAB/SIMULINK, desenvolvido pelo discente Samuel Judá Marques Freire, matrícula 20191011060270, sob a orientação do professor Dr. Renato Jayme Dias. A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: Dr. Renato Jayme Dias (Orientador e Presidente da Banca Avaliadora), Ma. Camille Reátégui Silva (Membro Externo da Banca Avaliadora), Prof. Me. Charles dos Santos Costa (Membro Interno da Banca Avaliadora). Após a exposição oral do trabalho e arguições dos membros da banca examinadora, por decisão unânime, o trabalho foi aprovado com nota final 10. Nada mais havendo a tratar, o presidente da banca agradeceu a participação de todos e encerrou a sessão pública de defesa.

Eu, Renato Jayme Dias, orientador e presidente da banca avaliadora, lavrei a presente ATA assinada.

Goiânia, 24 de março de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **RENATO JAYME DIAS**
Data: 21/04/2025 16:05:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato Jayme Dias
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Documento assinado digitalmente
 **CAETANO REATEGUI SILVA**
Nome civil: CAMILLE REATEGUI SILVA
Data: 28/03/2025 15:19:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ma. Camille Reátégui Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte

Documento assinado digitalmente
 **CHARLES DOS SANTOS COSTA**
Data: 03/04/2025 10:13:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Charles dos Santos Costa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e fortalecido até aqui. Sem Ele não poderia chegar a lugar algum.

Agradeço à minha esposa, Aline Suelen, pela compreensão, incentivo constante e motivação para que eu não desistisse.

Agradeço à minha família e amigos pelas orações e apoio até o fim.

Agradeço também aos meus colegas, em especial à Karini Amanda, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho.

E por fim, ao Prof. Dr. Renato Jayme Dias, pelas oportunidades, pelas aulas, pelo projeto da máquina e por inspirar os alunos a serem pesquisadores.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Aline Suelen, que é a minha maior apoiadora e a pessoa com quem quero estar o restante da minha vida.

Aos meus pais, Josiel Lourenço Freire e Sandra Divina Marques Freire, que foram os primeiros a acreditarem em mim e me possibilitaram chegar até aqui.

EPÍGRAFE

“Eu o instruirei e o ensinarei no caminho
que você deve seguir.”
(Salmos 32:8)

RESUMO

Os Veículos Elétricos têm sido um tema popular na sociedade atualmente, tanto pelo apelo ambiental quanto pelo econômico. Neste contexto, os Veículo Elétricos Híbridos (VEH) se destacam pela autonomia e desempenho. As máquinas elétricas utilizadas neste tipo de veículo, geralmente, utilizam ímãs permanentes, um recurso escasso e caro. Neste cenário, a Máquina a Relutância Chaveada se apresenta como um forte candidato para solucionar o problema. Além disso, outro fator determinante no projeto de um VEH é o espaço de alocação de um motor adicional além do motor a combustão. Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo computacional, a simulação e as melhorias de desempenho encontradas em um Veículo Elétrico Híbrido utilizando como motor elétrico uma Máquina a Relutância Chaveada de topologia 6x4 de apenas 1 cv. Para realização do trabalho foi utilizada a ferramenta computacional MATLAB® SIMULINK.

Palavras-Chave: Veículo Elétrico Híbrido. Máquina a Relutância Chaveada. Modelagem. Simulação.

ABSTRACT

Electric vehicles have been a popular topic in society today, both for their environmental and economic appeal. In this context, Hybrid Electric Vehicles (HEVs) stand out for their autonomy and performance. The electric machines used in this type of vehicle generally use permanent magnets, a scarce and expensive resource. In this scenario, the Switched Reluctance Machine presents itself as a strong candidate to solve the problem. In addition, another determining factor in the design of a HEV is the allocation space for an additional motor in addition to the combustion engine. Thus, this work presents the development of a computational model, the simulation and the performance improvements found in a Hybrid Electric Vehicle using as an electric motor a Switched Reluctance Machine of 6x4 topology of only 1 hp. To carry out the work, the computational tool MATLAB® SIMULINK was used.

Keywords: Hybrid Electric Vehicle. Switched Reluctance Machine. Modeling. Simulation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Parâmetros do bloco Vehicle Body	38
---	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Diagrama de blocos de um VEH Série	20
Figura 2.2: Diagrama de blocos de um VEH Paralelo	20
Figura 2.3: Diagrama de blocos de um VEH Série – Paralelo	21
Figura 3.1: Seção transversal de uma MRC de topologia 6x4, destacando a fase A	22
Figura 3.2: Conversor Half-Bridge para uma fase da máquina.....	24
Figura 4.1: Bloco S-Function do SIMULINK	29
Figura 4.2: Bloco de integração do script principal	29
Figura 4.4: a) Bloco da fonte controlada por corrente b) Bloco do diodo ambos provenientes do SIMULINK.....	31
Figura 4.5: Bloco do MOSFET do SIMULINK	31
Figura 4.6: Bloco Interpreted MATLAB Function	32
Figura 4.7: Bloco fonte de tensão de corrente contínua.....	32
Fonte: (Elaborado pelo autor).....	32
Figura 4.7: Modelo Final da MRC topologia 6x4.....	33
Figura 4.8: Correntes de fase distintas através de cores.....	34
Figura 4.9: Conjugado em N.m da MRC de topologia 6x4	34
Figura 5.1: Bloco Generic Engine.....	36
Figura 5.2: Bloco <i>Vehicle Body</i>	37
Figura 5.3: Bloco <i>Tire (Magic Formula)</i>	38
Figura 5.4: Bloco <i>Differential</i>	39
Figura 6.1: Diagrama de Blocos do Modelo Computacional.....	41
Figura 6.2: Diagrama de Blocos do Bloco de Controle	42
Figura 6.3: Gráfico do Ciclo de Condução FTP75 e suas fases	43
Figura 6.4: Diagrama de Blocos do Bloco de Normalização	44
Figura 6.5: Modelo Final do Veículo desenvolvido no Matlab/Simulink	45
Figura 7.1: Diagrama de Blocos da Simulação Puramente a Combustão	46
Figura 7.2: Diagrama de Blocos da Simulação Híbrida.....	47
Figura 7.3: Conjugado produzido pelo MCI	48
Figura 7.4: Velocidade de Rotação do MCI	49
Figura 7.5: Comparação da Velocidade de saída com o Comando de Entrada do FTP75	49
Figura 7.6: Desempenho do Veículo em Momentos de Partida e Parada	50
Figura 7.7: Consumo de Combustível da Simulação puramente a Combustão	50

Figura 7.8: Conjugado Gerado pela MRC	51
Figura 7.9: Correntes de Fase da MRC	52
Figura 7.10: Velocidade de rotação da MRC	52
Figura 7.11: Conjugado Gerado pelo MCI.....	53
Figura 7.12: Velocidade de rotação do MCI	54
Figura 7.13: Conjugado Total.....	54
Figura 7.14: Detalhe da Soma dos Conjugados	55
Figura 7.15: Comparação da Velocidade de saída com o Comando de Entrada do FTP75 para o VEH	55
Figura 7.16: Desempenho do VEH em momentos de parada e partida	56
Figura 7.17: Consumo de combustível do VEH	57
Figura 8.1: Desempenho do VEH em momentos de parada e partida a) Simulação Puramente a Combustão b) Simulação Híbrida.....	59
Figura 8.2: Consumo de Combustível a) Simulação Puramente a Combustão b) Simulação Híbrida	60

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Indutância de Fase
N	Número de espiras
$\mathfrak{R}$	Relutância do circuito
l	Comprimento médio do circuito magnético
μ	Permeabilidade do circuito magnético
A	Área transversal por onde circula o fluxo magnético
λ	Fluxo Concatenado
i	Corrente de fase
v	Tensão nas bobinas do estator
e	Tensão induzida nas bobinas do estator
R	Resistência das bobinas
ω	Velocidade angular
T_{emg}	Conjugado Eletromagnético
T_{mec}	Conjugado Mecânico
D	Coeficiente de Atrito Viscoso
J	Momento de Inércia
θ	Posição Angular do Rotor

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FTP75	Federal Test Procedure 75
HB	Half-Brigde
JP1015	Japan 10-15 Mode
MCI	Motor a Combustão Interna
MRC	Máquina a Relutância Chaveada
NEDC	New European Drive Cycle
PI	Proporcional Integral
VCI	Veículo a Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	16
1.1. Considerações Iniciais	16
1.2. Objetivos do Trabalho	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Introdução	18
2.2. Tipos de VEH	18
2.3.1. Micro Híbrido (Micro Hybrid)	18
2.3.2. Híbrido Moderado (Mild Hybrid)	19
2.3.3. Híbrido Completo (Full Hybrid)	19
2.3. Arquiteturas dos Veículos Híbridos	19
2.3.1. Arquitetura Série	19
2.3.2. Arquitetura Paralelo	20
2.3.3. Arquitetura Série – Paralelo	20
2.4. Conclusão	21
3. MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA.....	22
3.1. Introdução	22
3.2. Princípio de funcionamento	22
3.3. O conversor e o controle.....	24
3.4. Modelagem matemática.....	24
3.5. Conclusão	27
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MRC	28
4.1. Introdução	28
4.2. Definições Iniciais	28

4.3.	Desenvolvimento do modelo do conversor e do controle	30
4.4.	Obtenção dos valores de Indutância de fase sua respectiva Derivada.....	32
4.5.	Resultados Obtidos	33
4.6.	Conclusão	35
5.	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MCI E DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO VEÍCULO	36
5.1.	Introdução	36
5.2.	Definições Iniciais	36
5.3.	Motor a Combustão Interna	36
5.4.	Corpo do Veículo	37
5.5.	Pneus e Rodas	38
5.6.	Diferencial	39
5.7.	Transmissão	39
5.8.	Conclusão	40
6.	MODELAGEM COMPUTACIONAL DO VEÍCULO	41
6.1.	Introdução	41
6.2.	Definições Iniciais	41
6.3.	Bloco de Controle	42
6.3.1.	Ciclo de Condução (Drive Cycle)	42
6.3.2.	Bloco de normalização	43
6.4.	Montagem do Modelo do Veículo	44
6.5.	Conclusão	45
7.	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	46
7.1.	Introdução	46
7.2.	Definições Iniciais	46
7.3.	A Questão do Acoplamento	47
7.4.	Resultados da Simulação do Veículo Puramente a Combustão.....	48

7.5. Resultados da Simulação do Veículo Elétrico Híbrido	51
7.6. Conclusão	57
8. CONCLUSÃO	58
9. REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO GERAL E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1. Considerações Iniciais

Ao longo do desenvolvimento histórico e tecnológico da sociedade, os veículos se tornaram um eixo vital para locomoção humana, movimento de cargas, impactando o mundo dos negócios, possibilitando viagens e até mesmo salvar e resgatar vidas. Percebe-se que a área de transportes influencia diretamente em diversas áreas da vida humana, até mesmo negativamente como, por exemplo, causando graves impactos ambientais, gerando um consumo excessivo de combustíveis fósseis e contribuindo para aumento da emissão de gases poluentes. Em vista dessa problemática, algumas soluções são levantadas e uma delas é a utilização de veículos elétricos em detrimento de veículos movidos a motores de combustão interna.

Embora, a criação do primeiro veículo elétrico (VE) tenha acontecido há mais de 150 anos, devido ao custo para fabricação e a baixa autonomia, ele foi substituído pelo veículo a combustão interna (VCI), que ganhou bastante popularidade devido ao baixo valor para aquisição e uma melhor autonomia [1]. Ao longo dos anos, principalmente após o desenvolvimento da eletrônica de potência e o surgimento de novas tecnologias, os VE começaram a receber novamente maior atenção de pesquisadores, surgiram baterias que proporcionaram melhor autonomia e foram desenvolvidos motores mais eficientes. E com o apelo ambiental, as pesquisas se intensificaram em torno do assunto trazendo os VE novamente ao cenário comercial de forma competitiva.

Neste cenário, surge o Veículo Elétrico Híbrido (VEH), um veículo que possui um trem de força composto por duas fontes de energia diferentes. Neste caso, um motor a combustão interna e um motor elétrico. Este veículo, além de contribuir para reduzir a emissão de gases poluentes, possui maior autonomia que um veículo puramente elétrico.

Em vista de um contínuo processo de desenvolvimento, um fator determinante para o sucesso de um VEH é o motor que está sendo utilizado nele. Um dos motores elétricos mais utilizados atualmente é o motor síncrono de ímãs permanentes. Entretanto, devido a problemas a escassez natural de ímãs e ao custo de obtenção dele, motores sem ímãs permanentes vem obtendo destaque e ganhando um pouco mais de espaço no mercado.

Neste contexto, a Máquina a Relutância Chaveada (MRC) aparece como uma alternativa com características interessantes para uso em veículos, com uma boa

resposta em regime de velocidades variáveis. É uma máquina com maior densidade de potência, robusta e de estrutura simples, porém possui alto ruído acústico [2]. Outro fator determinante em um projeto de VEH é o espaço disponível para alocação de um motor adicional acoplado ao motor a combustão interna (MCI). O que torna necessário que a máquina elétrica utilizada tenha dimensões reduzidas sem perder a capacidade de produzir o conjugado desejado.

Portanto, dadas as características da máquina e a relevância do tema, neste trabalho foi realizado um estudo sobre a MRC topologia 6x4 trifásica de apenas 1 cv, assim como seu modelo matemático. E a partir deste foi realizada uma modelagem no ambiente MATLAB® SIMULINK e simulado o funcionamento da máquina como um motor elétrico em um Veículo Elétrico Híbrido (VEH) e obtidos os resultados desta aplicação.

1.2. Objetivos do Trabalho

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo computacional de um Veículo Elétrico Híbrido (VEH) utilizando uma máquina a relutância chaveada (MRC) como motor elétrico com a ferramenta MATLAB® SIMULINK. E, através deste modelo, realizar simulações dinâmicas para analisar a performance da MRC aplicada ao VEH.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral serão desenvolvidos objetivos específicos na seguinte ordem:

1. Estudo e compreensão do funcionamento da MRC;
2. Estudo acerca da utilização da ferramenta MATLAB® SIMULINK;
3. Desenvolvimento de um modelo computacional da MRC de topologia 6x4;
4. Estudo sobre a modelagem de um VEH no MATLAB® SIMULINK;
5. Modelagem de um VEH utilizando uma MRC 6x4 no MATLAB® SIMULINK;
6. Simulações e análises.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Os Veículos Elétricos Híbridos (VEH) surgem como uma boa solução para o problema ambiental e socioeconômico que insurgiu com mais ênfase nas últimas década [1]. Une o melhor de dois mundos, maior autonomia proporcionada pelo motor à combustão interna, alta eficiência energética e menor poluição ambiental através da utilização de um motor elétrico [1][3]. O VEH, embora possua motor à combustão interna e consequentemente contribuirá para emissão de gases poluentes contribui efetivamente com a diminuição da poluição, haja vista que, dentro da cidade em velocidades inferiores, utilizará na maior parte do tempo apenas o motor elétrico. E ao mesmo tempo, o usuário poderá em viagens mais longas utilizar ambos os motores para que consiga chegar até o destino sem o risco de ficar com pouca carga na bateria de alimentação do motor elétrico. Por fim, podemos classificar os VEH de acordo com a capacidade do motor elétrico e de acordo com o com a arquitetura escolhida para o seu desenvolvimento.

2.2. Tipos de VEH

Dependendo da construção do VEH e qual a parcela de contribuição que o motor elétrico desempenha no funcionamento do veículo o VEH pode ser classificado em três tipos: micro híbrido, híbrido moderado e híbrido completo.

2.3.1. *Micro Híbrido (Micro Hybrid)*

É o modelo mais simples de VEH, implementa um pequeno motor elétrico com uma potência entre 3 e 5kW. Geralmente, é responsável por funções mais simples no veículo, como sistemas de liga-desliga (ou start-stop, em inglês), que desligam o motor a combustão automaticamente quando o veículo para como em situações de congestionamento ou paradas rápidas e ligam novamente quando o motorista aciona o acelerador para retomar o movimento. Podem ser usados também para ajudar a suprir algumas demandas de acessórios do veículo (em alguns casos), como o ar-condicionado. Os micro híbridos podem proporcionar até 10% de economia de combustível em relação aos veículos convencionais, principalmente em condições urbanas, onde o veículo para diversas vezes ao longo do trajeto desejado [1].

2.3.2. *Híbrido Moderado (Mild Hybrid)*

Os híbridos moderados têm um motor elétrico com uma potência maior. Consequentemente, um maior nível de ganho de economia de combustível, economizando até 20% em combustível em comparação com veículos de combustão convencionais. Híbridos moderados normalmente fornecem ao veículo funções de liga-desliga (start-stop) assim como nos Micro Híbridos, além disso oferece funções como frenagem regenerativa, potência elétrica adicional para acessórios e uma pequena assistência ao motor a combustão [1].

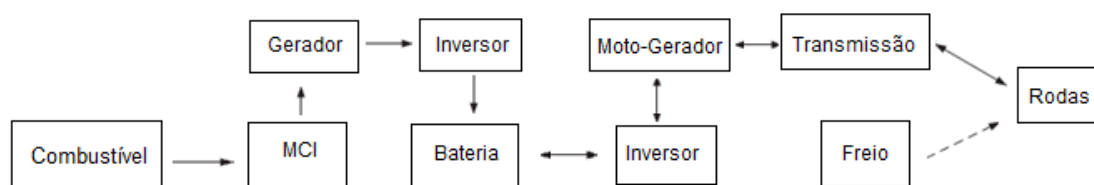
2.3.3. *Híbrido Completo (Full Hybrid)*

Dos tipos de VEH comentados até agora, o híbrido completo é o que possui o motor elétrico com maior potência. A potência nominal do motor elétrico de um sedã totalmente híbrido é de 30 kW ou superior. Dessa forma, além das funções que os Micro Híbridos e os Híbridos Moderados são capazes, os Híbridos Completos conseguem utilizar somente o motor elétrico, somente o motor a combustão interna ou uma junção de ambos, gerando economia de combustível e menor poluição. Quando o veículo está operando em modo totalmente elétrico, o motor elétrico é usado para impulsionar o veículo e alimentar todas as cargas internas, entretanto, possui uma faixa de operação limitada, já que a bateria e o tamanho da máquina elétrica não podem suportar durante longos períodos nesse modo. Normalmente, os Híbridos Completos podem atingir mais de 40% de economia de combustível, principalmente em viagens somente urbanas, onde seria mais utilizado o motor elétrico [1].

2.3. **Arquiteturas dos Veículos Híbridos**

2.3.1. *Arquitetura Série*

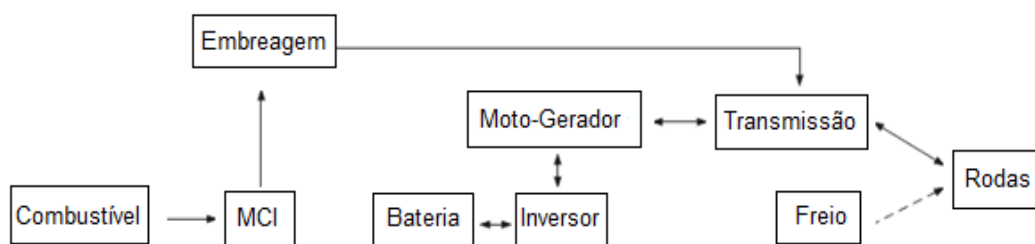
Um VEH em série é um trem de força onde duas fontes de energia alimentam um único motor, o motor elétrico, que impulsiona o veículo. Nesse caso, a bateria que alimenta o motor elétrico deve ser maior, já que não é utilizado diretamente etanol ou gasolina como fonte de energia para mover o veículo e sim para recarregar a bateria [1][3]. Na **Figura 2.1** é demonstrado um diagrama de blocos de um VEH Série.

Figura 2.1: Diagrama de blocos de um VEH Série

Fonte: (Adaptado de [1]).

2.3.2. Arquitetura Paralelo

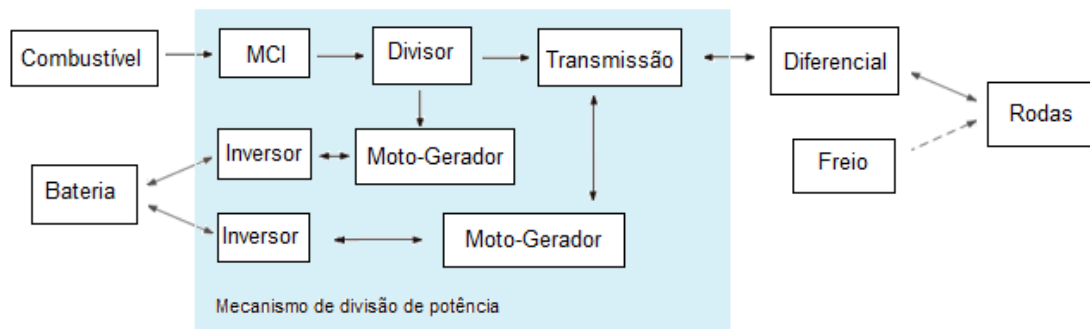
Já no VEH paralelo ambos os motores são utilizados para tracionar o veículo. Nesse contexto, o motor a combustão é auxiliado pelo motor elétrico acoplado mecanicamente a transmissão. A combinação mecânica das potências do motor a combustão e do motor elétrico deixa espaço para várias configurações diferentes [1][3]. A seguir na **Figura 2.2** é possível visualizar o diagrama de blocos de um VEH Paralelo.

Figura 2.2: Diagrama de blocos de um VEH Paralelo

Fonte: (Adaptado de [1]).

2.3.3. Arquitetura Série – Paralelo

Nesta última arquitetura, a configuração mais comum é a utilização de duas máquinas elétricas em série em paralelo com o motor a combustão. A máquina elétrica principal (de maior potência) será responsável pela propulsão do veículo juntamente com o motor a combustão. E a segunda máquina funcionará apenas como um gerador, suprindo a carga da bateria mesmo em momentos em que o motor a combustão estiver operando como motor de propulsão. Geralmente, utiliza-se uma engrenagem planetária para acoplamento do sistema [1][3]. A seguir na **Figura 2.3** é possível visualizar um diagrama de blocos de um VEH Série – Paralelo.

Figura 2.3: Diagrama de blocos de um VEH Série – Paralelo

Fonte: (Adaptado de [1]).

2.4. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas algumas definições sobre o VEH. Foram apresentadas as formas de se classificar basicamente um VEH, que é de acordo com a capacidade da máquina elétrica empregada e de acordo com a arquitetura utilizada para implementação do sistema no veículo. No próximo capítulo será abordado os princípios de funcionamento da máquina elétrica pretendida para utilização no projeto.

3. MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados o princípio de funcionamento da MRC, a topologia escolhida para o projeto, além das características específicas de acionamento e seu respectivo modelo matemático.

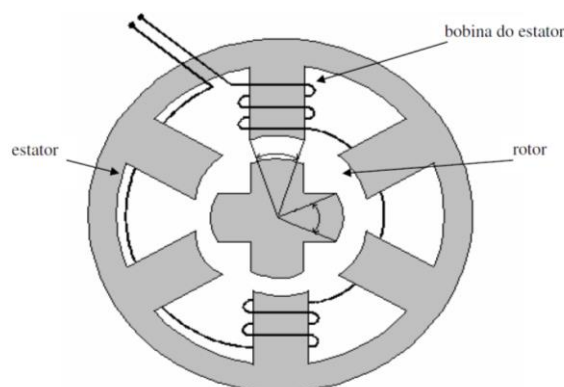
3.2. Princípio de funcionamento

A máquina a relutância chaveada – MRC é um conversor eletromecânico de energia simples, composto de um rotor e um estator laminados e de polos com saliências. Não possui enrolamentos no rotor, tampouco ímãs permanentes ou escovas. Comumente, sua configuração é definida por sua estrutura polar $m \times n$, onde m é o número de polos no estator e n o número de polos no rotor [2]. A máquina utilizada neste trabalho é de topologia 6x4, ou seja, seis polos no estator e 4 polos no rotor.

A MRC é um candidato atrativo para aplicações em regime de velocidade variáveis devido a sua estrutura simples, robusta e de baixo custo [2][4][5][6], além disso, possui uma topologia de conversor confiável e alta eficiência em uma grande faixa de velocidades [3][7][8].

Para acionar esta máquina é necessária uma fonte de excitação de corrente contínua – cc e um sistema, geralmente de sensoriamento, que detecta a cada momento a posição do rotor e envia um sinal para um circuito conversor chaveado que aciona cada fase da MRC individualmente e de forma precisa no tempo. A estrutura da máquina pode ser melhor observada na **Figura 3.1**.

Figura 3.1: Seção transversal de uma MRC de topologia 6x4, destacando a fase A



Fonte: ([2]).

Como pode-se ver na figura 1, um ou mais de um par de polos opostos no estator formam uma fase [2][9], suas bobinas estão conectas em série, dessa forma a mesma corrente percorre ambas.

O conjugado da MRC é produzido a partir da energização das bobinas do estator que compõem uma fase, gerando um campo magnético em torno delas e provocando, através de uma onda de fluxo, a tendência, nos polos do rotor mais próximos a esta, a se alinhar com os respectivos polos do rotor [10]. Dessa forma, a máquina é projetada de forma a sempre fechar um circuito magnético de mínima relutância entre os pares de polos do estator, do rotor e entre a culatra do estator. Um conjugado contínuo é obtido a partir da excitação de cada fase em sincronia com a posição do rotor.

Nessa máquina, as indutâncias dos enrolamentos do estator variam conforme a posição angular do rotor [10]. E esta indutância variável L relaciona-se com a relutância do circuito magnético de acordo com:

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3.1)$$

Onde:

$\mathfrak{R}$ é a relutância magnética;

N é o número de espiras nas bobinas integrantes do circuito.

O número de espiras de cada enrolamento do estator é previamente definido no projeto da máquina. Portanto, as variações nos valores de indutância demonstram-se uma decorrência direta das variações na relutância de forma inversamente proporcional, a qual é definida pela equação a seguir:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3.2)$$

Onde:

μ é a permeabilidade equivalente do circuito magnético;

l é o comprimento médio desse circuito;

A é a área transversal por onde circula o fluxo enlaçado.

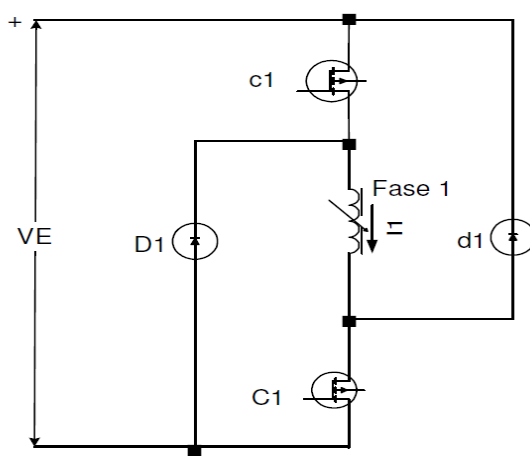
Nessa máquina, devido a dupla saliência, os valores de permeabilidade equivalente e área variam constantemente, ocasionando variações na relutância e consequentemente na indutância.

Então, dadas as características descritas acima e a natureza do circuito conversor, esta máquina é denominada Máquina a Relutância Chaveada ou MRC.

3.3. O conversor e o controle

Um conversor mais utilizado que cumpre o papel de acionar a MRC é o *Half-Bridge* (HB) [2]. Este conversor é composto de duas chaves (MOSFET OU IGBT) e dois diodos para cada fase da máquina, a **Figura 3.2** a seguir, mostra um exemplo de um ramo do HB, responsável pelo acionamento de uma fase da máquina.

Figura 3.2: Conversor Half-Bridge para uma fase da máquina



Fonte: ([2]).

Para que seja possível a utilização do conversor, é necessário implementar o controle dele através de um sistema que detecta a cada instante a posição do rotor e aciona a fase correta no momento determinado a partir do perfil de indutâncias e do modo desejado de funcionamento (motor ou gerador). Assim, o sistema de detecção de posição com menor custo, seria um disco com furos, fixado ao eixo da máquina e um sensor. A partir das leituras do sensor enviadas a um microprocessador é possível que este envie um sinal para controlar as chaves do conversor para acionar as bobinas.

3.4. Modelagem matemática

A MRC é uma máquina que possui enrolamentos somente no estator, estas bobinas quando acionadas por uma tensão recebem um fluxo de corrente e

consequentemente surge um fluxo magnético em torno da bobina que permite que a máquina funcione. A bobina funciona como indutor e o fluxo concatenado nela (λ) é proporcional à corrente (i) que a percorre e a sua indutância (L), dessa forma, tem-se que:

$$\lambda = Li \quad (3.3)$$

E a tensão induzida em um indutor é proporcional ao fluxo concatenado em relação ao tempo:

$$e = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.4)$$

Assim a tensão nas bobinas do estator além da natureza resistiva devido à resistência intrínseca dos materiais possui também uma parcela indutiva relativa à indutância da bobina, dessa forma:

$$v = Ri + e \quad (3.5)$$

Onde:

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.6)$$

Como o fluxo concatenado é dependente de duas variáveis, indutância e corrente, é necessário fazer a derivada parcial, onde após a resolução, tem-se:

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.7)$$

Como a derivada da posição angular do rotor (θ) é a velocidade angular:

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i\omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3.8)$$

A equação acima descreve eletricamente a MRC, entretanto é necessário mais uma equação para que seja possível definir seu comportamento mecânico. Para isso,

será feito o equacionamento das forças de forma que fiquem equilibradas. Dessa forma, a energia que entra no sistema irá gerar um conjugado eletromagnético, T_{emg} . E esta entrada irá gerar um conjugado mecânico, T_{mec} , na saída do sistema. Por fim, será necessário ainda que a máquina seja capaz de vencer a inércia do sistema e o atrito dinâmico dos mancais [2]. Portanto:

$$T_{emg} = T_{mec} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.9)$$

Onde:

D é o coeficiente de atrito viscoso do sistema;

J é o momento de inércia do sistema.

O conjugado eletromagnético é [8]:

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.10)$$

As equações 3.8 e 3.9 definem de maneira completo o funcionamento da MRC para uma fase, como a máquina analisada é trifásica precisaremos utilizar uma matriz para que todas as fases sejam consideradas no modelo. Sendo assim, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ -T_{mec} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ -i_1 r_1 & -i_2 r_2 & -i_3 r_3 & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & i_1 \frac{\partial L_1}{\partial \theta} \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & i_2 \frac{\partial L_2}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & i_3 \frac{\partial L_3}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Onde:

$$r_1 = \frac{1}{2} \frac{dL_1}{d\theta}; r_2 = \frac{1}{2} \frac{dL_2}{d\theta}; r_3 = \frac{1}{2} \frac{dL_3}{d\theta}$$

$\dot{I}_1$ é a derivada da corrente 1 em relação ao tempo;

$\dot{I}_2$ é a derivada da corrente 2 em relação ao tempo;

$\dot{I}_3$ é a derivada da corrente 3 em relação ao tempo;

$\dot{\omega}$ é a derivada da velocidade angular em relação ao tempo;

$\dot{\theta}$ é a derivada da posição do rotor em relação ao tempo;

3.5. Conclusão

Este capítulo apresentou as características básicas de funcionamento da MRC especificamente de topologia 6x4, escolhida para realização do trabalho e a modelagem matemática da máquina que será utilizada na simulação que será apresentada no capítulo a seguir.

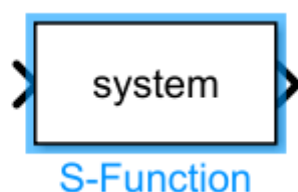
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MRC

4.1. Introdução

Neste capítulo, será demonstrado o processo de desenvolvimento do modelo de simulação da MRC trifásica de topologia 6x4 de 1 cv, na ferramenta MATLAB® SIMULINK. A simulação aqui demonstrada tem como base [11], onde pode ser visto o projeto completo da máquina. Além disso, serão demonstrados os resultados obtidos a partir da simulação do modelo.

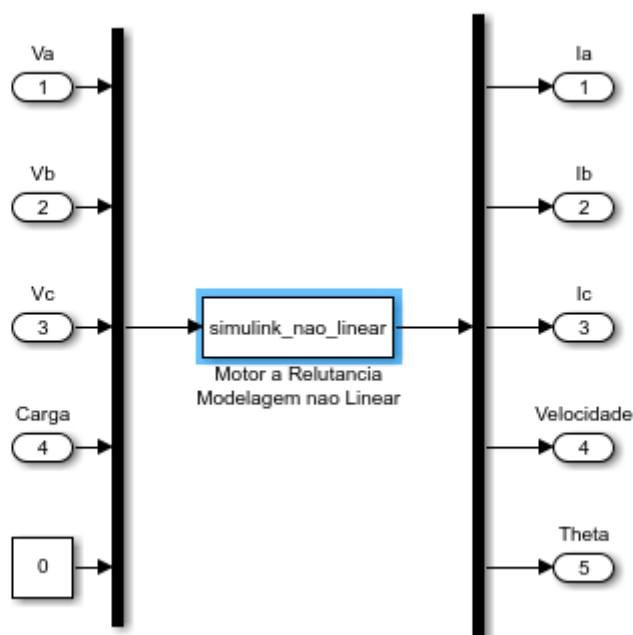
4.2. Definições Iniciais

O projeto como um todo funciona em torno de um script principal desenvolvido no MATLAB®, chamado de “Simulink não linear”. Neste script são inicializadas duas matrizes 5x5 de zeros. Estas matrizes são utilizadas para representar a matriz de estado 3.11 apresentada no capítulo 3. A primeira matriz corresponde a matriz das resistências que será chamada de Matriz A e a segunda corresponde a matriz de indutâncias que será chamada de Matriz B. Em seguida, de acordo com a matriz de estado, são inseridos os valores correspondentes a cada posição das matrizes. Inicialmente, dispõe-se apenas dos valores das constantes que correspondem aos aspectos construtivos da máquina, que são a resistência da bobina (RA), o coeficiente de inércia do sistema (J) e o coeficiente de atrito viscoso (D). Para este trabalho os valores adotados para as constantes foram respectivamente $0,32 \Omega$, $6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e $8 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$. Os demais valores restantes para preencher as matrizes precisam ser obtidos. Para isso, além da criação de outros scripts foi utilizada a ferramenta SIMULINK para desenvolver circuitos auxiliares na obtenção dos valores. Mas, para ser possível a interação de scripts feitos no MATLAB® e os blocos desenvolvidos no SIMULINK é necessário que haja uma integração dos scripts no ambiente de simulação. Na **Figura 4.1** é mostrado o bloco S – Function, bloco do SIMULINK que possibilita esta integração de scripts com a simulação.

Figura 4.1: Bloco S-Function do SIMULINK

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Dessa forma, todas as variáveis de entrada e saída do script principal podem ser entradas e saídas deste bloco do SIMULINK e consequentemente podem se relacionar com o restante do sistema que será construído. Na **Figura 4.2** é possível visualizar o bloco com o script já integrado ao SIMULINK.

Figura 4.2: Bloco de integração do script principal

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Assim as variáveis de entrada serão os valores que ainda necessitam ser obtidos para que seja possível obter a matriz de estados por completo. E as variáveis de saída são as que se deseja obter como resultados da simulação. Neste caso, as variáveis de entrada são as tensões de alimentação das fases e as de saída são as correntes de cada fase, a posição do rotor e a velocidade angular. Vale destacar uma entrada deste bloco que está nomeada como *Carga*. Esta representa a carga no eixo da MRC e é modelado de acordo com a equação:

$$C_c = C_0 + K \cdot \omega^2 \quad (4.1)$$

Onde:

C_0 é o conjugado mínimo requerido da máquina e nesse caso considerado igual a 0;

$K = 3,7089 \cdot 10^{-4} \text{N}\cdot\text{m};$

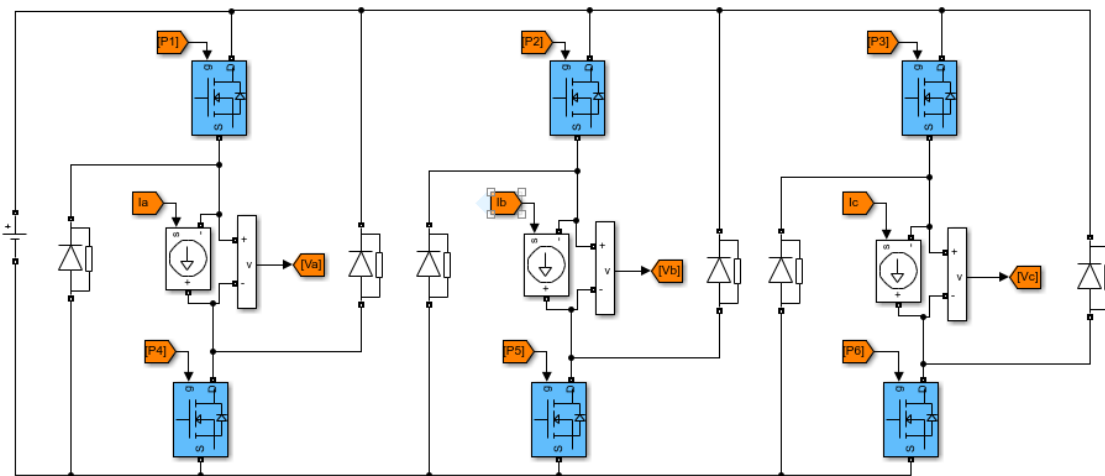
ω é a velocidade angular instantânea do rotor;

C_c é o conjugado resultante.

4.3. Desenvolvimento do modelo do conversor e do controle

Para obter as tensões de fase foram utilizados recursos do SIMULINK para desenvolver o conversor para gerar as tensões almejadas. Na **Figura 4.3**, é possível visualizar a estrutura do conversor.

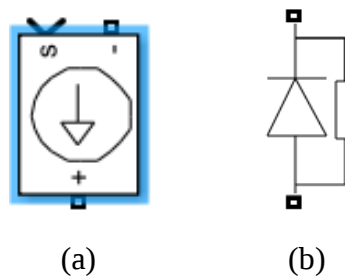
Figura 4.3: Conversor Half-Bridge desenvolvido no SIMULINK



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como pode ser observado na imagem acima, foram utilizados praticamente quatro componentes para construção do conversor. O primeiro deles é uma fonte controlada de corrente, esta representa as bobinas da MRC. Outro componente utilizado é o diodo, ambos são apresentados na **Figura 4.4**.

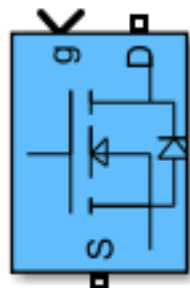
Figura 4.4: a) Bloco da fonte controlada por corrente b) Bloco do diodo ambos provenientes do SIMULINK



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O terceiro componente é um MOSFET. Este componente é um transistor de efeito de campo que possui três terminais, porta (gate), dreno (drain) e fonte (source). Ao receber um pulso de tensão entre a porta e a fonte, permite a passagem de corrente do dreno para a fonte. Dessa forma, realiza a função de chave do circuito, permitindo ou não a passagem de corrente que alimenta a bobina. No HB cada fase possui dois MOSFET que devem ser acionados juntos para permitirem a passagem de corrente pela bobina. A seguir o bloco que representa o MOSFET é apresentado na **Figura 4.5**.

Figura 4.5: Bloco do MOSFET do SIMULINK



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Assim, estes componentes são utilizados nos três ramos correspondentes a cada fase. E as saídas deste bloco serão as tensões de fase que alimentam as bobinas da máquina. Entretanto, para que as chaves atuem no momento correto é necessário que seja enviado um sinal a partir do conhecimento da posição do rotor. Para realizar esta função foi criado mais um script que monitora a posição do rotor e envia um sinal para os MOSFET respectivos a fase que deve ser energizada.

O script responsável pelo controle das chaves é chamado “Simulink-Chaves”. A variável de entrada é o ângulo de fase que representa a posição do rotor. Este ângulo é

ajustado para valores entre 0° e 90° graus. A partir disso, como a máquina é trifásica são definidas três faixas de valores para os ângulos, a primeira entre 45° e 75° graus, a segunda entre 15° e 45° graus e a terceira entre 75° e 90° e entre 0° e 15° graus. Essas faixas de valores são os valores para os quais cada fase é acionada. Assim, como foi comentado anteriormente, o conversor possui dois MOSFET por fase, do mesmo modo, o script possui duas variáveis de saída, em cada faixa de valores são enviados dois sinais um para cada chave da respectiva fase. Este script também deve ser integrado ao SIMULINK para isso foi utilizado o bloco *Interpreted MATLAB Function*, o qual pode ser visualizado na **Figura 4.6** a seguir.

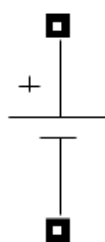
Figura 4.6: Bloco Interpreted MATLAB Function



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O último componente é um bloco do SIMULINK que representa uma fonte de tensão de corrente contínua configurada neste projeto para 800 V. Na Figura 4.7 é possível visualizar esse bloco.

Figura 4.7: Bloco fonte de tensão de corrente contínua



Fonte: (Elaborado pelo autor).

4.4. Obtenção dos valores de Indutância de fase sua respectiva Derivada

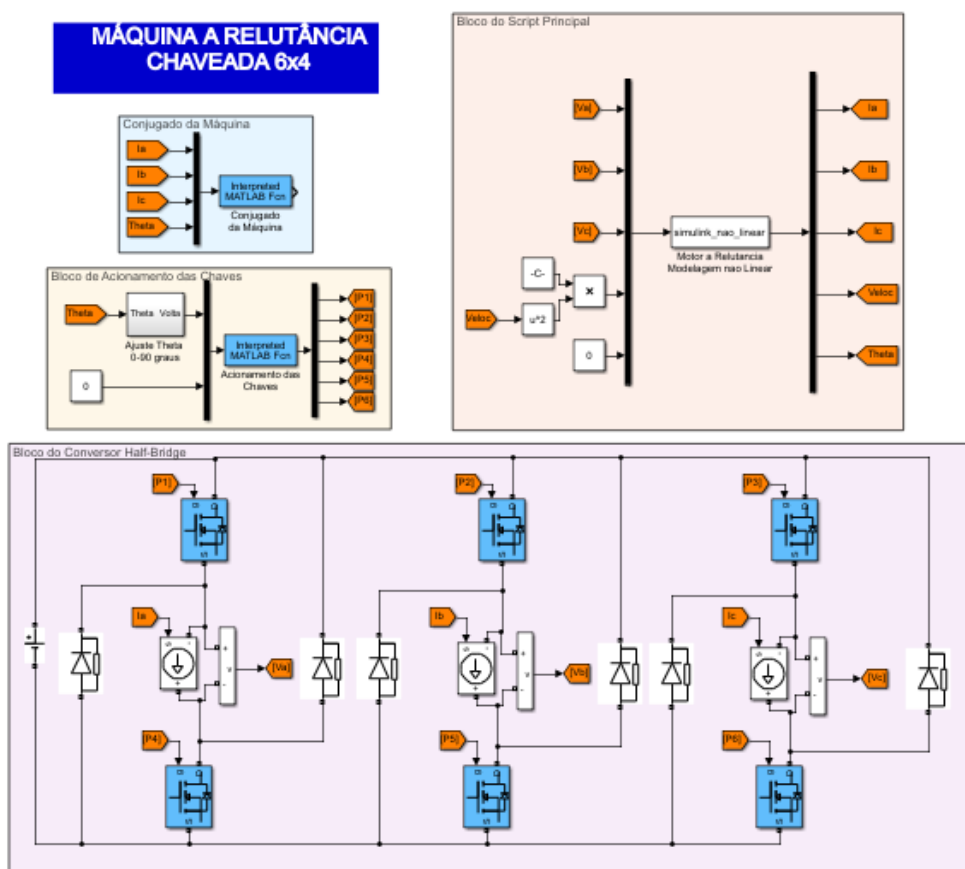
Por último, os valores restantes para completar a matriz de estados são as indutâncias de fase e suas derivadas. Para obtê-los foi criado mais um script. Desta vez, a função desenvolvida tem como parâmetros a corrente e o ângulo de fase. O ângulo é ajustado para valores entre 0 e 45 graus. Além disso, foi utilizada uma matriz de

coeficientes e a função *polyval*, nativa do MATLAB®, que recebe como parâmetros a matriz de coeficientes na linha correspondente ao ângulo ajustado, gerando um vetor de coeficientes e recebe também o valor de corrente como parâmetro, que por sua vez, é o ponto no qual o polinômio é avaliado. O resultado é o valor de indutância de fase. Este valor é comparado ao valor seguinte encontrado de indutância e então derivado em relação ao ângulo de fase, obtendo a derivada da indutância.

4.5. Resultados Obtidos

Enfim, com todos os valores obtidos é possível realizar a simulação da MRC de topologia 6x4 trifásica. O modelo final da máquina é mostrado na **Figura 4.7**. Pode ser observado também que o conjugado da MRC não é um produto direto do modelo da máquina que foi desenvolvido e sim obtido a partir dos valores de corrente e do ângulo de fase. Através destes valores foi desenvolvido outro script que implementa a equação 3.10 para as três fases. Este script da mesma forma que o anterior foi integrado ao SIMULINK através do *Interpreted MATLAB Function*.

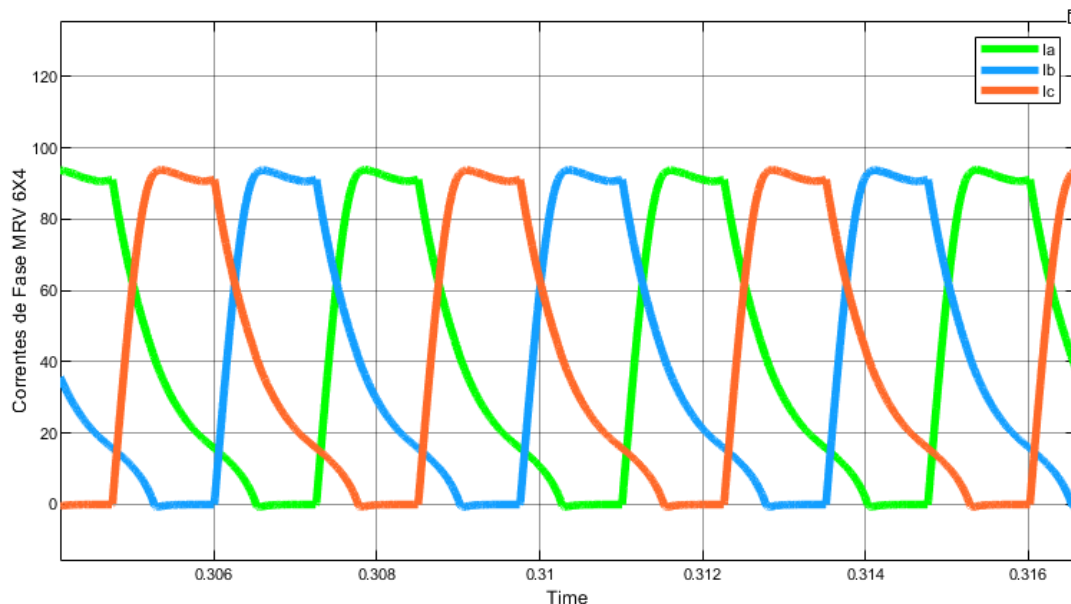
Figura 4.7: Modelo Final da MRC topologia 6x4



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Os resultados obtidos a partir da simulação do modelo acima apresentado são mostrados nas figuras a seguir. Na **Figura 4.8** é possível visualizar as correntes de fase.

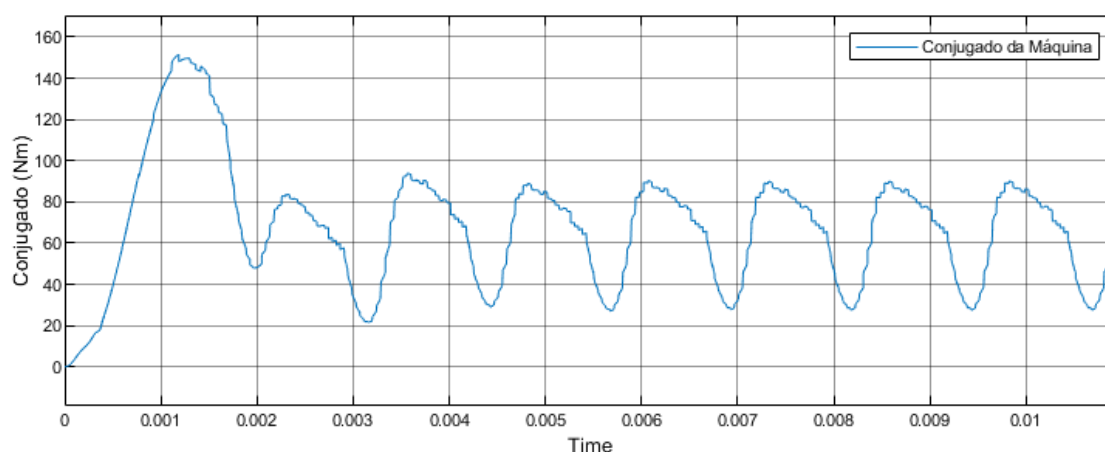
Figura 4.8: Correntes de fase distintas através de cores



Fonte: (Elaborado pelo autor).

As correntes da figura acima referem-se as correntes de fase, distintas através das cores e pode-se notar que estão em consonância com o que é apresentado em trabalhos como [12][13][14]. Também foi obtido o conjugado da MRC, como pode ser visto na **Figura 4.9**.

Figura 4.9: Conjugado em N.m da MRC de topologia 6x4



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como pode-se visualizar na imagem acima, a característica pulsante do conjugado da MRC é evidenciada e demonstra estar de acordo com [2][15].

4.6. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o processo de desenvolvimento do modelo para simular a MRC trifásica de topologia 6x4 de apenas 1 cv. Foi possível demonstrar os componentes utilizados no ambiente SIMULINK, além dos scripts criados para que fosse possível a realização do modelo. Foram também apresentados os resultados da simulação, as correntes de fase e o conjugado obtido. Foi possível analisar que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois estavam de acordo com outros trabalhos que apresentaram resultados semelhantes, demonstrando que o desenvolvimento do modelo foi bem-sucedido.

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MCI E DOS COMPONENTES MECÂNICOS DO VEÍCULO

5.1. Introdução

Este capítulo destina-se a descrever o desenvolvimento do modelo do motor a combustão e dos demais componentes mecânicos utilizados para modelar o veículo no SIMULINK como: corpo do veículo, diferencial, pneus, rodas e transmissão.

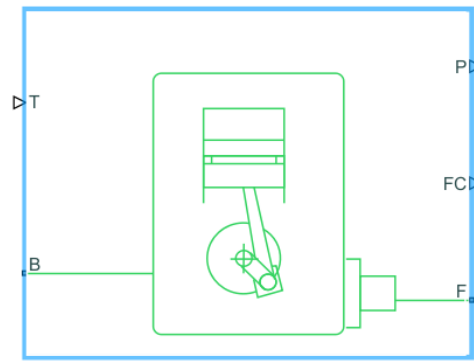
5.2. Definições Iniciais

A biblioteca base usada para modelagem destes componentes é a *SimScape*. Ela permite criar rapidamente modelos de sistemas físicos no ambiente SIMULINK e construir modelos de componentes físicos baseados em conexões físicas que se integram diretamente a diagramas de blocos e outros paradigmas de modelagem [16]. Esta biblioteca pode ser utilizada para desenvolver sistemas mecânicos, hidráulicos, elétricos, automotivos e diversos outros.

5.3. Motor a Combustão Interna

O bloco utilizado para construir o modelo do Motor a Combustão Interna (MCI) foi o *Generic Engine* da *SimScape*. Este bloco representa um motor de combustão interna configurável que é adequado para aplicações de ignição por faísca e diesel. Ele pode ser controlado através de um comando de torque ou um sinal físico de aceleração normalizado. Ele também pode ser parametrizado por um polinômio de terceira ordem ou usando dados de torque ou potência tabulados. Os parâmetros dinâmicos opcionais incluem inércia do virabrequim e atraso no tempo de resposta. Uma porta de sinal físico emite a taxa de consumo de combustível do motor com base no modelo de consumo de combustível escolhido. Além disso, é possível determinar a potência máxima que pode ser entregue pelo motor e outros parâmetros como a velocidade angular máxima do virabrequim, velocidade de corte do motor, entre outros. Nesse caso, a potência máxima escolhida para o MCI foi de 53 kW, aproximadamente 72 cv. Na **Figura 5.1** a seguir, é possível visualizar a representação deste bloco no SIMULINK.

Figura 5.1: Bloco Generic Engine

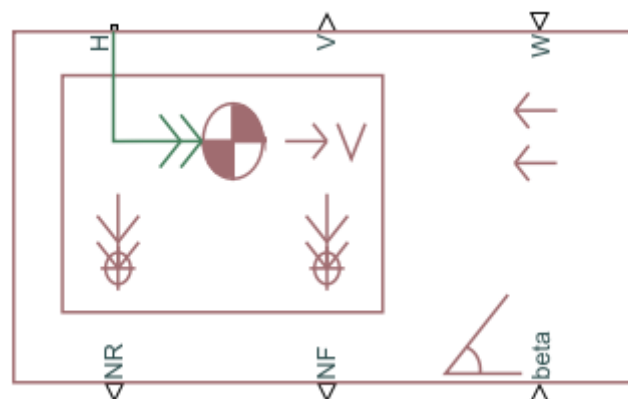


Fonte: (Elaborado pelo autor).

5.4. Corpo do Veículo

O bloco *Vehicle Body*, também da biblioteca *SimScape*, foi utilizado para modelar o corpo do veículo. Este bloco representa uma carroceria de veículo de dois eixos em movimento longitudinal. O bloco considera a massa do veículo, o arrasto aerodinâmico, a inclinação da estrada, o centro de gravidade e a distribuição de peso entre os eixos devido à aceleração e ao perfil da estrada. Todos esses dados são variáveis que podem ser alteradas de acordo com o projeto do usuário. Na **Figura 5.2** a seguir, é possível ver a representação deste bloco.

Figura 5.2: Bloco *Vehicle Body*



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Além disso, este bloco possui entradas para conexão com rodas e seus respectivos pneus, por meio destas se dá origem o movimento horizontal da carroceria do veículo. Através do torque de entrada, por meio dos blocos das rodas, e dos

parâmetros anteriormente determinados, o bloco Vehicle Body é capaz de calcular a força resultante e projetar a velocidade do veículo que é possível de ser visualizada pela saída, na porta V da Figura acima. Na **Tabela 5.1** estão os valores utilizados como parâmetros desta modelagem.

Tabela 5.1: Parâmetros do bloco Vehicle Body

Parâmetros - Vehicle Body	
Massa do Veículo	900 Kg
Altura Centro de Massa	254 mm
Coefficiente de arrasto aerodinâmico	1.2
Distância do Centro de Massa ao Eixo Dianteiro	1600 mm
Distância do Centro de Massa ao Eixo Traseiro	1400 mm
Área frontal	1.33 m ²

Fonte: (Elaborado pelo autor).

5.5. Pneus e Rodas

Os blocos de pneus e rodas são representados pelo mesmo bloco denominado, *Tire (Magic Formula)*. Este bloco também pertence a biblioteca *SimScape* e representa um pneu com comportamento longitudinal dado pela Fórmula Mágica, uma equação empírica baseada em quatro coeficientes de ajuste [16]. A partir destes quatro coeficientes e do valor de entrada referente ao torque, é gerado um sinal associado ao deslizamento efetivo entre o pneu e a estrada. Os quatro coeficientes utilizados nessa modelagem foram: 10; 1.9; 1; 0,97. Na **Figura 5.3** a seguir, é possível visualizar a imagem representativa do bloco.

Figura 5.3: Bloco *Tire (Magic Formula)*

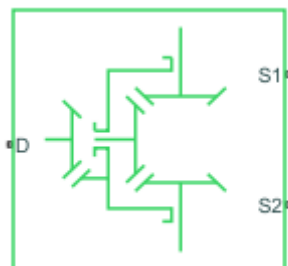


Fonte: (Elaborado pelo autor).

5.6. Diferencial

O bloco utilizado para modelar o diferencial do veículo foi o *Differential*. Este bloco da *SimScape* representa um mecanismo de engrenagem que permite que os eixos acionados girem em velocidades diferentes. O bloco possui três portas, uma que representam o eixo de transmissão longitudinal e outras duas que representam os eixos da engrenagem solar do diferencial [16]. A **Figura 5.4** a seguir, mostra a imagem representativa do bloco *Differential* no SIMULINK.

Figura 5.4: Bloco *Differential*



Fonte: (Elaborado pelo autor).

5.7. Transmissão

O bloco da transmissão do veículo é conectado após o acoplamento dos motores e antes do diferencial. Assim como os outros, é um bloco provido pela biblioteca *SimScape* e executa a função de transmitir a potência gerada pelo motor às rodas através de um conjunto de engrenagens de tamanhos diferentes. A troca de marchas foi modelada de forma a acontecer automaticamente. Foi utilizado o bloco Chart para criar uma relação para troca de marchas de acordo com a velocidade do veículo.

5.8. Conclusão

Neste capítulo foi demonstrado o processo de construção do modelo do MCI e dos componentes mecânicos básicos de um veículo que são necessários para viabilizar o seu funcionamento no ambiente de simulação. Com a parte mecânica desenvolvida, o próximo passo é relacionar todas as peças de forma que trabalhem juntas com a MRC e construir o modelo final do veículo.

6. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO VEÍCULO

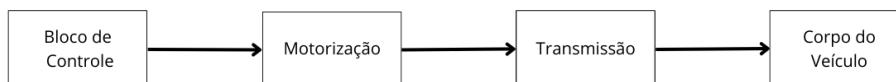
6.1. Introdução

Neste capítulo será abordado a construção do modelo do veículo, inclusive o controle necessário para que fosse possível realizar a simulação dinâmica dele. Os componentes mostrados nos capítulos anteriores foram modelados em uma sequência de etapas para que no final fosse possível colocar todos juntos para formarem o modelo final do veículo.

6.2. Definições Iniciais

Para a finalização do modelo os componentes anteriormente foram unidos em um único projeto e dispostos no SIMULINK de forma que juntos pudessem formar o veículo em si. A sequência lógica para construção do modelo pode ser vista no diagrama de blocos na **Figura 6.1** a seguir.

Figura 6.1: Diagrama de Blocos do Modelo Computacional



Fonte: (Elaborado pelo autor).

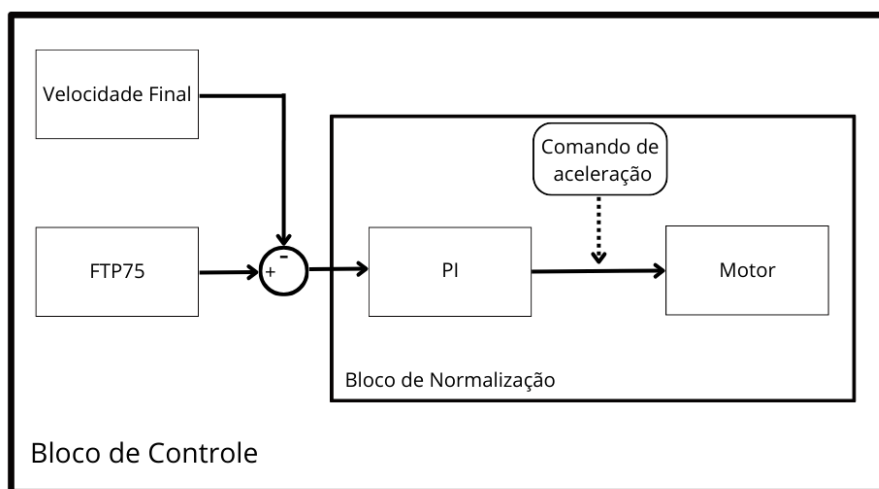
As únicas partes que não foram descritas até este momento foram, a de controle que é composta pelo bloco Ciclo de Condução (*Drive Cycle*) e pelos blocos que normalizam o comando para os motores e a de acoplamento dos motores. Eles serão mostrados no próximo tópico. Além deles, os outros já explicados foram conectados de forma a funcionarem juntos.

O bloco motorização carece de uma atenção especial também, pois este bloco será caracterizado de duas formas diferentes. Em um primeiro momento, ele irá conter apenas o MCI, resultando em uma primeira simulação. E em um segundo momento, será composto pelo MCI e pela MRC 6x4 acoplados mecanicamente, gerando a simulação do VEH. Dessa forma, será possível simular dois veículos e comparar os efeitos no desempenho gerado pela máquina elétrica. Este assunto será abordado no próximo capítulo.

6.3. Bloco de Controle

Este bloco é composto pelo comando de velocidade que é gerado pelo bloco do Ciclo de condução em seguida esse comando é comparado com a realimentação da velocidade do veículo e passa por um controle Proporcional Integral (PI) que gera o comando de aceleração para os motores. Na **Figura 6.2** está disposto um diagrama de blocos demonstrando o esquema utilizado.

Figura 6.2: Diagrama de Blocos do Bloco de Controle



Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3.1. Ciclo de Condução (Drive Cycle)

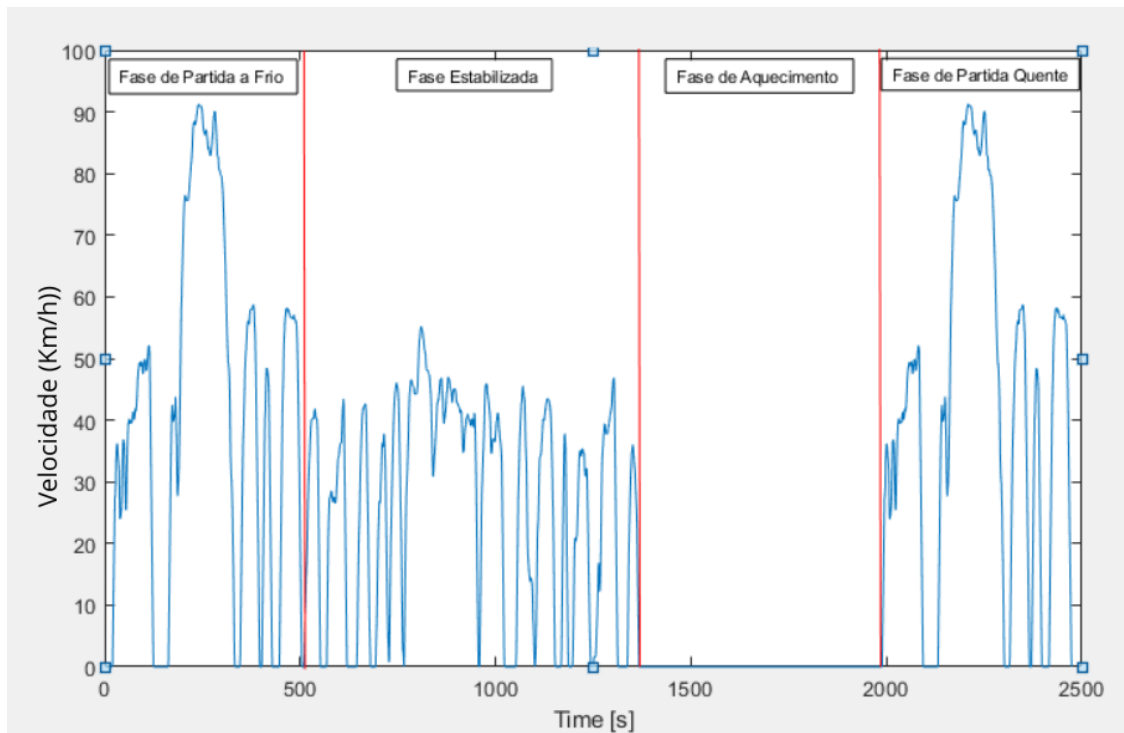
O ciclo de condução é um procedimento que tem o objetivo de simular um padrão de condução próximo da realidade. Ele é utilizado para avaliação de emissões de poluentes e consumo de combustível de veículos. É composto por um conjunto de vários fatores como: velocidade, distância, aceleração, tempo de condução, duração e frequência de partidas e paradas.

Na Norma Brasileira (NBR 6601), o ciclo de condução adotado para determinação de emissões em veículos leves e comerciais leves é o ciclo norte-americano, o Federal Test Procedure 75, mais conhecido como FTP75. Existem outros ciclos de testes empregados no mundo: como o Europeu (NEDC - New European Drive Cycle), e o Japonês (JP1015 – Japan 10-15 mode) [17].

Neste trabalho, o ciclo de condução escolhido foi o FTP75, principalmente por já ser o procedimento oficial utilizado na Norma Brasileira. Este ciclo é composto por

quatro fases diferentes e possui um tempo total de 2474 segundos, a **Figura 6.3** mostra o gráfico do FTP75 e suas respectivas fases.

Figura 6.3: Gráfico do Ciclo de Condução FTP75 e suas fases



Fonte: (Elaborado pelo autor).

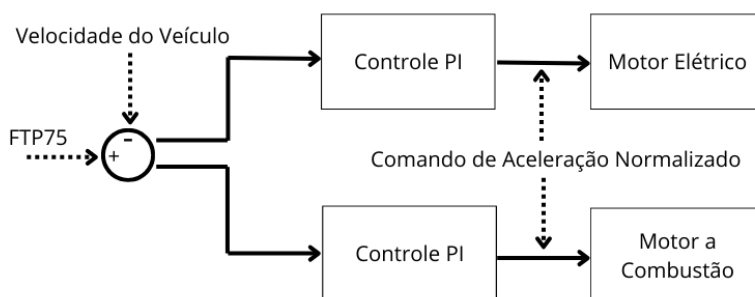
Neste trabalho, foram utilizados os primeiros 1000 segundos do FTP75 para os testes e simulações. Neste período do ciclo o veículo atinge sua velocidade máxima de 91.25 Km/h, além disso, possui uma boa frequência de partidas e paradas que serão suficientes para testar o desempenho do veículo a partir do acoplamento da MRC.

6.3.2. Bloco de normalização

Este bloco tem como objetivo receber o comando de referência de velocidade e entregar o comando correto de aceleração para os motores. Ele é um dos menores blocos, porém tem um papel fundamental no funcionamento da simulação. Tanto o MCI quanto a MRC possuem entradas de aceleração com limites e alcances diferentes. O MCI possui uma entrada que aceita valores de 0 até 1, qualquer valor acima de 1 estará limitado na aceleração máxima do motor. Já a MRC, está sendo controlada através de uma fonte de tensão de alimentação variável, que está limitada a 200 V, inclusive, isso foi uma alteração feita em relação ao modelo apresentado no capítulo 4, no qual, a máquina está sendo alimentada por uma tensão fixa de 800V (o valor de tensão foi

alterado devido a questão do acoplamento que será visto adiante). Portanto, nota-se um problema, já que, o valor de referência de velocidade está em uma faixa de valores diferentes e não consegue fornecer diretamente o dado de velocidade para as respectivas entradas de aceleração dos motores. Além disso, antes mesmo de fornecer algum valor para os motores, a saída do bloco do ciclo de condução deve ser comparada com a velocidade final do veículo. Em seguida o valor obtido desta comparação é normalizado para cada uma das entradas de aceleração dos motores. Este processo de normalização é feito através de um bloco PI. Portanto, o resultado obtido para este bloco no SIMULINK pode ser melhor observado no diagrama de blocos disposto na **Figura 6.4**.

Figura 6.4: Diagrama de Blocos do Bloco de Normalização

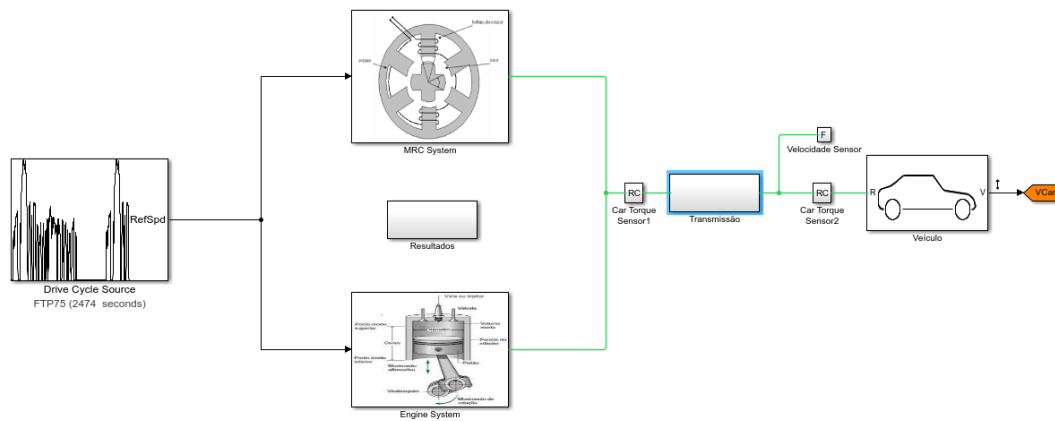


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.4. Montagem do Modelo do Veículo

Conforme o diagrama de blocos representado na Figura tal, para obter o modelo final do veículo, o bloco de controle é conectado diretamente aos motores enviando o comando de aceleração. Logo após, os motores são acoplados mecanicamente através do bloco *Simple Gear*, este conecta-se ao bloco da transmissão que envia o torque gerado para o diferencial e por sua vez as rodas. Sendo possível gerar o resultado da velocidade do veículo através do bloco *Vehicle Body*. Os blocos *Vehicle Body*, *Tire (Magic Formula)* e *Differential* estão juntos em um mesmo subsistema do SIMULINK de forma a facilitar a organização dos componentes. Na **Figura 6.5**, é possível visualizar o modelo final obtido no SIMULINK.

Figura 6.5: Modelo Final do Veículo desenvolvido no Matlab/Simulink



Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.5. Conclusão

Neste capítulo foi possível visualizar o modelo final construído no SIMULINK, bem como os últimos componentes que faltavam para ser possível realizar a simulação. O próximo capítulo irá mostrar a simulação deste modelo e os resultados obtidos a partir dela.

7. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

7.1. Introdução

Este capítulo irá tratar a respeito da execução das simulações e os resultados obtidos a partir dela. Foram executadas duas simulações diferentes para que fosse possível a comparação entre o desempenho do veículo puramente a combustão e o desempenho do VEH utilizando a MRC 6x4, ambas serão explicadas e os resultados apresentados.

7.2. Definições Iniciais

O modelo desenvolvido no último capítulo foi de um VEH, ou seja, um veículo composto por dois motores, um a combustão interna e outro, elétrico. Para que fosse possível observar com melhor clareza quais os impactos no desempenho veículo que a adição da MRC causaria, deveria haver resultados anteriores do veículo movido somente com o MCI, com os mesmos critérios e condições de forma que a comparação dos resultados pudesse gerar conclusões confiáveis.

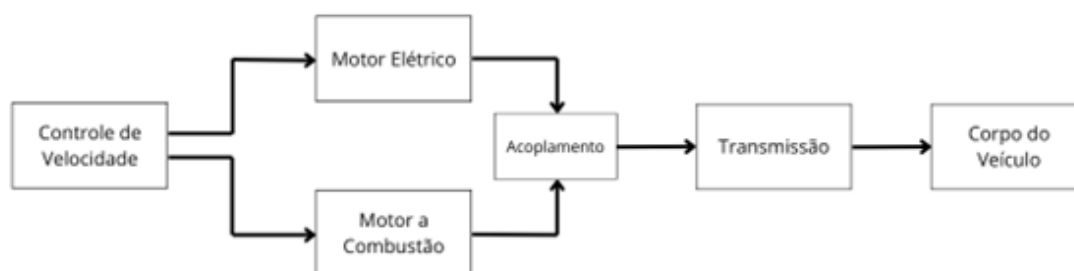
Dessa forma, foi desenvolvido um segundo modelo de veículo, similar ao do capítulo anterior, porém, sem a MRC. Os dados gerados através da simulação deste modelo serviram de referência para análise dos resultados do VEH. Na **Figuras 7.1** a simulação puramente a combustão foi representada em um diagrama de blocos para facilitar a compreensão.

Figura 7.1: Diagrama de Blocos da Simulação Puramente a Combustão



Fonte: (Elaborado pelo autor).

E na **Figura 7.2** é possível ver o diagrama de blocos que representa a simulação híbrida.

Figura 7.2: Diagrama de Blocos da Simulação Híbrida

Fonte: (Elaborado pelo autor).

7.3. A Questão do Acoplamento

O acoplamento entre os motores foi uma das principais problemáticas encontradas para a realização do projeto. A primeira proposta desenvolvida foi acoplar os motores através de uma caixa de engrenagens e realizar a sincronização dos seus conjugados. Ambos os motores possuem um conjugado pulsante e a intenção inicial era sincronizar esses pulsos para que os motores conseguissem trabalhar em conjunto de forma eficiente. Para realizar a sincronização foi utilizado um controle através da tensão de alimentação e foi obtido êxito no processo, entretanto, foi necessária uma tensão de alimentação elevada o que ocasionou, além do inconveniente valor de tensão, um conjugado maior do que o gerado pelo MCI, fazendo com que o veículo fosse tracionado, praticamente, pela MRC, logo, não gerou um resultado satisfatório de acordo com a ideia do projeto que é o modelo de um VEH onde o MCI é o motor principal do veículo. Para continuar a ideia de sincronização dos pulsos poderia ser utilizada outra estratégia de controle da MRC, porém, as estratégias avaliadas eram mais complexas e seria necessário desenvolver um trabalho exclusivo para estudar o assunto.

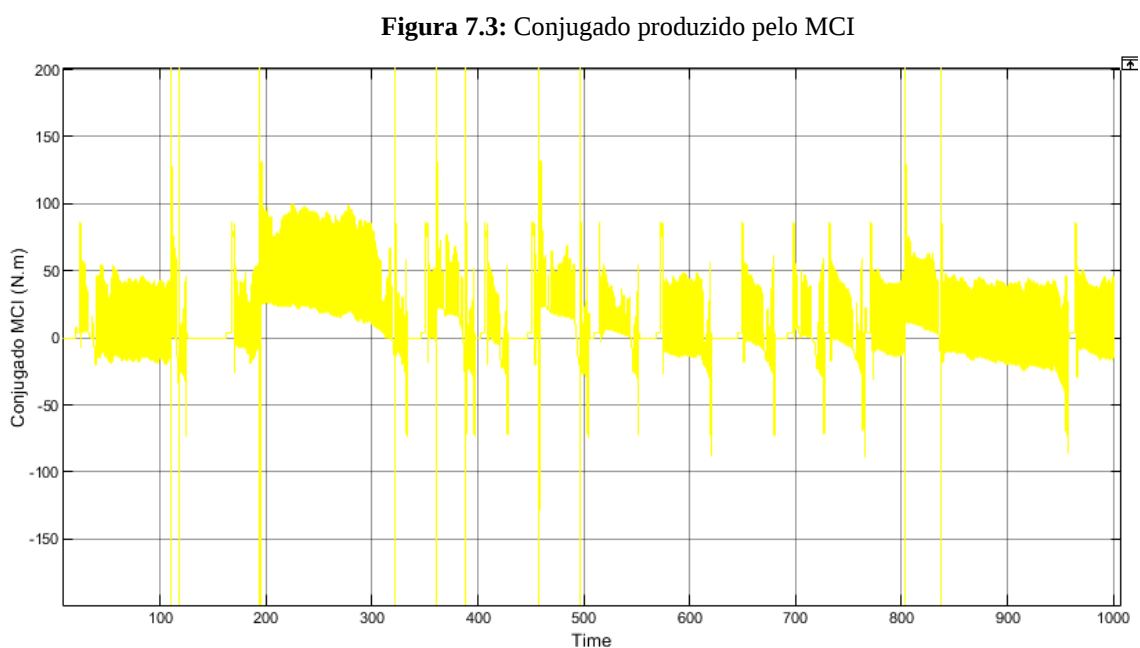
Por esses motivos, foram buscadas outras formas para viabilizar o acoplamento. A outra opção analisada seria utilizar uma engrenagem planetária. A engrenagem planetária é uma peça mais utilizada em transmissões veiculares e aplicações industriais. Ela é uma peça composta por uma engrenagem principal chamada de solar que atua como entrada do conjunto, três ou mais engrenagens satélites que giram em torno da engrenagem solar e uma engrenagem anelar que fica na parte externa em contato com as engrenagens satélites. Todos os veículos híbridos da fabricante Toyota utilizam a engrenagem planetária como acoplamento dos seus motores (uma máquina elétrica principal, outra auxiliar de capacidade inferior e o MCI) desde os primeiros modelos lançados. Na aplicação deste trabalho, o modelo do veículo difere em certas

características do desenvolvido pela Toyota. Uma das principais diferenças é a arquitetura de VEH. Os veículos híbridos da Toyota utilizam uma Arquitetura Série Paralelo, onde são utilizadas duas máquinas elétricas. Utilizar a engrenagem planetária neste caso traz diversas vantagens, já que possibilita o controle de cada motor individualmente. Na aplicação deste trabalho, além de estar utilizada somente uma máquina elétrica, o fato de que os motores podem ser acoplados e controlados individualmente não resolve a problemática da sincronização dos motores para que atuem em conjunto, pelo contrário, cria a necessidade de haver um controle de acionamento ainda mais complexo para que um não prejudique o funcionamento do outro.

Por fim, a estratégia escolhida para o acoplamento dos motores foi uma conexão direta, utilizando somente uma engrenagem, de forma que a MRC e o MCI funcionem juntos a todo instante. Desse modo, como a MRC possui um sistema de leitura da posição angular do rotor a cada instante, ela tende a adaptar o seu acionamento a velocidade de giro do eixo do MCI.

7.4. Resultados da Simulação do Veículo Puramente a Combustão

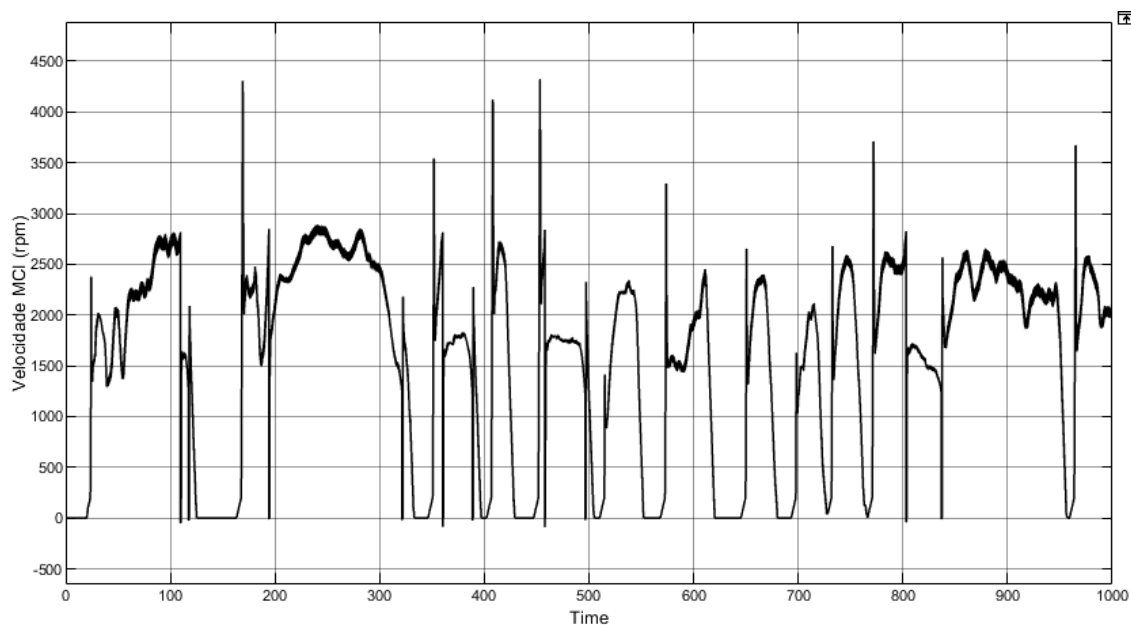
Os resultados obtidos a partir da simulação puramente a combustão do veículo, podem ser vistos a seguir. Na **Figura 7.3** é possível ver o conjugado gerado pelo MCI.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na Figura anterior é possível ver a característica pulsante do conjugado produzido pelo MCI e na **Figura 7.4** a seguir, é possível ver a velocidade de rotação do MCI durante o período avaliado.

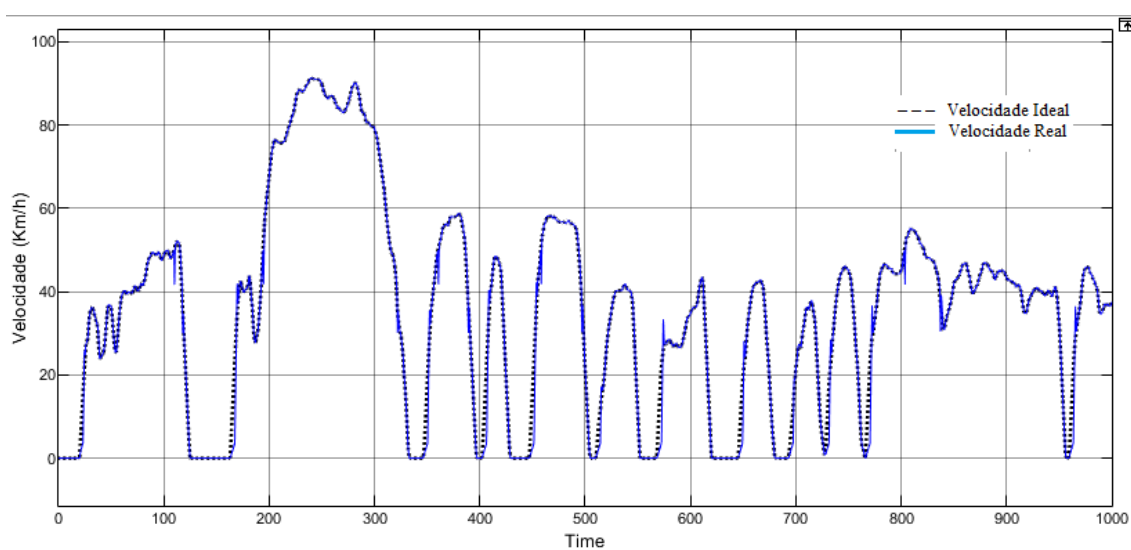
Figura 7.4: Velocidade de Rotação do MCI



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Já na **Figura 7.5**, é possível ver o desempenho do veículo utilizando somente o MCI, visualizando sua velocidade de saída em comparação com a o comando de entrada do FTP75.

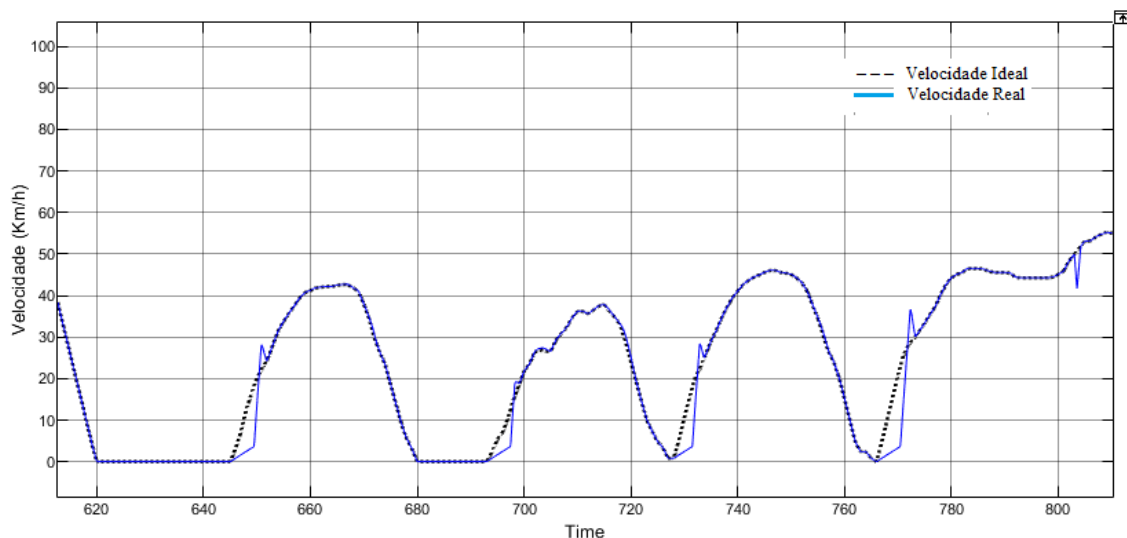
Figura 7.5: Comparação da Velocidade de saída com o Comando de Entrada do FTP75



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A seguir, foi realizado uma aproximação na **Figura 7.5** para que fosse observado em detalhe o desempenho do veículo em momentos de parada e partida. O destaque feito na Figura anterior pode ser visto na **Figura 7.6**.

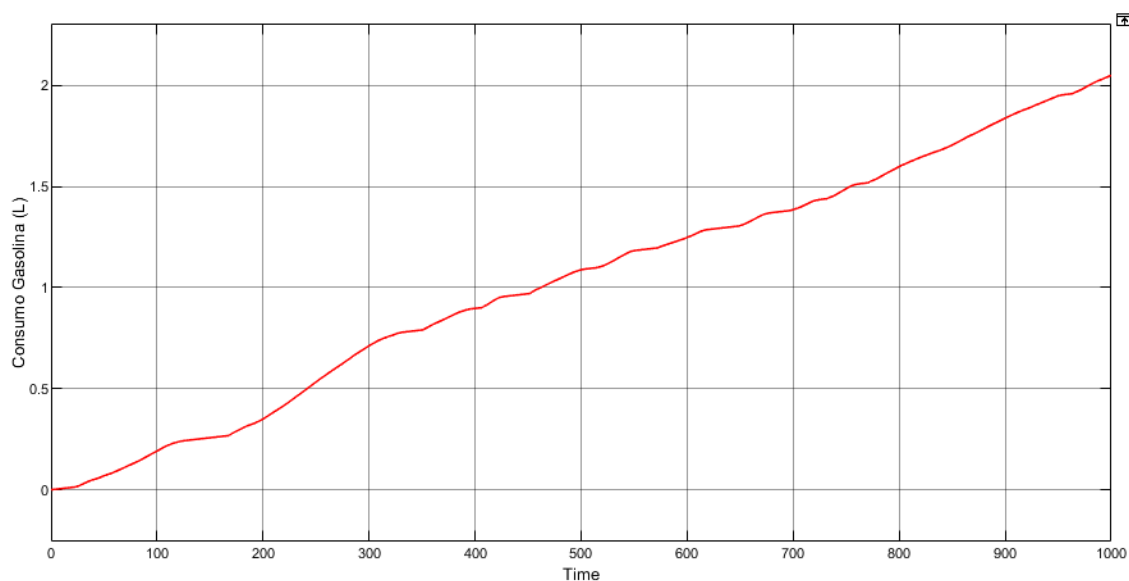
Figura 7.6: Desempenho do Veículo em Momentos de Partida e Parada



Fonte: (Elaborado pelo autor).

E por fim, na **Figura 7.7** é apresentado o consumo do modelo de veículo puramente a combustão.

Figura 7.7: Consumo de Combustível da Simulação puramente a Combustão

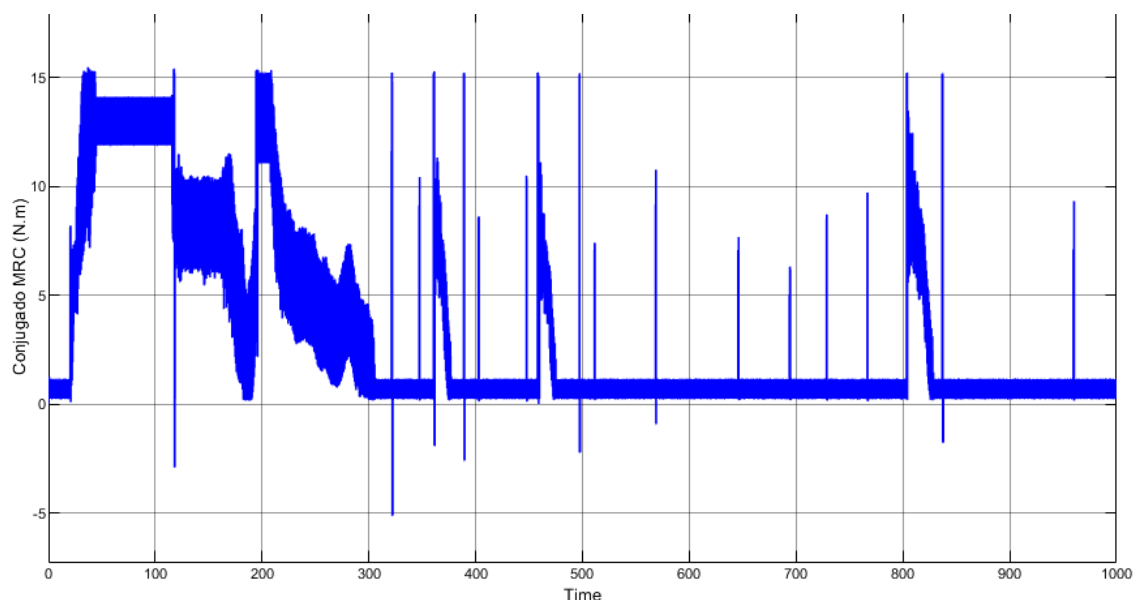


Fonte: (Elaborado pelo autor).

7.5. Resultados da Simulação do Veículo Elétrico Híbrido

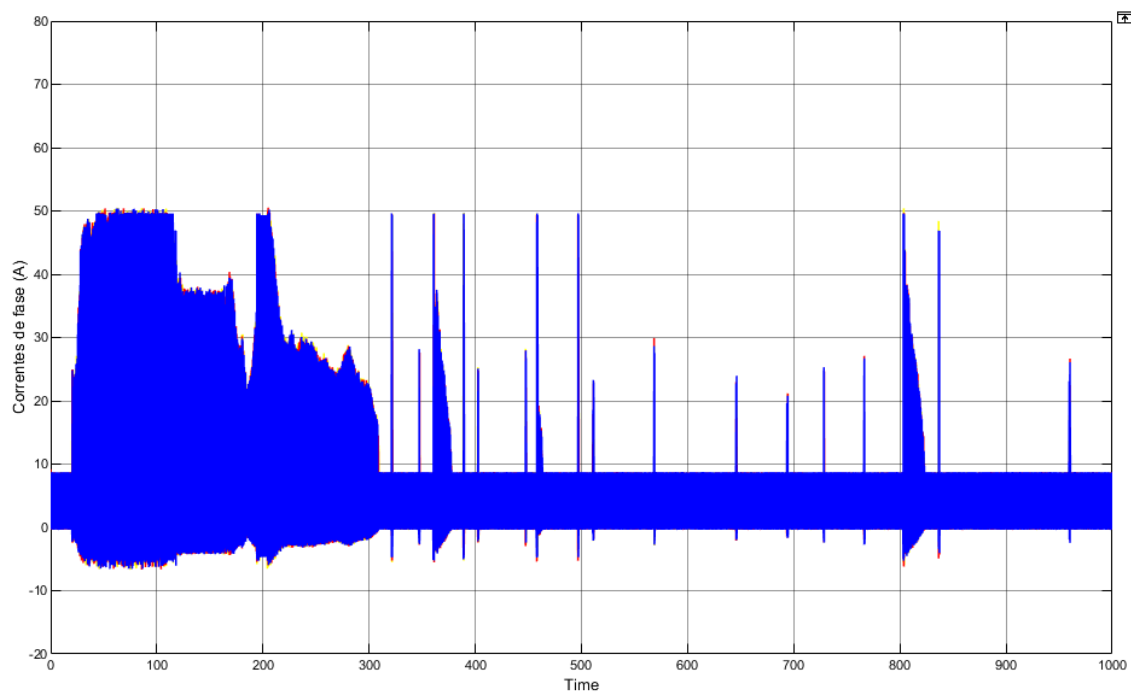
Os resultados obtidos a partir da simulação do VEH, podem ser vistos a seguir. Na **Figura 7.8**, é possível observar o conjugado gerado pela MRC.

Figura 7.8: Conjugado Gerado pela MRC



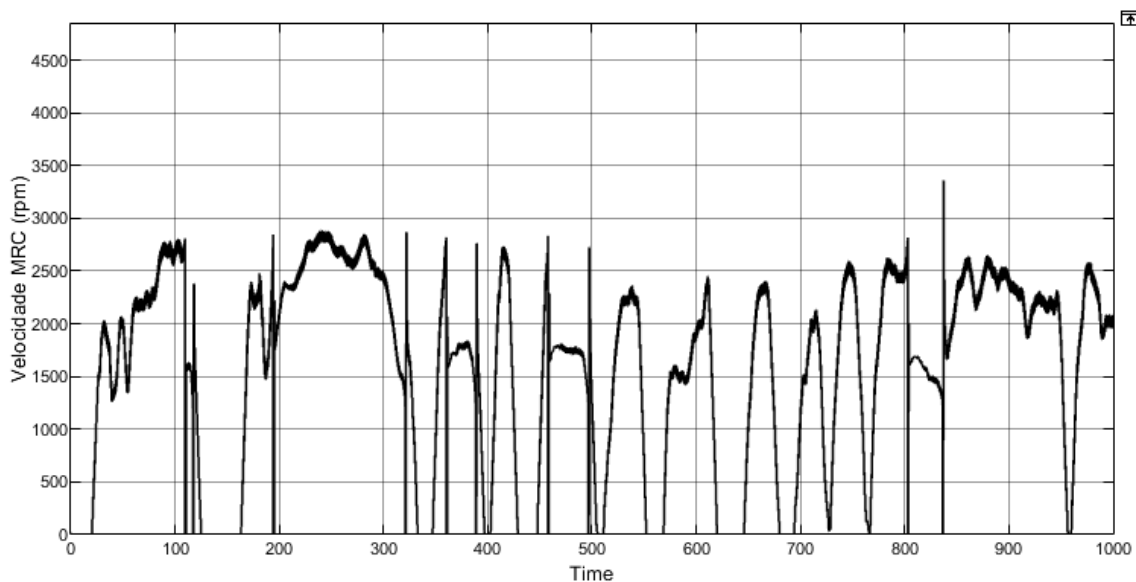
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na **Figura 7.9** estão dispostas as correntes de fase da máquina, como é uma máquina trifásica possui três correntes, todas estão presentes, porém, estão sobrepostas devido ao gráfico estar dimensionado para o período total de simulação, a imagem foi colocada para permitir a visualização dos níveis de corrente ao longo da simulação. Será possível ver na Figura também que, em alguns momentos da simulação aparecem correntes negativas, embora neste trabalho não seja abordada a geração de energia para recarregar as baterias, nem o conceito de frenagem regenerativa, nesses momentos em que a corrente é negativa poderia haver a geração de energia através da máquina, alterando o modo de funcionamento entre motor e gerador.

Figura 7.9: Correntes de Fase da MRC

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A **Figura 7.10** mostra a velocidade de rotação da MRC ao longo da simulação em rotações por minuto.

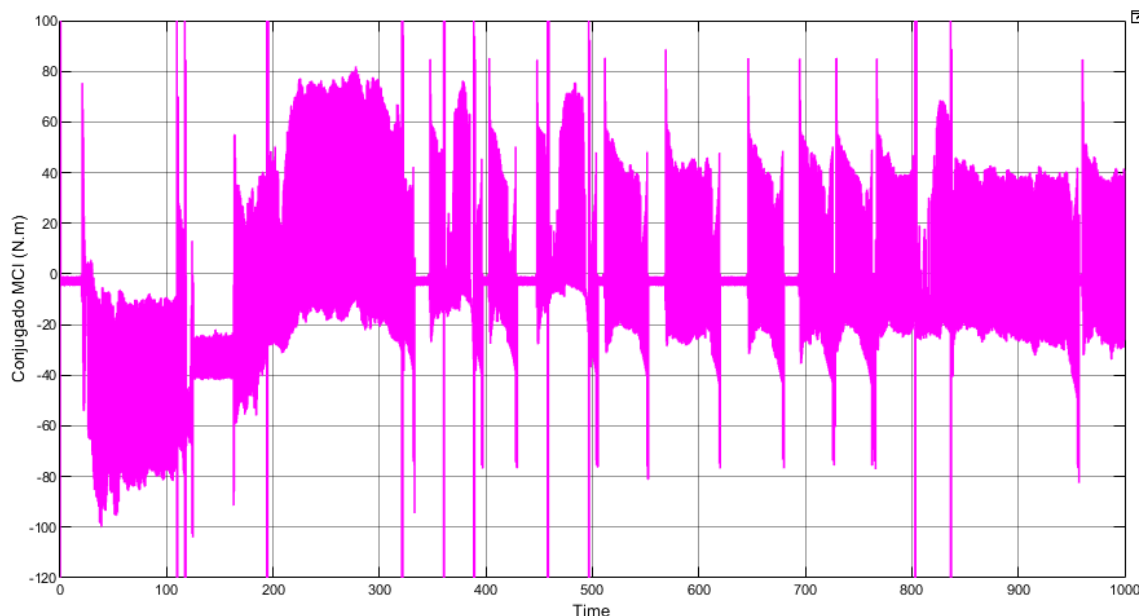
Figura 7.10: Velocidade de rotação da MRC

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A **Figura 7.11** mostra o conjugado gerado pelo MCI na simulação Híbrida. É possível ver que, em comparação com a Figura 7.3, o conjugado gerado pelo MCI foi

menor. Isso está em consonância com o projeto, já que, os conjugados produzidos devem ser somados, logo, para a mesma entrada de velocidade o conjugado produzido pelo MCI deve ser menor do que na primeira simulação onde ele estava tracionando o veículo sozinho.

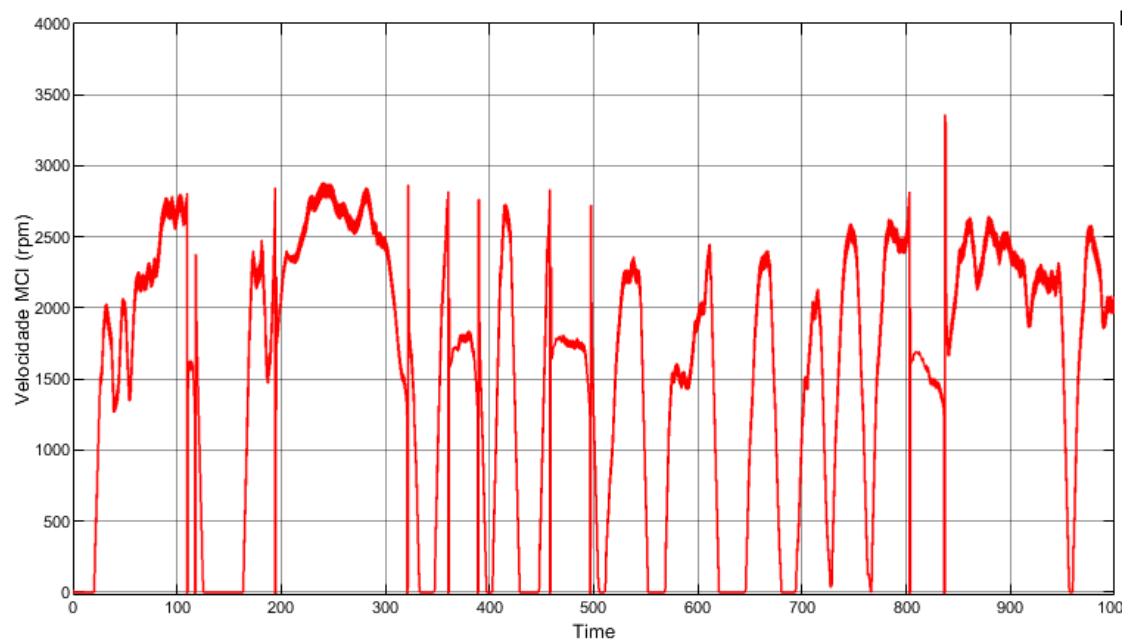
Figura 7.11: Conjugado Gerado pelo MCI



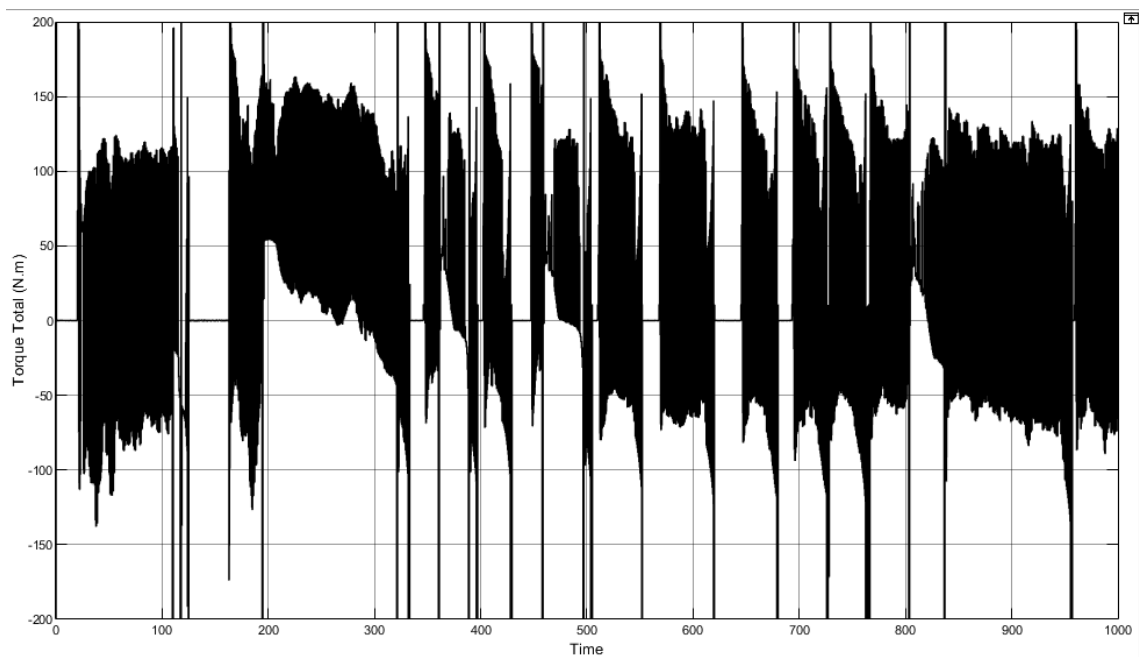
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na **Figura 7.12**, pode-se ver a velocidade de rotação do MCI. Em comparação com a Figura 7.10, fica evidente que as velocidades de rotação expressas em ambas as imagens são idênticas. Isso também era o resultado esperado, já que, os motores foram acoplados de forma a rotacionarem sempre juntos.

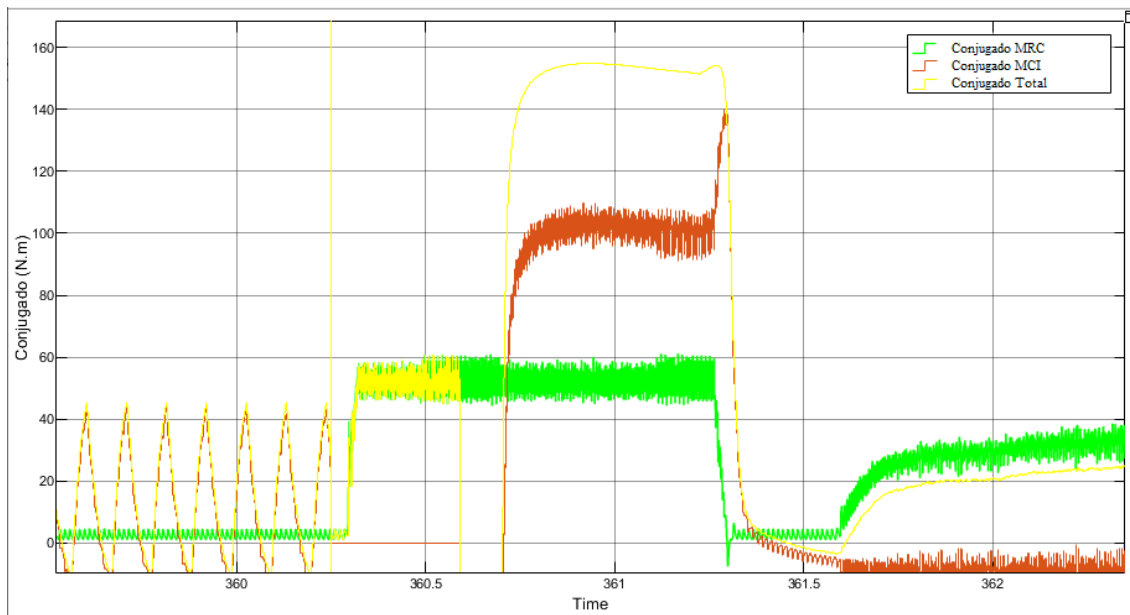
Já na **Figura 7.13**, consegue-se ver o conjugado total gerado pelos motores. Este conjugado é o resultado da soma dos conjugados do MCI e da MRC. Este fato pode ser visto com maior detalhe na **Figura 7.14**, onde é mostrado um momento específico da simulação, no qual, pode ser visualizado a soma dos conjugados de forma bem distinta.

Figura 7.12: Velocidade de rotação do MCI

Fonte: (Elaborado pelo autor).

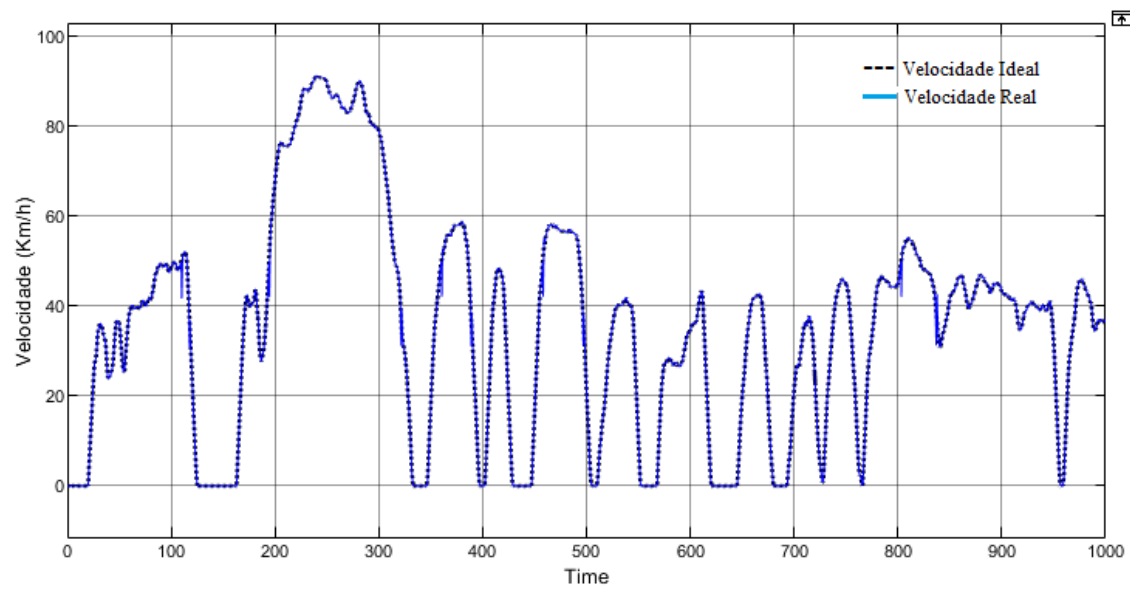
Figura 7.13: Conjugado Total

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Figura 7.14: Detalhe da Soma dos Conjugados

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Por fim, a **Figura 7.15** mostra a velocidade final obtida pelo veículo em relação a velocidade ideal gerada pelo Ciclo de Condução FTP75.

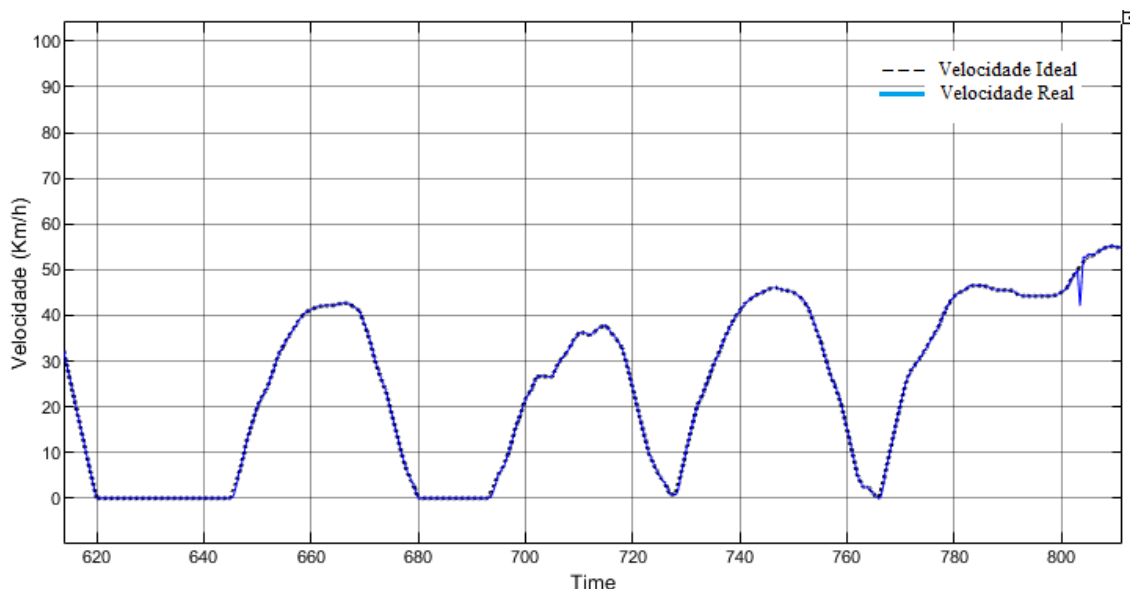
Figura 7.15: Comparação da Velocidade de saída com o Comando de Entrada do FTP75 para o VEH

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Analisando melhor a última imagem nos pontos de parada e partida, é possível observar a melhoria no desempenho do veículo em comparação no mesmo cenário com

o resultado obtido na simulação puramente a combustão. Na **Figura 7.16** é feita uma aproximação para que possa ser vista de forma mais detalhada essa observação.

Figura 7.16: Desempenho do VEH em momentos de parada e partida

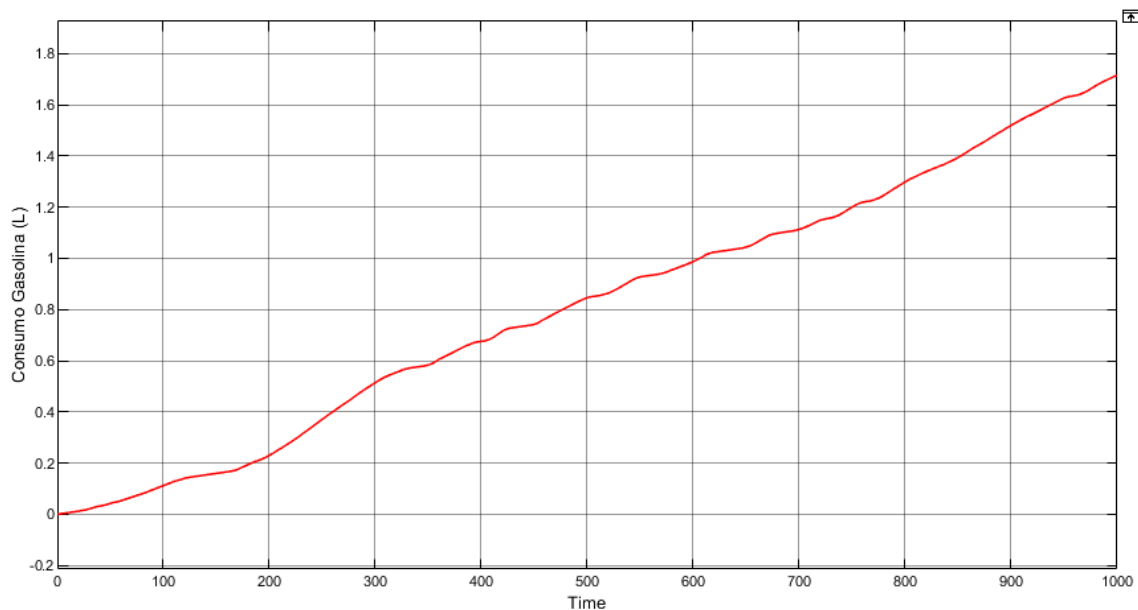


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A Figura 7.16 acima em comparação com a Figura 7.6 evidencia uma melhoria considerável em relação aos momentos de parada e partida do veículo, conseguindo acompanhar o comando de aceleração com mais precisão e gerando nesses momentos uma economia de combustível que será vista adiante.

Na **Figura 7.17** está disposto o consumo efetivo de combustível durante o período avaliado do Ciclo de Condução.

Novamente, em comparação com a Figura 7.7 da simulação puramente a combustão pode-se observar uma melhoria de 13,8% em relação ao consumo de combustível, considerando o mesmo cenário e parâmetros. O valor exato de combustível consumido, em litros, ao final da simulação foi de 1,761L, enquanto o valor obtido na primeira simulação foi de 2,044L. Uma diferença de 0,283L entre o consumo das duas simulações.

Figura 7.17: Consumo de combustível do VEH

Fonte: (Elaborado pelo autor).

7.6. Conclusão

Neste Capítulo foi possível entender o processo de simulação efetuado neste projeto, bem como, a questão problemática do acoplamento e os resultados obtidos a partir das simulações puramente a combustão e híbrida. Pode-se ver também, as melhorias no desempenho e consumo do veículo que a adição da MRC de apenas 1 cv gerou. Uma máquina de pequeno porte [11], gerou uma economia de combustível de quase 14%, além da melhoria do desempenho em momentos de parada e partida do veículo, evidenciando o potencial de aplicações em VEH, já que, o espaço ocupado pela máquina também é um fator importante nesse cenário.

É possível ver que o modelo desenvolvido se aproxima de um híbrido moderado já que a máquina elétrica auxilia em situações de parada e partidas e em uma parcela da tração necessária ao veículo. Além disso, o modelo também possui uma arquitetura aproximada de uma arquitetura em paralelo, na qual ambos os motores contribuem para a tração do veículo. O capítulo a seguir será o de conclusão, onde será feito uma finalização do trabalho aqui apresentado.

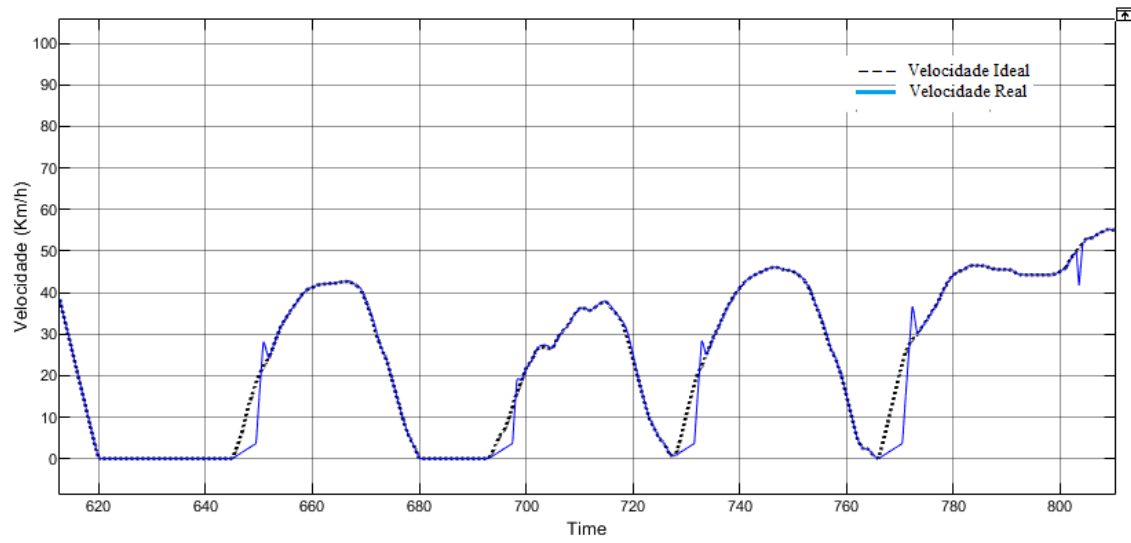
8. CONCLUSÃO

Este trabalho cumpriu com os objetivos propostos inicialmente. Foram apresentados a construção detalhado do modelo computacional, a simulação e os resultados obtidos através dela.

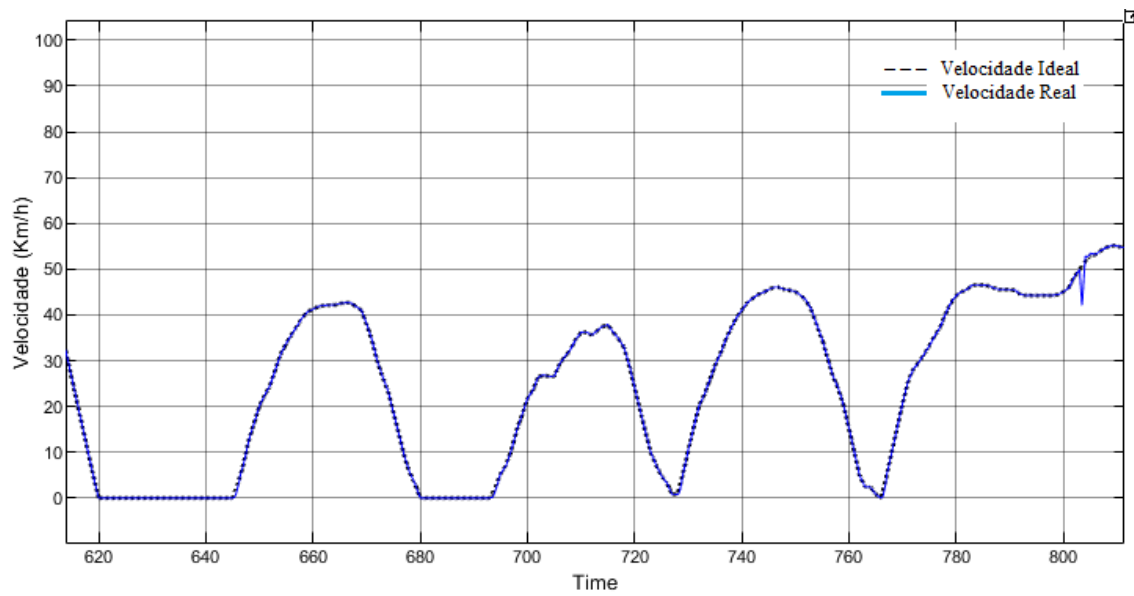
Os resultados obtidos estão coerentes com o esperado e com o referencial teórico apresentado. A começar pelo modelo da máquina, os resultados, como o conjugado pulsante e as correntes de fase estão de acordo com o apresentado em referências anteriores. Além disso, o modelo final se aproximou de um híbrido moderado de arquitetura paralela. Isso foi demonstrado através do tipo do acoplamento escolhido entre os motores e da consequente soma dos seus conjugados.

As simulações aqui mostradas, serviram como fonte para demonstrar as melhorias no desempenho que uma MRC 6x4 de apenas 1 cv foi capaz de gerar no veículo. Através da comparação com a simulação puramente a combustão, ficou evidente que, por possuir uma alta densidade de potência, mesmo uma máquina de tamanho reduzido é capaz de realizar melhorias no desempenho em situações de parada e partida (Sistema de Start-Stop), melhoria fundamental em situação de tráfego dentro da cidade. Além disso, a máquina auxiliou em momentos de alta demanda de potência, de forma que o MCI realizou um esforço menor para se obter a mesma velocidade final do veículo. Esses efeitos causaram também uma economia de combustível de quase 14% em relação ao modelo puramente a combustão. O fato desta máquina elétrica de dimensões reduzidas apresentar estes resultados, evidenciam o grande potencial de aplicabilidade da MRC no contexto de VEH, onde, além das melhorias de desempenho, as limitações de espaço para alocar uma máquina elétrica adicional é um fator extremamente relevante no projeto do veículo. As **Figuras 8.1 e 8.2** a seguir, foram repetidas para destacar as melhorias evidenciadas ao longo do capítulo anterior.

Figura 8.1: Desempenho do VEH em momentos de parada e partida a) Simulação Puramente a Combustão b) Simulação Híbrida

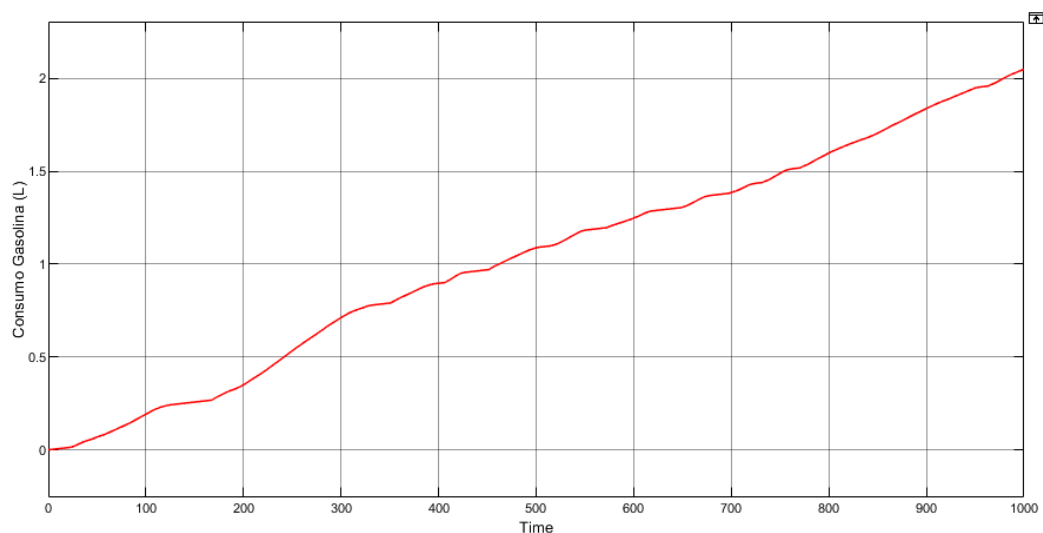


a)

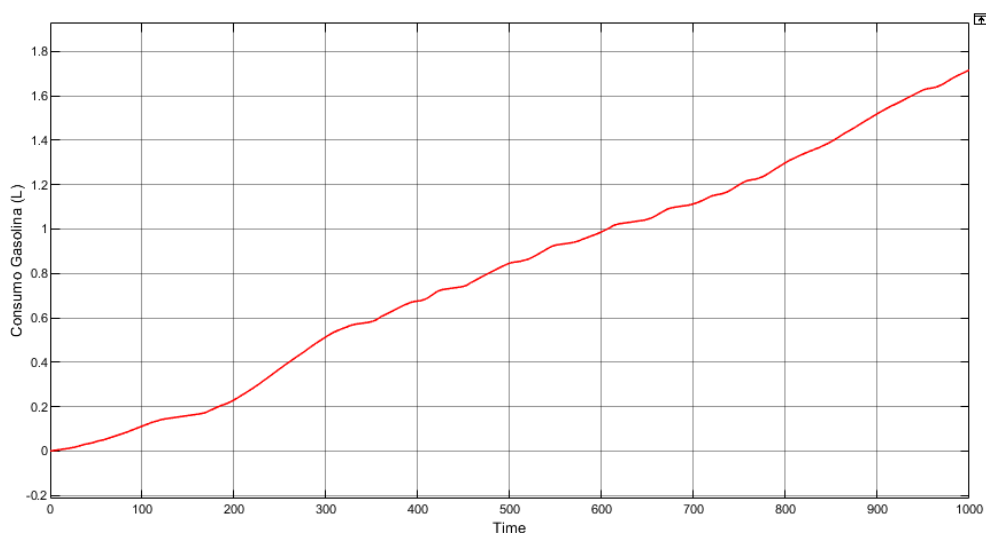


b)

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Figura 8.2: Consumo de Combustível a) Simulação Puramente a Combustão b) Simulação Híbrida

a)



b)

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Portanto, a aplicação da MRC em veículos híbridos apresentou bons resultados, mesmo com o conjugado pulsante, que é uma característica inerente a máquina. Futuramente, podem ser feitos testes utilizando outras máquinas com maior número de polos de forma a tentar reduzir esse efeito e analisar as consequências no conjugado final. Além disso, podem ser investigadas estratégias de controle mais complexas que possibilitariam a utilização da máquina em momentos específicos como, somente momentos de partida e parada ou alta demanda de potência. E para poder utilizar a máquina como motor e gerador, carregando as baterias nos momentos em que não estiver auxiliando a tracionar o veículo.

9. REFERÊNCIAS

- [1] EMADI, A. **Advanced Electric Drive Vehicles**. [s.l.] CRC Press, 2014.
- [2] SILVEIRA, Augusto Fleury Veloso da. Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado. 2008. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [3] EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S. E.; EMANI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 1. ed. New York: CRC Press LLC, 2005.
- [4] RAHMAN, K. M. et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 111–121, 2000.
- [5] SADEGHI, S. et al. **Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in Electric Vehicles**. 1 maio 2006.
- [6] PINDORIYA, R. M.; RAJPUROHIT, B. S.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, K. N. Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles. **IEEMA Engineer Infinite Conference**, 2018.
- [7] OMEKANDA, A. M. Switched Reluctance Machines for EV and HEV propulsion: State-of-the-art. **IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis**, 2013.
- [8] S. SMAKA et al. Switched reluctance machines for hybrid electric vehicles. 1 set. 2010.
- [9] KUMAR, R.; SAXENA, R. Simulation and Analysis of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Vehicle Applications using MATLAB. 1 dez. 2019.
- [10] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. Boston Etc.: Mcgraw-Hill, Cop, 2014.
- [11] DIAS, R. Inovações no projeto de geradores a relutância variável com estudo das influências da saturação magnética e das indutâncias mútuas. 20 abr. 2017.
- [12] ANDRADE, D. A., GOMES, L. C., DIAS, R. J., CABRAL, L. G., SILVEIRA, A. W. F. V., FLEURY, A., & BISSOCHI, C. A. Comparative study between a Single-phase and a Three-phase switched reluctance machine. **IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)**, 2011.
- [13] ZHUPING C.; DELIANG L. Simulation of switched reluctance starter/generator system based on Simpler. **International Conference on Electrical Machines and Systems**. 2005
- [14] OLIVEIRA, A. L.; PELIZARIA, A.; SGUAREZI FILHO, A. J. Finite Element Analysis Simulation Of Switched Reluctance Motor Drive. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 7, p. 1928 - 1933, jul 2018.
- [15] DIAS, R. Motores a relutância variável 6x4 e 6x6. Estudo comparativo de operação e desempenho. 18 out. 2022.
- [16] MATLAB. versão 9.8.0 (R2020a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2020.

[17] **Emission Test Cycles: FTP-75.** Disponível em:
<<https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>>.