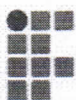


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA/DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LUCAS GABRIEL CARDOSO DE SOUSA

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOTOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL APLICADO À VEÍCULOS HÍBRIDOS

Goiânia, 2022.



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: Lucas Gabriel Cardoso de Sousa

Matrícula: 20161011060252

Título do Trabalho: Modelagem, simulação e análise de motor a relutância variável aplicado à veículos híbridos

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/A referido/a autor/a 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.

Goiânia, 26 / 07 / 2022

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

LUCAS GABRIEL CARDOSO DE SOUSA

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOTOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL APLICADO À VEÍCULOS HÍBRIDOS

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

Orientador: Prof. Renato Jayme Dias, Doutor.

Goiânia, 2022.

So85m Sousa, Lucas Gabriel Cardoso.

Modelagem, simulação e análise de motor a relutância variável aplicado à veículos híbridos /
Lucas Gabriel Cardoso Sousa. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
200 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

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

1. Motor a relutância variável. 2. Carro elétrico. 3. Simulação computacional. I. Dias, Renato
Jayme (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus
Goiânia. III. Título.

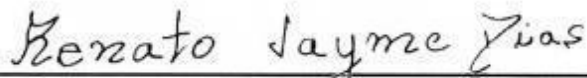
CDD 621.3919

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOTOR A
RELUTÂNCIA
VARIÁVEL APLICADO À VEÍCULOS HÍBRIDOS

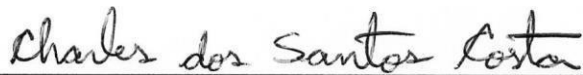
Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi submetido a Coordenação da Área de Engenharia Elétrica, Departamento Das Áreas Acadêmicas IV do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Banca Examinadora



Prof. Renato Jayme Dias, Doutor

Orientador



Prof. Charles dos Santos Costa, Mestre

Membro da Banca



Prof. Camille Reátegui Silva, Mestre

Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades, pela graça e pela força para continuar caminhando como o peregrino de John Bunyan.

Agradeço aos meus colegas de pesquisa José Mauricio Beira de Assunção Junior e Danielle Bernardes de Souza, pela ajuda e generosidade em compartilhar dúvidas e opiniões que por vezes arrancaram as escamas dos meus olhos, por vezes fizeram meu coração palpitar como o de uma criança que é apresentada ao mar.

Agradeço à Bruna Aderbal de Oliveira pela atenção e disponibilidade.

Agradeço ao meu orientador Prof. Renato Jayme Dias pela confiança depositada, pelas horas de orientação investidas, paciência e por me permitir fazer parte desse projeto.

Lucas Gabriel Cardoso de Sousa

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Eliziário Neto Cardoso de Sousa e Iranir Cardozo da Silva, os quais sempre me apoiaram.

EPÍGRAFE

*“Mas, Capitão, não posso mudar as
leis da física.”*

**Lt. Cmdr. Montgomery Scott (Scotty),
USS *Enterprise***

RESUMO

Esse trabalho apresenta a simulação de um veículo híbrido que emprega uma MRV (Máquina a Relutância Variável) como fonte de propulsão. Seja pelas características de densidade de potência, seja pela estrutura recortada e ausência de enrolamentos no rotor, a MRV pode ser vista como alternativa para projetos de carros híbridos. Esta máquina pode ser descrita por uma série de equações de estado que relacionam suas características elétricas e mecânicas. Essas equações foram implementadas no *Simulink*/MATLAB® e simularam o comportamento da MRV para determinadas condições de estímulo. O motor elétrico também interagiu com blocos providos pelo *Simulink*, elementos referentes a estrutura de um veículo foram introduzidos para que o comportamento da MRV pudesse ser avaliado em um cenário de esforço que se aproximasse de um veículo híbrido.

Palavras-chave: Motor a Relutância Variável. Carro elétrico. Simulação Computacional.

ABSTRACT

This work presents the simulation of a hybrid vehicle that uses an SRM (Switched Reluctance Machine) as a source of propulsion. Whether due to its power density characteristics, or due to its cut structure and absence of rotor windings, SRM can be seen as an alternative for hybrid car projects. This machine can be described by a series of equations of state that relate its electrical and mechanical characteristics. These equations were implemented in Simulink/MATLAB[®] and simulated the behavior of the SRM for certain stimulus conditions. The electric motor also interacted with blocks provided by Simulink, elements referring to the structure of a vehicle were introduced so that the behavior of the SRM could be evaluated in an effort scenario that approached a hybrid vehicle.

Keywords: Switched Reluctance Machine. Electric Car. Computer Simulation

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Classificação de Veículos Híbridos Elétricos quanto nível de Híbridização	70
Tabela 6.1: Valores dos coeficientes dos motores disponibilizados pelo Simulink.....	90
Tabela 6.2: Variáveis da simulação.....	168

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Seção transversal de uma MRV trifásica 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.	33
Figura 2.2: Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento.	35
Figura 2.3: Topologia de um Conversor em Ponte Assimétrico	36
Figura 3.1: Conceito de co-energia	43
Figura 4.1: Fluxo das tarefas executadas pelo modelo da MRV	48
Figura 4.2: Bloco S-Function	49
Figura 4.3: Implementação de uma MRV no ambiente Simulink.	50
Figura 4.4: Bloco MRV	51
Figura 4.5: Carga no Eixo da MRV	51
Figura 4.6: Bloco Subsistema Comportamento da Carga.	52
Figura 4.7: Cálculo do Conjugado produzido pela MRV	52
Figura 4.8: Fluxo seguido pelo algoritmo para o cálculo do conjugado.	53
Figura 4.9: Bloco Controlled Current Source fornecido pelo Simulink.	55
Figura 4.10: MOSFET (a) e Diodo (b) providos pelo Simulink.	55
Figura 4.11: Bloco DC Voltage Source do Simulink	55
Figura 4.12: Conversor em Ponte Simétrico.	56
Figura 4.13: Bloco Conversor em Ponte Simétrico	57
Figura 4.14: Bloco Interpreted MATLAB Function.	58
Figura 4.15: Subsistema Conversor DC-DC	58
Figura 4.16: Interior do Subsistema Conversor DC-DC	59
Figura 4.17: Simulação MRV 6x4	59
Figura 4.18: Correntes MRV 6X4	60
Figura 4.19: Saída do conversor DC-DC para apenas uma das fases.	60
Figura 4.20: Conjugado da MRV em relação ao tempo	61

Figura 5.1: Fluxo de potência em um veículo elétrico híbrido.	63
Figura 5.2: Característica de performance de um motor a combustão interna.....	65
Figura 5.3: Tração fornecida por um ICE para múltiplas relações de transmissão.....	65
Figura 5.4: Comportamento de um motor elétrico em relação a variação da velocidade.	66
Figura 5.5: Configuração da arquitetura híbrida em série.....	72
Figura 5.6: Configuração de uma arquitetura hibrida em paralelo.	73
Figura 5.7: Acoplamento Mecânico do Conjugado.	74
Figura 5.8: Acoplamento de conjugado com dois eixos.	76
Figura 5.9: Acoplamento Mecânico da Velocidade.....	76
Figura 5.10: Dispositivos de acoplamento de velocidades típicos.....	77
Figura 5.11: Configuração híbrida elétrica com acoplamento de velocidades por engrenagem	78
Figura 5.12: Arquitetura com acoplamento integrado de conjugado e velocidade (Toyota Prius).	79
Figura 6.1: Em (1) vemos o bloco responsável por converter sinais físicos para sinais Simulink, em (2) temos a operação contrária.....	82
Figura 6.2: Localização biblioteca Specialized Technology.....	83
Figura 6.3: Configuração de sistema métrico no bloco de conversão de sistema Simulink para físico	83
Figura 6.4: Exemplo de Conversão de sinal no domínio Simulink para o domínio físico	84
Figura 6.5: Bloco de referência rotacional do sistema.	84
Figura 6.6: Caminho para o componente Mechanical Rotational Reference.....	85
Figura 6.7: Bloco Generic Engine.....	86
Figura 6.8: Caminho para encontrar o componente Generic Engine.	86
Figura 6.9: Comportamento típico da demanda de potência em relação a velocidade angular normalizada.	89
Figura 6.10: Tela de configurações do bloco Generic Engine.	89
Figura 6.11: Seleção do modelo polinômio de terceira ordem para a parametrização do bloco Generic Engine.....	90

Figura 6.12: Opções de motores a combustão disponibilizados pelo Simulink.....	91
Figura 6.13: Configuração da potência máxima do motor a combustão.....	91
Figura 6.14: Parametrização da Generic Engine, Velocidade a potência demandada máxima	92
Figura 6.15: Parametrização da Generic Engine, Velocidade Máxima	92
Figura 6.16: Velocidade mínima que o motor a combustão consegue produzir conjugado. ..	93
Figura 6.17: Unidades dos valores do bloco Generic Engine.	93
Figura 6.18: Configurações de conjugado e velocidade do Generic Engine.	94
Figura 6.19: Parametrização do Generic Engine em termos potência e velocidade angular....	94
Figura 6.20: Parametrização do Generic Engine em termos de amostras de conjugado por velocidade.....	95
Figura 6.21: Métodos de interpolação do Generic Engine.....	96
Figura 6.22: Configurações dinâmicas do bloco Generic Engine.....	97
Figura 6.23: Configurações de inércia do virabrequim.....	98
Figura 6.24: Configuração de inercia e velocidade inicial do bloco Generic Engine.....	98
Figura 6.25: Configuração da resposta do bloco Generic Engine.....	99
Figura 6.26: Configuração do tempo de resposta do bloco Generic Engine.....	100
Figura 6.27: Configurações dinâmicas do bloco Generic Engine.....	100
Figura 6.28: Configuração do momento em que o bloco começará a ceder conjugado para o sistema.	101
Figura 6.29: Configuração do momento em que o bloco Generic Engine começa a interagir com o sistema.	102
Figura 6.30: Configurações de consumo de combustível.	102
Figura 6.31: Configuração do consumo de combustível em termos de Constant por revolution.	103
Figura 6.32: Configuração do consumo de combustível em termos de Fuel consumption by speed and torque.....	104
Figura 6.33: Configuração do consumo do bloco Generic Engine em termos do Break specific consumption by speed and torque.....	105
Figura 6.34: Conjunto de dados para a configuração Brake specific fuel consumption by	

speed brake mean effective pressure.	106
Figura 6.35: Configuração das constantes da parametrização Brake specific consumption by speed and brake mean effective pressure.	106
Figura 6.36: Configuração de consumo de combustível do modelo.	107
Figura 6.37: Aba Speed Control.....	107
Figura 6.38: Opções de modelo de parametrização do controle de velocidade sem carga. ..	108
Figura 6.39: Parâmetros do modelo Enable idle speed controller.	109
Figura 6.40: Parâmetros da opção Enable redline model.....	110
Figura 6.41: Bloco Vehicle Body.....	111
Figura 6.42: Modelagem do Corpo de um Carro juntamente com as forças que com ele interagem.	112
Figura 6.43: Parâmetros de massa e distribuição de rodas do bloco Vehicle Body.....	115
Figura 6.44: Distância horizontal do eixo dianteiro e traseiro do centro de gravidade do modelo.....	116
Figura 6.45: Altura do centro de gravidade e área frontal do bloco Vehicle Body.	116
Figura 6.46: Coeficiente de arrasto do bloco Vehicle Body.	117
Figura 6.47: Aceleração da gravidade e densidade do ar do bloco Vehicle Body.....	118
Figura 6.48: Parâmetros do bloco Vehicle Body.	118
Figura 6.49: Configuração das variáveis do bloco Vehicle Body.....	119
Figura 6.50: Bloco Tire (Magic Formula).....	120
Figura 6.51: Opções de parametrização do bloco Tire (Magic Formula).	121
Figura 6.52: Parâmetros da opção Peak longitudinal force and corresponding slip.	122
Figura 6.53: Parametrização do modelo pela opção Constant Magic Formula coefficients.	122
Figura 6.54: Configuração dos coeficientes da Magic Formula em função da carga.	123
Figura 6.55: Parametrização da Tire nominal vertical load.	124
Figura 6.56: Parametrização das dimensões do bloco Tire (Magic Formula).	125
Figura 6.57: Parametrização da deformação dinâmica do bloco Tire (Magic Formula).	126
Figura 6.58: Configuração da opção Specify stiffness and damping.....	126

Figura 6.59: Opções de parametrização da inércia rotacional do boco Tire (Magic Formula).	127
Figura 6.60: Configuração de valor para a inércia rotacional do bloco Tire (Magic Formula).	128
Figura 6.61: Configuração da velocidade inicial do bloco Tire (Magic Formula).	128
Figura 6.62: Parametrização adotada para o bloco Tire (Magic Formula).	129
Figura 6.63: Opções de modelo na aba Rolling Resistance.	130
Figura 6.64: Parâmetros da opção Constant coefficient.	131
Figura 6.65: Parametrização da pressão e coeficiente alpha do modelo.	132
Figura 6.66: Parametrização do expoente Beta e Coeficiente A do modelo.	133
Figura 6.67: Parametrização do limiar de velocidade e Coeficiente C do modelo.	134
Figura 6.68: Parametrização do cálculo de escorregamento.	135
Figura 6.69: Subsistema Carro	135
Figura 6.70: Bloco Carro.	136
Figura 6.71: Bloco Ideal Torque Source	137
Figura 6.72: Bloco Simple Gear.	137
Figura 6.73: Bloco Simple Gear com porta (H).	138
Figura 6.74: Configuração de transmissão.	139
Figura 6.75: Modelos de perdas de malha para o bloco sem porta (H).	139
Figura 6.76: Parametrização da perda de malha por coeficiente constate.	140
Figura 6.77: Parametrização do Input shaft torque at no load e Nominal output torque.	141
Figura 6.78: Parametrização de Efficiency at nominal output torque e Follower angular velocity threshold.	142
Figura 6.79: Opções de parametrização da perda da malha quando a porta (H) está habilitada.	142
Figura 6.80: Parametrização da temperatura e da carga na engrenagem base.	143
Figura 6.81: Parametrização do limiar de velocidade angular do seguidor e fatores de eficiência.	144
Figura 6.82: Parametrização da temperatura e do limiar de velocidade.	145

Figura 6.83: Parametrização do vetor de eficiências do modelo.	145
Figura 6.84: Parametrização da perda por atrito viscoso.	146
Figura 6.85: Parametrização da massa térmica e da temperatura inicial do modelo.	147
Figura 6.86: Modelo de engrenagem planetária composta.	147
Figura 6.87: Bloco Compound Planetary Gear.	148
Figura 6.88: Bloco Compound Planetary Gear com Thermal Port.	148
Figura 6.89: Configuração da relação de transmissão.	152
Figura 6.90: Modelos de perda por fricção com a Thermal Port desabilitada.	153
Figura 6.91: Parametrização das perdas de malha com perdas constantes.	154
Figura 6.92: Configuração dos vetores de temperatura e eficiência solar-orbital.	155
Figura 6.93: Parametrização do vetor de eficiência anel-orbital e limiar de potência.	156
Figura 6.94: Parametrização das perdas por atrito viscoso.	157
Figura 6.95: Parametrização da inercia das engrenagens orbitais.	158
Figura 6.96: Parametrização da porta térmica.	159
Figura 6.97: Bloco Solver Configuration.	159
Figura 6.98: Parametrização do estado de início da simulação.	160
Figura 6.99: Parametrização da tolerância de consistência.	161
Figura 6.100: Parametrização do tempo de amostragem e do solucionador utilizado.	162
Figura 6.101: Parametrização do tipo de solucionador.	163
Figura 6.102: Parametrização da quantidade de interação não lineares e custo das interações.	164
Figura 6.103: Parametrização da quantidade de interações de modulo e álgebra linear.	165
Figura 6.104: Parametrização da memória reservada para sinais em atraso e conexões 1D/3D entre blocos.	166
Figura 6.105: Parametrização da constante de tempo do filtro 1D/3D.	167
Figura 6.106: Modelo transmissão convencional.	168
Figura 6.107: Partida do ICE para T de 0,20 e v0 de 5 m/s.	169

Figura 6.108: Velocidade angular ICE para T de 0,20 e v_0 de 5 m/s.	170
Figura 6.109: Conjugado ICE para T de 0,20.	170
Figura 6.110: Partida do ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.	171
Figura 6.111: Velocidade angular ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.	171
Figura 6.112: Conjugado ICE para T de 0,50.	172
Figura 6.113: Velocidade estacionaria ICE para T de 0,50 e v_0 de 5m/s.	172
Figura 6.114: Velocidade angular estacionária ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.	173
Figura 6.115: Conjugado estacionário ICE para T de 0,50.	173
Figura 6.116: Partida do ICE para T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.	174
Figura 6.117: Velocidade angular ICE com T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.	174
Figura 6.118: Conjugado ICE com T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.	175
Figura 6.119: Consumo de combustível para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s	175
Figura 6.120: Modelo de transmissão elétrica	176
Figura 6.121: Partida da MRV com v_0 de 0 m/s.	176
Figura 6.122: Velocidade angular MRV na topologia puramente elétrico com v_0 de 0 m/s.	177
Figura 6.123: Partida da MRV com v_0 de 5 m/s.	177
Figura 6.124: Velocidade angular MRV na topologia elétrica com v_0 de 5 m/s.	178
Figura 6.125: Conjugado MRV em uma configuração puramente elétrica.	178
Figura 6.126: Simulação para uma arquitetura híbrida serie simplificada.	179
Figura 6.127: Comportamento da velocidade para uma configuração híbrida paralela simplificada, v_0 de 0 m/s.	179
Figura 6.128: Velocidade angular resultante na topologia paralela simplificada.	180
Figura 6.129: Velocidade simplificada da MRV na topologia paralela simplificada.	180
Figura 6.130: Velocidade angular do ICE na topologia paralela simplificada.	181
Figura 6.131: Conjugado híbrido da topologia paralela simplificada.	181
Figura 6.132: Conjugado do ICE na topologia paralela simplificada.	182
Figura 6.133: Conjugado do MRV na topologia paralela simplificada.	182

Figura 6.134: Simulação para uma arquitetura híbrida paralela.	183
Figura 6.135: Comportamento da velocidade para uma configuração híbrida paralela de um único eixo, v_0 de 0 m/s.....	183
Figura 6.136: Velocidade angular resultante da engrenagem planetária.	184
Figura 6.137: Velocidade angular MRV na topologia paralela com engrenagem planetária.	184
Figura 6.138: Velocidade angular ICE na topologia paralela com engrenagem planetária. .	185
Figura 6.139: Conjugado resultante topologia paralela com engrenagem planetária.	185
Figura 6.140: Conjugado MRV topologia paralela com engrenagem planetária.....	186
Figura 6.141: Conjugado ICE topologia paralela com engrenagem planetária.	186

LISTA DE SIMBOLOS

T	Demanda de conjugado
T_{mec}	Conjugado mecânico
T_{emag}	Conjugado eletromagnético
C	Conjugado
C_c	Conjugado resultante
C_o	Conjugado mínimo
i	Corrente de fase
L	Indutância de fase
θ	Ângulo do rotor
N	Número de voltas da bobina
μ	Permissibilidade magnética
A	Área do polo do estator e do rotor separadas pela distância l .
l	Distância da superfície do estator a superfície do rotor
λ	Fluxo concatenado
e	Tensão induzida
t	Tempo
v	Tensão aplicada
R	Resistência
ω	velocidade angular instantânea

i	Corrente de fase
D	Coeficiente de atrito viscoso
J	Momento de inércia
W^{co}	Co-energia
P	Potência entregue
$g(\omega)$	Potência demandada
u	Velocidade angular normalizada
V	Velocidade do veículo
Π	Aceleração normalizada
m	Massa
F	Força
C_d	Coeficiente de arraste
ρ	Densidade do ar
g	Aceleração da gravidade
v_0	Velocidade inicial
h	Altura
a	Distância entre as rodas dianteiras
β	Ângulo de inclinação do terreno
b	Distância entre as rodas traseiras
n	Número de rodas do veículo
μ_{rol}	Coeficiente de rolamento

P_r	Pressão do pneu
N_x	Número de dentes da engrenagem x
g_{AP}	Relação engrenagem anelar-orbital
g_{PS}	Relação engrenagem anelar-orbital
r_x	Raio da engrenagem x.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotivos
CC	Corrente Contínua
CG	Centro de Gravidade
DC-DC	Direct Current – Direct Current
DITC	Direct Instantaneous Torque Control
EM	Electric Motor
EPA	Environmental Protection Agency
FPGA	Field-Programmable Gate Array
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
ILC	Interactive Learning Control
IMA	Integrated Motor Assist
MRV	Máquina a Relutância Variável
NYCC	New York City Cycle
PI	Proporcional-Integral
PS	Physic System
S	Simulink
SRM	Switched Reluctance Machine
TSF	Torque Sharing Function

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. Introdução ao projeto	24
1.2. Objetivo	27
1.2.1. <i>Objetivo principal</i>	27
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	27
1.3. Referencial Teórico	27
1.4. Apresentação do Trabalho	30
1.5. Conclusão	31
 2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	 32
2.1. Introdução.....	32
2.2. Estrutura da Máquina	32
2.3. Princípios de Acionamento da Máquina a Relutância Variável	33
2.4. Conversor em Ponte Assimétrico	36
2.5. Conclusão	37
 3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4.....	 38
3.1. Introdução.....	38
3.2. Equacionamento das forças mecânicas e das tensões elétricas de uma MRV	38
3.3. Equacionamento das tensões de uma MRV com três fases no estator	41
3.4. Equacionamento das Forças de uma MRV trifásica.....	42
3.5. Conclusão	45
 4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	 47
4.1. Introdução.....	47
4.2. Simulação da Máquina a Relutância Variável	47
4.3. Simulação do conversor para uma Máquina a Relutância Variável	54
4.4. Disparo das chaves	57
4.5. Resultados da Simulação do Motor a Relutância Variável de Topologia 6x4	59

4.6.	Conclusão	61
5.	CONCEITOS DE VEÍCULO HÍBRIDO	63
5.1.	Motor a Combustão	64
5.2.	Motor Elétrico	66
5.2.1.	<i>Características do Motor Elétrico Em Veículos Elétricos</i>	66
5.2.2.	<i>Tipos de Motores Elétricos Utilizados na Propulsão de Veículos</i>	67
5.3.	Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos	69
5.3.1.	<i>Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos quando ao Nível de Híbridização</i>	69
5.3.2.	<i>Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos quando a Configuração</i>	70
5.4.	Conclusão	81
6.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VEÍCULO HÍBRIDO	82
6.1.	Conversão de sistema físico para Simulink e de Simulink para sistema físico	82
6.2.	Referência mecânica rotacional	84
6.3.	Motor a combustão.....	85
6.3.1.	<i>Conjugado do Motor a Combustão</i>	90
6.3.2.	<i>Dinâmicas</i>	96
6.3.3.	<i>Limites</i>	101
6.3.4.	<i>Consumo de Combustível</i>	102
6.3.5.	<i>Controle de velocidade</i>	107
6.4.	Modelo Corpo do Carro	111
6.4.1.	<i>Parâmetros</i>	114
6.4.2.	<i>Variáveis</i>	119
6.5.	Modelo Pneu	119
6.5.1.	<i>Força da Roda</i>	120
6.5.2.	<i>Dimensões</i>	124
6.5.3.	<i>Dinâmicas</i>	125
6.5.4.	<i>Resistência ao Rolamento</i>	129
6.5.5.	<i>Cálculo do escorregamento</i>	134
6.6.	Modelo Carro.....	135
6.7.	Interface Bloco MRV / Bloco Carro	136
6.8.	Caixa de engrenagem	137

6.8.1. <i>Perdas de malha</i>	139
6.8.2. <i>Perdas por atrito viscoso</i>	145
6.8.3. <i>Porta Térmica</i>	146
6.9. Engrenagem planetária composta	147
6.9.1. <i>Principal</i>	152
6.9.2. <i>Perdas de malha</i>	152
6.9.3. <i>Perdas por viscosidade</i>	156
6.9.4. <i>Inércia</i>	157
6.9.5. <i>Porta térmica</i>	158
6.10. Configurações de solucionador	159
6.10.1. <i>Parâmetros</i>	160
6.10.2. <i>Variáveis da simulação</i>	167
6.11. Resultados da Simulação	168
6.12. Conclusão	187
7. CONCLUSÃO	188
8. TRABALHOS FUTUROS.....	189
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	190
APÊNDICE A – SCRIPT MODELAGEM DA MRV 6X4.....	193
APÊNDICE B – SCRIPT Acionamento das chaves.....	194
APÊNDICE C – SCRIPT Conjugado da mrv	195
APÊNDICE D – SCRIPT variáveis do modelo	196
APÊNDICE E – FIND_U.....	197

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução ao projeto

O desenvolvimento de veículos à combustão interna é uma das maiores conquistas tecnológicas moderna. A grande presença de carros, vans, caminhões no transporte de bens e pessoas é o resultado de uma revolução industrial que privilegiou a utilização de motores a combustão interna como principal força motriz. A indústria automotiva, e outras indústrias a esta relacionadas, constituem a espinha dorsal da economia mundial, gerando muitos empregos. Contudo, a escalada de problemas relacionados a complicações ambientais, econômicas e sociais causadas pela poluição atmosférica, mudanças climáticas e esgotamento das fontes de petróleo tornaram os motores a combustão, entre outros emissores de gases estufa, fonte de preocupação. A expectativa por meios de transporte mais eficientes e sustentáveis força os fabricantes de veículos a repensar os projetos automobilísticos (EHSANI et al, 2005; EMADI, 2015).

Na última década, pesquisas e trabalhos relacionados aos meios de transporte têm enfatizado a melhoria da eficiência, diminuição da emissão de poluentes e segurança (VRAZIC, 2014). Veículos elétricos e veículos híbridos são tipicamente mencionados como candidatos a substituto dos veículos convencionais em um futuro próximo. Um veículo elétrico consiste, basicamente, de uma bateria que fornece energia, um motor elétrico que movimenta as rodas, e um controlador que regula o fluxo de energia para o motor. Já veículos híbridos são, na verdade, veículos de alimentação dupla. Eles dispõem de um motor elétrico e de um motor a combustão em seu interior. Nos veículos híbridos a máquina elétrica é introduzida de maneira a proporcionar aumentos perceptíveis na eficiência de propulsão do sistema motor, e por conseguinte, diminuições concomitantes nas emissões de poluentes (LEITMAN 2009; EMADI, 2015).

Máquinas elétricas são eficientes, possuem boa relação custo benefício, e podem escalar de grandes aplicações a pequenas aplicações, geralmente, característica não encontrada em outras fontes de energia mecânica. Esse fator tem conduzido a uma grande demanda do mercado por máquinas elétricas (BILGIN et al, 2019). Controle de velocidade conveniente, boa produção de conjugado em aclave, realização de frenagem regenerativa, converter energia mecânica em energia elétrica e recarregar uma bateria são demandas em

um projeto de motor elétrico que a indústria automobilística deve atender. (ZHENG, 2009).

No presente, muitos automóveis dependem dos combustíveis compostos por hidrocarbonetos para derivar a energia necessária para sua própria propulsão. A combustão é a reação ocasionada pela interação entre o combustível e o ar com a adição de calor. A energia liberada pela reação é convertida em potência mecânica e o produto químico da reação é lançado na atmosfera. No processo de combustão completa, a reação tem como resultado dióxido de carbono e água, os quais não agredem o meio ambiente. Plantas absorvem dióxido de carbono no processo de fotossíntese. Os animais não sofrem ao respirar dióxido de carbono, a menos que sua concentração no ar seja mais elevada do que a de oxigênio. O problema atual é que o processo de propulsão automobilístico produz a forma incompleta da combustão. Além de dióxido de carbono e água, esta combustão também tem como produto óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, todos tóxicos para a saúde humana (EHSANI, 2005). O número de anos que os recursos de petróleo da Terra podem saciar a demanda humana depende da descoberta de novas reservas, da capacidade de explorar este recurso, assim como a capacidade de consumir este recurso. Esta questão vem a ser problemática desde que historicamente essas novas jazidas são descobertas em um ritmo lento (LEITMAN, 2009). Desta maneira, explorar tecnologias disruptivas já moldam as tendências industriais na eletrificação de transportes (EMADI, 2015).

Atualmente existem muitas linhas de pesquisa focadas em substituir o motor a combustão interna por uma máquina elétrica como unidade propulsora do veículo (VRAZIC, 2014). As máquinas elétricas baseadas em ímãs permanentes ganharam destaque nesta área. Essas máquinas são conhecidas por possuírem alta densidade de potência (podem produzir conjugado relativamente alto em relação as dimensões da máquina) e operação de controle é relativamente simples. Por outro lado, nos dias de hoje, problemas profundos ocorreram no mercado internacional de ímãs permanentes devido à alta no preço, estoque limitado e questões políticas (JURCA, 2012). Justamente por este fato, as atenções dos pesquisadores voltaram-se para as máquinas de rotor passivo tais como o motor a relutância variável (OMEKANDA, 2013; RUBA, 2016).

A máquina a relutância variada é um tipo de dispositivo de alta performance mecânica e elétrica desenvolvido com base nos fenômenos relacionados a variação da relutância entre

o rotor e o estator desta. Sua estrutura recortada e configuração de espiras apenas no estator tornam esta, uma máquina de estrutura simples, robusto quanto ao aparecimento de defeitos com bom desempenho em condições de aquecimento. Mesmo sem o emprego de ímãs permanentes, se comparada a outras máquinas elétricas, a MRV (Máquina a Relutância Variável) ainda possui elevada densidade de potência. Desta maneira, apresentando-se como uma robusta alternativa, de custo benefício, e ecologicamente viável por necessitar de menos cobre e aço para sua construção (PU, 2011; PAULA, 2018). A máquina a relutância variável também apresenta controlabilidade simplificada pelo advento da eletrônica de potência e controles baseados em dispositivos microcontrolados, podendo trabalhar de maneira dual, pode ser acionada tanto como motor quanto como gerador, e em regime de velocidade variável (PU, 2011; SIADATAN, 2018).

Contudo, a principal desvantagem do motor a relutância variável é o conjugado descontínuo e a ondulação (*ripple*), oscilações devido a existência de harmônicas de ordem elevada, de conjugado. Este fato não afeta apenas as características de saída de entrega de potência do sistema, mas também, inevitavelmente, aumenta o ruído sonoro e vibração quando o motor está em funcionamento. Portanto, o estudo das ondulações de conjugado do motor a relutância variada exige atenção todo tempo (YI, 2010; PU, 2011; PRAMOD et al, 2019).

Este trabalho não possui a pretensão de debruçar esforço na análise nos efeitos da ondulação de conjugado, ou nos possíveis desconfortos causados pela poluição acústica proveniente da MRV (Máquina a Relutância Variável), mas no comportamento geral de um sistema automobilístico impulsionado pela máquina elétrica estudada. Pela facilidade encontrada na introdução de componentes e modificação de parâmetros, o ambiente computacional foi escolhido como meio condutor da investigação.

Durante o levantamento bibliográfico não foram encontrados trabalhos que tratassem da simulação de carros híbridos que empregassem uma MRV no sistema de propulsão. Este fato não é tido como um atenuador da relevância da proposta deste trabalho, mas como sinalização do quanto temas relacionados a aplicação da MRV ainda podem ser explorados. Os resultados aqui apresentados devem ser vistos com cautela, tendo em vista que o tema carece de amadurecimento por contribuição de outros pesquisadores.

1.2. Objetivo

1.2.1. *Objetivo principal*

Realizar a modelagem computacional de um motor a relutância variável e verificar seu desempenho no funcionamento no contexto de fornecimento de propulsão para um veículo híbrido.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Modelar e implementar a MRV de topologia 6x4 em ambiente computacional;
- Construir e simular um modelo de veículo, modificável, de maneira a permitir a averiguação do comportamento de topologias variadas no contexto de esforço do motor elétrico;
- Analisar o comportamento dinâmico do motor elétrico através da utilização da ferramenta *Simulink* do MATLAB®.

1.3. Referencial Teórico

O empregado do *Simulink* em simulação de HEV (*Hybrid Electric Vehicle* – Veículos Elétricos Híbridos) podem ser encontrados em (BECKER, 2005). Neste trabalho é apresentado a modelagem de componentes veiculares como embreagem e câmbio automático. Para este propósito, cada sistema abordado foi dividido em subsistemas. No *Simulink*, os modelos matemáticos que descrevem cada subsistema foram implementados e, a posteriori acoplados, configurando sistemas mais complexos como por exemplos as baterias, o ICE (*Internal Combustion Engine* - Motor a Combustão Interna), a caixa de macha, etc. Cada sistema do veículo foi construído de maneira modular, com o objetivo de adaptar, futuramente, a simulação a outros veículos simplesmente alterando parâmetros e escolhendo os subcomponentes corretos do veículo específico, evitando, portanto, gastos de calibração, de determinados parâmetros, no veículo real.

(FAN, 2007) é outro trabalho que se coloca no propósito de construir uma simulação de HEV. Utilizando a arquitetura Honda IMA (*Integrated Motor Assist* – Motor Assistido Integrado), na qual o EM (*Electric Motor* – Motor Elétrico) atua como suplemento de conjugado para o ICE e como gerador em momentos de frenagem regenerativa. Neste

trabalho, apenas os componentes lógicos de controle foram implementados no *Simulink*. Os componentes mecânicos foram implementados em ADANS, outra ferramenta disponibilizada pelo MATLAB®. Diferentemente do adotado em (BECKER, 2005), neste trabalho, os modelos matemáticos foram preteridos para o ICE e EM. Uma tabela com informações velocidade de rotação, consumo de combustível e conjugado foi empregada para descrever o comportamento do motor a combustão Honda Insight 1.0L VTEC-E SI, enquanto, de forma semelhante, uma segunda tabela com informações de eficiência energética, conjugado motor/gerador e velocidade de rotação mapeou o comportamento do motor elétrico sem escovas de imã permanente. Para a validação da simulação concebida, dados da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) foram utilizados, o conjunto de dados NYCC (*New York City Cycle – Ciclo na Cidade de Nova York*) o qual possui valores de velocidade, consumo de combustível e aceleração de veículos leves circulando em perímetro urbano.

Em (ZHENG, 2009) realizou-se um estudo da operação de um motor a relutância variável, de topologia 12x10, para veículos elétricos baseado em FPGA (Field-Programmable Gate Array). Neste trabalho, ZHENG e ZHAO, com o objetivo de solucionar problemas de perda de controlabilidade e velocidade de resposta, encontrados em controles analógicos e digitais implementados para motores a relutância variável em veículos elétricos com condições de operação iníqua, propuseram um método desenvolvido em FPGA. Experimentos mostraram que o motor a relutância variável pôde obter conjugado mais robusto sob o controle de corrente de fase em condições de baixa velocidade. Para condições de alta velocidade, alta eficiência pôde ser alcançada por meio da otimização do ângulo de comutação das fases do motor. Resultados considerados satisfatórios, sendo que o motor conseguiu responder a demanda do veículo em movimento.

Em (NOBELS et al, 2009) foi sugerido um projeto de MRV (Máquina a Relutância Variável) para uso em veículo híbrido, exatamente como a proposta deste trabalho. Porém, não foi apresentado um estudo de local de instalação, modo de sincronia entre motores à combustão e elétrico e demais fatores necessários para funcionamento correto da máquina projetada.

(YI, 2010) propôs controle ótimo de conjugado por meio da técnica de aprendizado interativo (ILC – *Interactive Learning Control*) aplicada ao controle de uma máquina a

relutância variável para veículos elétricos. Este método considerou a indutância mútua com excitação de duas fases simultâneas e ajustando o PWM de acordo com a indutância dinamicamente, o estado de otimização foi baseado na máxima minimização da ondulação de conjugado.

É apresentada uma técnica para a melhoria do sistema de controle de máquinas a relutância variável para veículos elétricos em (PU, 2011). Baseado no modelo linear da máquina a relutância variável e em uma estratégia de controle vetorial para o conjugado. Neste trabalho, a análise teórica e o resultado das simulações mostraram que a aplicações da teria de controle digital baseado em micropassos (*microstamping control*) tem o potencial de suprimir as ondulações de conjugado para baixa velocidade. Nestas condições foram identificadas boas melhorias nas características dinâmicas do motor. Essa estratégia de controle não é de complexidade elevada e fornece condições favoráveis para amplas aplicações práticas.

Em (RUBA, 2016) foi apresentada uma solução de acionamento de máquinas a relutância variável aplicada em veículos elétricos leves. Este artigo apresenta de forma detalhada as etapas de projeto de uma solução de propulsão para veículos elétricos de baixa potência equipado com uma máquina a relutância variável. O projeto da máquina foi focado em perdas mínimas no entreferro e na procura das dimensões geométricas ideais para obter o menor peso de máquina. Em relação a estratégia de acionamento, cinco métodos de acionamento acabaram por ser aplicados, controle direto do conjugado instantâneo (DITC – *Direct Instantaneous Torque Control*), função de compartilhamento de conjugado (TSF – *Torque Sharing Function*), função de compartilhamento de conjugado linear (*Linear TSF*), função de compartilhamento de conjugado cubico (*Cubic TSF*) e função de compartilhamento de conjugado exponencial (*Exponential TSF*).

Em 2018, em (PAULA, 2018) é possível encontrar um estudo comparativo entre técnicas de minimização de ondulação de conjugado para motores a relutância variável com três fases. Neste trabalho, com a velocidade sendo controlada por um controle PI (Proporcional-Integral), simulações foram executadas para verificar os resultados de cada método. Para a topologia de motor utilizada, o método da função de compartilhamento de conjugado senoidal (TSF – *Torque Sharing Function*) foi o que apresentou menor ondulação de conjugado e foi recomendado para aplicações em baixa velocidade (até 1000 rpm).

Contudo, para aplicações em alta velocidade (entre 1000 rpm e 2100 rpm) o método de controle direto de conjugado instantâneo (DITC – *Direct Instantaneous Torque Control*) apresentou melhor resultado em termos de ondulações de conjugado.

Até onde o levantamento bibliográfico pode chegar, não foram encontrados trabalhos relacionados a simulação de carros híbridos empregando o motor de relutância variável em ambiente *Simulink*.

1.4. Apresentação do Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho é organizado da seguinte maneira:

No **Capítulo 2** discute-se os princípios de funcionamento da máquina a relutância variável. Questões relacionadas as características construtivas da topologia de MRV (Máquina a Relutância Variável) 6x4 também são abordadas, bem como os conceitos necessários ao acionamento deste tipo de máquina.

O **Capítulo 3** é dedicado a apresentação do modelo matemático aplicado neste trabalho para descrever o comportamento elétrico e mecânico de uma topologia de MRV 6x4.

O **Capítulo 4** demonstra a implementação dos modelos matemáticos, outrora obtidos para o motor elétrico, em ambiente computacional. Formas de onda também são apresentadas de maneira a verificar o correto funcionamento do modelo computacional obtido para a máquina elétrica e periféricos.

No **Capítulo 5**, uma introdução a respeito das terminologias e características construtivas dos veículos híbridos é realizada. Optou-se pela redação de tal capítulo pelo fato da natureza do assunto abordado ser rico em conceitos elétricos e mecânicos que podem não fazer parte do vernáculo de muitos dos leitores. Ao leitor familiarizado com o tema, o **Capítulo 5** pode ser visto como uma revisão, tendo em vista que o discutido em seguida apenas ganha correta significância pelo entendimento de tais conceitos.

Por fim, o **Capítulo 6** materializa a proposta deste trabalho. Um modelo genérico de veículo é construído fazendo uso de ferramentas encontradas nas próprias bibliotecas do

Simulink. Visualizações gráficas são realizadas para verificar a coerência do modelo construído. Em um último momento, a MRV (Máquina a Relutância Variável) concebida no **Capítulo 4** é inserida no modelo e os resultados de tal hibridização também são apresentados.

A apreciação das conclusões finais pode ser realizada no **Capítulo 7** e as sugestões de trabalhos futuros está localizada no **Capítulo 8**. O referencial teórico pode ser consultado no **Capítulo 9** e no final deste trabalho os *scripts* empregados no desenvolvimento das simulações podem ser conferidos.

1.5. Conclusão

Este capítulo apresentou brevemente algumas das características da MRV (Máquina a relutância Variável) bem como razões que tornam esta máquina alvo de diversas investigações, no âmbito acadêmico, a respeito de sua aplicabilidade. Neste contexto, a MRV aparece como uma convidativa alternativa em projetos de carros elétricos, ou carros híbridos. Esta possibilidade torna-se cada vez mais palatável a partir do olhar cuidadoso sobre a forma como pesquisas recentes apontam maneiras de lidar com os problemas atrelados ao uso deste tipo de máquina elétrica. Para uma compreensão mais lúcida das possibilidades aqui apresentadas, assim como também dos resultados obtidos neste trabalho, uma breve discussão dos princípios de funcionamento deste equipamento será realizada.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

2.1. Introdução

Antes do desenvolvimento dos modelos matemáticos e implementações computacionais, alguns dos princípios de funcionamento serão discutidos de maneira a elaborar base e contexto para o afirmado ao longo do trabalho. A MRV (Máquina a Relutância Variável), como em grande parte dos conversores eletromecânicos, pode converter energia elétrica em força mecânica. Para a máquina estudada, esta conversão torna-se possível pela tendência do rotor de ir ao encontro da posição, na qual, a indutância da bobina excitada será maximizada (MILLER, 2001).

Desta maneira, este capítulo apresentará o acionamento e as características construtivas de Máquina a Relutância Variável (MRV), para a topologia explorada no decorrer deste trabalho.

2.2. Estrutura da Máquina

A Máquina a Relutância Variável (MRV) pode ser caracterizada por possuir uma estrutura laminada de dupla saliência, na qual as bobinas são enroladas apenas nos dentes do estator (ANDRADE et al, 2011). No caso da topologia implementada, as bobinas enroladas em dentes diametralmente opostos, estão conectadas e configuram uma única fase. Em outras palavras, como implementamos uma máquina de estrutura formada por 6 (seis) dentes no estator e 4 (quatro) dentes no rotor, a topologia, aqui abordada, é de uma máquina trifásica, sendo que, a cada dois dentes diametralmente opostos do estator tem-se a configuração de uma fase.

A **Figura 2.1** mostra o enrolamento de uma única fase, fase A, da perspectiva do corte transversal da MRV (Máquina a Relutância Variável) 6x4, desta maneira, a corrente que percorre cada bobina será a mesma. Muito embora seja mostrado o enrolamento de uma única fase na **Figura 2.1**, a mesma configuração é repetida para as demais duas fases.

É importante notar que, na **Figura 2.1**, os dentes do estator na fase A estão completamente alinhados com os dentes do rotor, neste trabalho, esta posição foi escolhida como referência, ou seja, sempre que os dentes do rotor estão alinhados com os dentes de

determinada fase, diz-se que o rotor está a zero graus desta fase.

Figura 2.1: Seção transversal de uma MRV trifásica 6x4, mostrando o enrolamento da fase A.



Fonte: (ANDRADE et al, 2011).

Na **Figura 2.1** também é possível observar no instante em que uma fase A está alinhada com um par de polos do rotor, e no rotor outro par de polos está completamente desalinhado em relação a qualquer outra fase do estator. Se a fase A for desconectada de qualquer fonte de corrente existente no sistema e, em seguida, a fase B, ou a fase C, conectada a uma fonte de corrente, diz-se que a fase B está excitada. Nesse instante, o rotor tenderá a entrar em movimento, conjugado será produzido, de forma a minimizar a resistência ao fluxo magnético estabelecido entre cada polo da fase B no momento da excitação, ou seja, os polos do rotor se alinharão aos polos excitados do estator. Observe que a produção de conjugado para movimentar o rotor está intimamente ligada a comutação da excitação entre as fases da máquina.

2.3. Princípios de Acionamento da Máquina a Relutância Variável

A MRV é uma máquina sem escovas ou imã permanente com enrolamentos concentrados no estator. Cada fase do motor é composta por duas bobinas enroladas em torno de polos do estator diametralmente opostos e eletricamente conectados em série, veja **Figura 2.1**. À medida que a corrente passa por um dos enrolamentos do estator, o conjugado é gerado pela tendência do rotor de se alinhar com o polo do estator excitado (ZHUPING & DELIANG, 2005).

Um conjugado contínuo pode ser produzido sincronizando a excitação de cada fase com a posição do rotor. O conjugado gerado pelo MRV, quando não está saturada, é idealmente, conforme expresso na seguinte equação:

$$C(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.1)$$

Onde:

- i é a corrente de fase;
- L é a indutância de fase;
- θ é o ângulo do rotor;
- C é o conjugado gerado.

Da equação (2.1) é possível concluir que a orientação do conjugado independe da orientação da corrente de fase, mas sim, da maneira com a qual a indutância de fase varia com o ângulo entre o rotor e o estator.

À medida que a área do rotor sobreposta pela área do estator aumenta, o conjugado atua na direção do movimento do rotor. Para que esta máquina trabalhe como motor é necessário que a excitação seja comutada para a próxima fase enquanto o rotor dirige-se para a posição de alinhamento, ou zero graus da fase. Neste momento, a indutância de fase (L) está aumentando $\left(\frac{dL(\theta)}{d\theta} > 0\right)$ decorrente do comportamento da indutância descrito pela equação (2.2).

$$L(\theta) = \frac{N \cdot \mu \cdot A(\theta)}{l} \quad (2.2)$$

Onde:

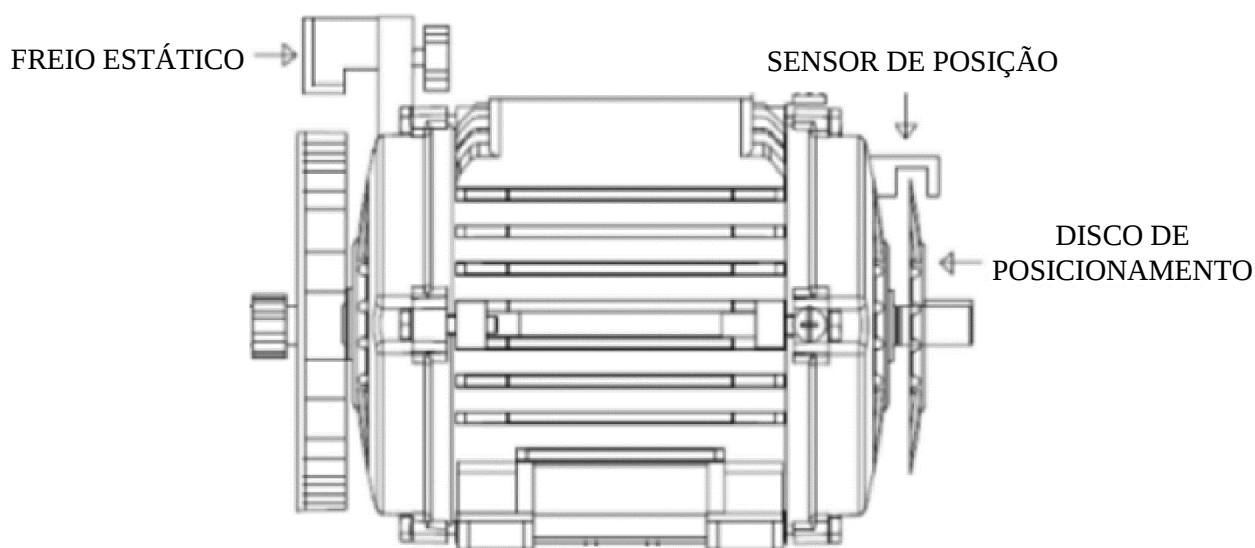
- N é o número de voltas da bobina enrolada entorno do polo do estator;
- μ é a permissibilidade magnética do meio;
- A é a área do polo do estator e do rotor separadas pela distância l .

- l é a distância que separa a superfície do polo do rotor da superfície do polo do estator quando estes encontram-se alinhados.

Por outro lado, se o objetivo for acionar a MRV como gerador, então a próxima fase deve ser excitada enquanto o rotor estiver deixando a posição de alinhamento. Neste instante, a indutância de fase está diminuindo ($\frac{dL(\theta)}{d\theta} < 0$), e o conjugado se oporá ao movimento do rotor. O trabalho realizado pelo sistema mecânico para separar os polos pode ser transmitido como energia para uma bateria, ou uma carga CC.

Para certificar que cada fase seja energizada no momento correto, dentro da finalidade desejada, é necessário conhecer, a todo instante, a posição do rotor. Esse objetivo pode ser alcançado com abordagens diretas, ou abordagens indiretas. Na abordagem direta, sensores ou encoders detectam a posição do rotor e enviam sinais para um microcontrolador acionar a fase de interesse. Nas abordagens indiretas, a posição do rotor é estimada por meio do monitoramento de alguma variável relacionada ao deslocamento angular do rotor. A **Figura 2.2** apresenta uma MRV (Máquina a Relutância Variável) com disco de posicionamento e sensor óptico acoplados ao eixo.

Figura 2.2: Carcaça, sensor óptico e disco de posicionamento.



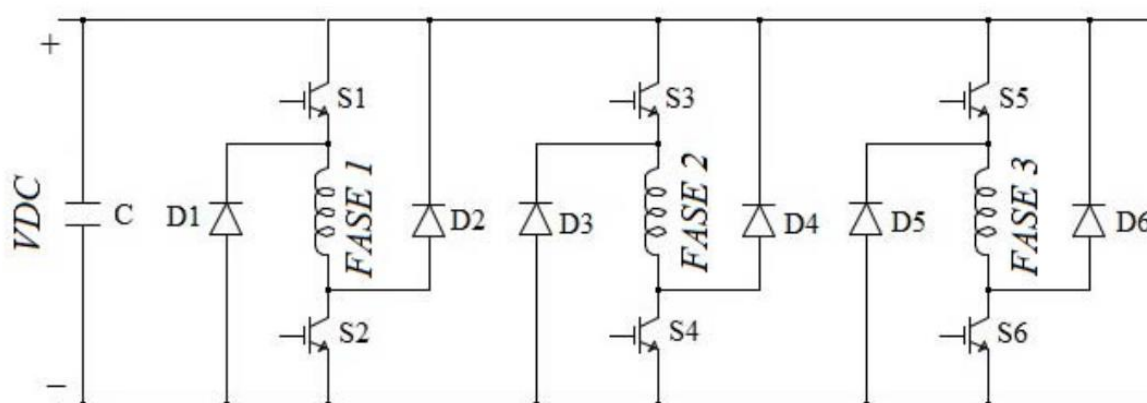
Fonte: (ANDRADE et al, 2011).

2.4. Conversor em Ponte Assimétrico

Por apresentar uma geometria particular, a MRV (Máquina a Relutância Variável) é comumente acionada por meio de conversores eletrônicos (CHANG & LIAW, 2011). Dentre os diversos tipos de conversores para motores a relutância variável, o Conversor em Ponte Assimétrico, comumente denominado por *Half-Bridge*, vem se mostrando promissor em diversas aplicações, estando entre essas, o acionamento e o controle de velocidade do Motor a Relutância Variável (SANTOS et al, 2014; HU, SONG & CAO, 2014).

A **Figura 2.3** apresenta um conversor eletrônico em ponte assimétrica utilizado para acionar a MRV (ANDRADE et al, 2011; OLIVEIRA, PELIZARIA & SGUAREZI FILHO, 2018). Nesse conversor, quando duas chaves de uma mesma fase são acionadas, a corrente vinda da fonte, fluirá pelas bobinas da respectiva fase. Quando duas chaves, de uma mesma

Figura 2.3: Topologia de um Conversor em Ponte Assimétrico



Fonte: (OLIVEIRA, PELIZARIA & SGUAREZI FILHO, 2018).

fase, são desligadas, a energia armazenada nas bobinas da respectiva fase retornará à fonte, estabelecendo, desta maneira, uma roda-livre entre os diodos da fase e a fonte de alimentação da MRV (OLIVEIRA, PELIZARIA & SGUAREZI FILHO, 2018).

Este procedimento de acionar e desligar as chaves de uma fase é repetido ciclicamente, acionado apenas um par de chaves por vez, observando a posição do rotor, pois um acionamento precipitado pode causar resultados indesejados.

2.5. Conclusão

Esse capítulo tratou dos princípios básicos de funcionamento de uma MRV (Máquina a Relutância Variável). Foram discutidas características físicas da estrutura da máquina, especificidades do acionamento e, por fim, uma alternativa de conversor foi apresentada. Partindo desta compreensão, é possível identificar as variáveis, modelar o nosso sistema e partir para uma descrição analítica do sistema MRV.

O próximo capítulo trata da modelagem matemática.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4

3.1. Introdução

Com os princípios de funcionamento da MRV (Máquina a Relutância Variável) em mente, a modelagem do sistema torna-se possível. Compreendendo a MRV trifásica de topologia 6x4 como um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas, a formulação do sistema em termos de equações de estado é uma estratégia bastante válida por permitir a solução deste tipo de problema no domínio do tempo. Como em outros tipos de máquinas existentes, a MRV pode ser modelada em termos de equações que descrevem seu comportamento elétrico e mecânico.

Esse capítulo tem como objetivo apresentar o modelo matemático utilizado na descrição das características elétricas e mecânicas da MRV 6x4.

3.2. Equacionamento das forças mecânicas e das tensões elétricas de uma MRV

Como dito anteriormente, a MRV é constituída por uma estrutura de dupla saliência, onde os enrolamentos de uma fase estão dispostos em pares de dentes diametralmente opostos.

Sabendo que o fluxo concatenado (λ) por uma bobina pode ser descrito em termos do produto entre a corrente de fase (i) e a indutância da bobina (L), deste modo:

$$\lambda = Li \tag{3.1}$$

Também é importante lembrar que a tensão induzida em um indutor (e) é proporcional à variação do fluxo concatenado (λ) no tempo, ou seja:

$$e = \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.2)$$

Portanto, a tensão aplicada a uma bobina (v) pode ser determinada pela soma da queda de tensão provocada pelo condutor, onde R é a resistência do condutor, com a tensão induzida nesta bobina pela variação do fluxo enlaçado por esta em relação ao tempo, em outras palavras, temos:

$$v = Ri + e \quad (3.3)$$

Na qual podemos explicitar a tensão induzida na bobina (e) em termos do fluxo concatenado (λ), reescrevendo obtemos:

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.4)$$

É importante considerar que a indutância da bobina (L) varia com o incremento, ou decremento, da área do rotor sobreposta pelo estator, de maneira que, para uma máquina rotativa, temos o seguinte:

$$L(\theta) = \frac{N^2 \mu A(\theta)}{l} \quad (3.5)$$

Em que:

- N é o número de espiras na bobina;
- μ é a permissividade magnética;

- $A(\theta)$ é a área do polo do rotor sobreposta pela área do polo do estator;
- l é a distância entre os polos do estator e rotor.

Como a área $A(\theta)$ varia ao longo do tempo proporcionalmente ao ângulo entre rotor e fase, a indutância de fase (L) é função indireta do ângulo de fase.

Dito isto, substituindo (3.1) em (3.4) aplicando as regras de derivação convenientes, obtemos o visto a seguir, na equação (3.6):

$$v = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.6)$$

Como a velocidade angular instantânea (ω) é definida como:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.7)$$

Substituindo (3.7) em (3.6) obtemos:

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

A equação (3.8) consegue descrever, de forma satisfatória, o estado elétrico de uma máquina elétrica, no entanto, para as finalidades almejadas, isso não é o bastante. É necessário inserir o comportamento mecânico da MRV. Para tal, no caso da máquina sendo usada como motor, a energia elétrica que entra no sistema provocará um conjugado eletromagnético (T_{emg}). O que por sua vez, será em parte dissipado pelos efeitos da inércia ($J \frac{d\omega}{dt}$) e atrito $D\omega$ do sistema, e produzirá um conjugado mecânico (T_{mec}) como saída, desta forma, podemos equacionar o comportamento mecânico da máquina como sendo:

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

Onde:

- D é o coeficiente de atrito viscoso do sistema;
- J é o momento de inércia do sistema;

O conjugado eletromecânico pode ser definido como sendo:

$$T_{emag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} \quad (3.10)$$

O conjunto da equação (3.8) e (3.9) podem descrever de maneira satisfatório tanto o comportamento elétrico, quanto o comportamento mecânico de uma MRV de uma única fase. Para cumprir com os objetivos de modelo, este entendimento deve ser expandido para um sistema de máquina trifásica.

3.3. Equacionamento das tensões de uma MRV com três fases no estator

Desprezando os efeitos das indutâncias mutuas entre cada bobina, as tensões elétricas em cada fase passam a obedecer ao modelo monofásico descrito pela equação (3.8). Em outras palavras, partindo desta aproximação, é considerado apenas o efeito das perdas nos fios, por efeito Joule, e os efeitos da tensão induzida, em cada bobina, pela variação do fluxo concatenado. Desta forma, para uma MRV trifásica, a tensão elétrica, em cada fase, pode ser descrita como sendo:

$$\begin{cases} v_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + i_A \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\ v_B = R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + i_B \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\ v_C = R_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} + i_C \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \end{cases} \quad (3.11)$$

Sendo que, v_A é a tensão referente a fase A , v_B é a tensão referente a fase B e v_C é a tensão referente a fase C .

Reescrevendo (3.11) na forma matricial, obtemos:

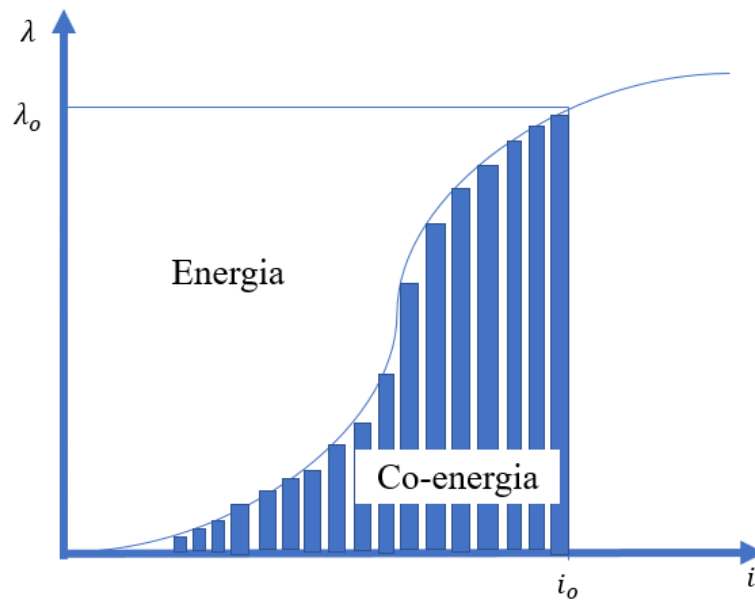
$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A + \omega \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & R_B + \omega \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & R_C + \omega \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A \\ L_B \\ L_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

O modelo matemático da máquina trifásica ainda deve incluir a representação de seu comportamento mecânico.

3.4. Equacionamento das Forças de uma MRV trifásica

Agora emprega-se o conceito de co-energia (W^{co}) como um caminho para expandir o desenvolvimento obtido para a equação (3.9). A figura a seguir exemplifica o conceito de co-energia, que nada mais é do que um artifício matemático que faremos uso para simplificar os cálculos, veja **Figura 3.1**.

Figura 3.1: Conceito de co-energia



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Em termos de co-energia a relação de fluxo magnético em j qualquer será dado por:

$$W^{co}(\theta, i) = \int_0^i \lambda(\theta, i) di \quad (3.13)$$

Substituindo (3.1) em (3.13) podemos obter a co-energia em termos de indutância e corrente de fase:

$$W^{co}(\theta, i) = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.14)$$

Para uma máquina de três fases, escreve-se que:

$$\begin{cases} W_A^{CO} = \frac{1}{2} L_A i_A^2 \\ W_B^{CO} = \frac{1}{2} L_B i_B^2 \\ W_C^{CO} = \frac{1}{2} L_C i_C^2 \end{cases} \quad (3.15)$$

Do congado eletromagnético instantâneo vem que:

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{CO}(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.16)$$

Para uma MRV trifásica, resulta um conjugado formado pelo conjugado individual de cada fase, desta forma:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_A^{CO}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_B^{CO}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_C^{CO}}{\partial \theta} \quad (3.17)$$

Assim, substituindo a equação(3.16) na equação (3.17), obtemos que o conjugado eletromagnético (T_{emag}) total para esse sistema será dado por:

$$T_{emag} = \frac{1}{2} \left[i_A \left(\frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \right) + i_B \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} i_B \right) + i_C \left(\frac{\partial L_C}{\partial \theta} i_C \right) \right] \quad (3.18)$$

Para obter conjugado mecânico da máquina, ainda é necessário acrescentar as perdas por atrito e inércia do rotor, substituindo (3.18) em (3.9) finalmente obtemos uma expressão para o conjugado mecânico de um motor elétrico.

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \left[i_A \left(\frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \right) + i_B \left(\frac{\partial L_B}{\partial \theta} i_B \right) + i_C \left(\frac{\partial L_C}{\partial \theta} i_C \right) \right] - D\omega - J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

A matriz de estados que representa o comportamento mecânico e elétrico do motor a relutância variável trifásico é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ T_{mec} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} & \frac{1}{2} i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & 0 & 0 & 0 & i_A \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \\ 0 & L_B & 0 & 0 & i_B \frac{\partial L_B}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_C & 0 & i_C \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} di_A/dt \\ di_B/dt \\ di_C/dt \\ d\omega/dt \\ d\theta/dt \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Em que, ao longo do trabalho, a matriz das resistências será apelidada de matriz A e a matriz das indutâncias será apelidada de matriz B ao longo deste trabalho do trabalho.

3.5. Conclusão

A modelagem matemática realizada durante este capítulo teve como objetivo relacionar as variáveis de interesse de uma MRV trifásica acionada como motor. Adequando-se bem as características da máquina em estudo, esse modelo foi construído levando em consideração apenas as influências das indutâncias próprias nas bobinas de cada fase do estator.

Para a resolução do modelo aqui elaborado, o próximo capítulo é dedicado na construção de aplicação computacional. Com o auxílio do *software* MATLAB® e *Simulink*, as equações serão resolvidas e a resposta do modelo poderá ser avaliada.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

4.1. Introdução

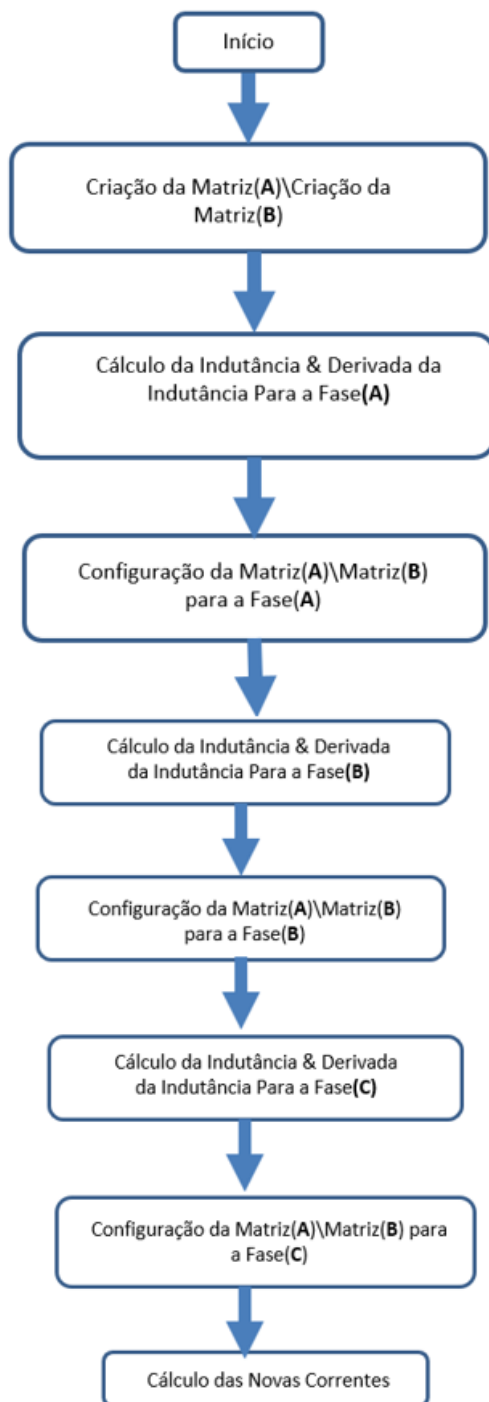
Empregando a poderosa capacidade de cálculo dos computadores modernos, a implementação computacional de um modelo matemático permite o vislumbre, de maneira aproximada, do comportamento de um sistema antes da construção de protótipos. Esta prática facilita a detecção de erros na fase de projeto e conduz a economia de tempo e recursos por proporcionar o amadurecimento do projeto antes do eventual processo executivo.

Esse capítulo aborda a implementação do modelo, outrora descrito, para o motor a relutância variável de topologia 6x4 no ambiente computacional MATLAB® e *Simulink*, bem como, ferramentas providas por este software.

4.2. Simulação da Máquina a Relutância Variável

No ambiente de desenvolvimento do MATLAB®, para a construção das matrizes A (matriz das resistências) e B (matriz das indutâncias), são construídas matrizes de dimensão 5x5 e em seguida inicializadas como os valores construtivos da máquina, como a resistência da bobina (R_A), o coeficiente de inércia do sistema (J), coeficiente de atrito viscoso (D), como pode ser visto logo abaixo, veja **Figura 4.1**:

Figura 4.1: Fluxo das tarefas executadas pelo modelo da MRV



Fonte: (Elaborado pelo autor).

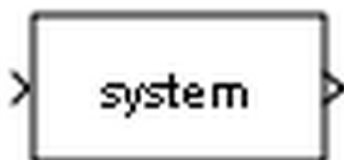
Para esse trabalho os respectivos valores adotados para as constantes resistência da bobina (R_A), coeficiente de inércia do sistema (J) e coeficiente de atrito viscoso (D) são 0,32 Ω , $6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e com o valor de $8 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.

Os valores de tensão (v), corrente (i), velocidade angular (ω), ângulo de fase (θ), e conjugado (T_m) são fornecidos como parâmetros do objeto “*Sistema_naolinear*”. Os valores da indutância e da derivada da indutância em relação ao ângulo de fase são calculados para cada fase por meio da função auxiliar “*find_u*”. O resultado é inserido nas posições adequadas na matriz A e B, o código fonte pode ser melhor avaliado pelo leitor no **APÊNDICE A – SCRIPT MODELAGEM DA MRV 6X4**.

No procedimento para a fase A, e para as demais fases, o valor do ângulo de fase é deslocado 120° e os cálculos são refeitos. Com o modelo da máquina devidamente montado, os valores das derivadas da corrente, ângulo de fase, e velocidade angular em relação ao tempo são calculados.

O ambiente *Simulink* proporciona um bloco muito útil na implementação de funções de variáveis de estado, o *S-Function* (Função-S). Esse bloco permite que *scripts*, previamente escritos, interajam com resultados produzidos no momento que a simulação acontece. O bloco *S-Function* pode ser visto na **Figura 4.2** a seguir.

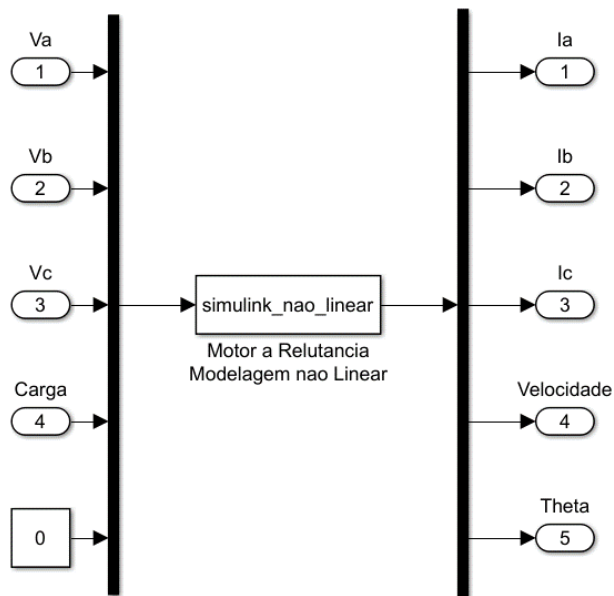
Figura 4.2: Bloco S-Function



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O bloco do sistema motor a relutância variável ficou da seguinte maneira, **Figura 4.3**:

Figura 4.3: Implementação de uma MRV no ambiente Simulink.

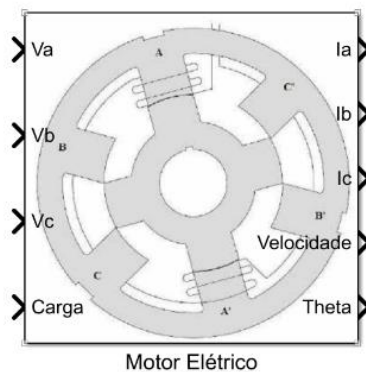


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Sendo que, V_a , V_b e V_c as tensões das fases A, B e C. $Carga$ a carga no eixo do motor elétrico, I_a , I_b , I_c as correntes das fases A, B e C respectivamente. $Velocidade$ é a velocidade angular instantânea da máquina, enquanto θ é o ângulo do rotor em relação ao estator. Com a utilização de blocos de barramentos *Mux* (Multiplexador) e *Demux* (Demultiplexador), o *script* que implementa a MRV pode ser instanciado com os valores das tensões de cada fase e o conjugado do motor para um dado instante, além de retornar os valores de corrente de cada fase, a velocidade angular da MRV e o ângulo de fase. Os valores de tensão de cada fase são calculados pelo bloco conversor de ponte simétrica, que será apresentado mais a diante.

Com o sistema MRV implementado, este sistema pode ser empacotado em um subsistema e tratado como um bloco único no decorrer da elaboração da simulação. Para este trabalho, o subsistema MRV pode ser representado da seguinte maneira, veja **Figura 4.4**:

Figura 4.4: Bloco MRV



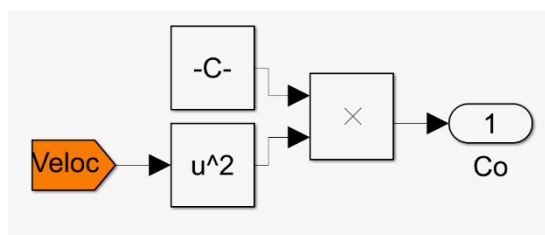
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Vale ressaltar que para este trabalho, a carga no eixo da MRV é modelada por uma equação do tipo:

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

Onde C_o é o conjugado mínimo requerido da máquina, K é uma constante, ω é a velocidade angular instantânea do rotor e C_c é o conjugado resultante. Tomando C_o igual a zero e K como sendo igual a 3.7089×10^{-4} N·m, a carga no eixo da MRV ficou da seguinte maneira, veja **Figura 4.5**:

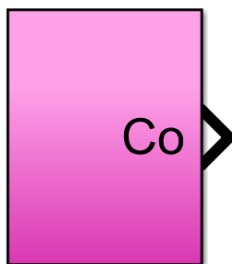
Figura 4.5: Carga no Eixo da MRV



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Sendo que, este conjunto de operações é encapsulado em um subsistema denominado comportamento da carga. É possível visualizar esse subsistema por meio da **Figura 4.6** a seguir

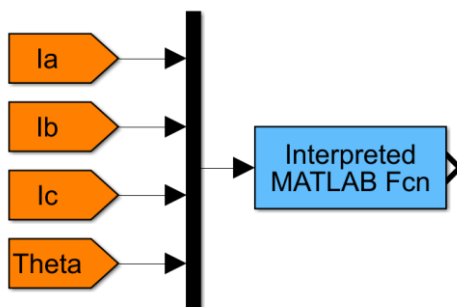
Figura 4.6: Bloco Subsistema Comportamento da Carga.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para o cálculo do conjugado produzido pela MRV um bloco do tipo *Interpreted MATLAB Function* (Intérprete de função MATLAB) foi utilizado. Este bloco implementa uma função escrita no MATLAB na simulação, em outras palavras, a função recebe e envia resultados para a simulação do *Simulink* de forma interativa. O código utilizado para o cálculo do conjugado pode ser visualizado no **APÊNDICE C – SCRIPT Conjugado da mrv**. A **Figura 4.7** a seguir apresenta o bloco responsável pelo cálculo do conjugado.

Figura 4.7: Cálculo do Conjugado produzido pela MRV

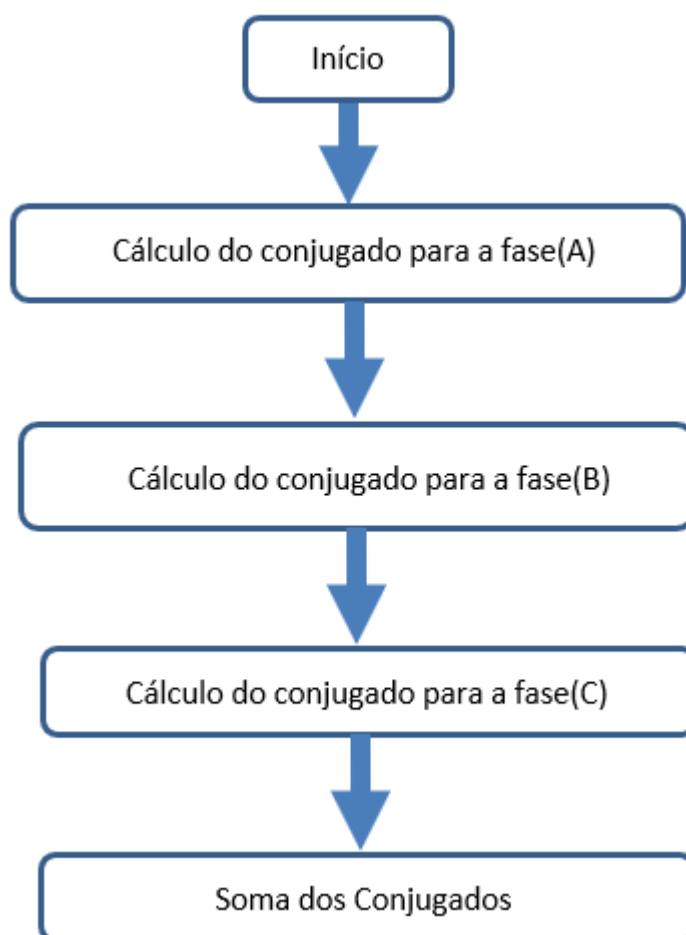


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Basicamente, este subsistema implementa a Equação (3.19), onde a entrada *Theta* é

convertida no ângulo de cada fase, e com o ângulo de fase e a corrente da determinada fase, a função “*find_u*” calcula a derivada da indutância em relação ao ângulo de fase, o resultado é utilizado para calcular o conjugado de cada fase separadamente, por meio do produto da corrente de fase ao quadrado, derivada da indutância dividida por dois e, por fim, os conjugados são somados proporcionando o conjugado total, conforme descrito em no **Capítulo 3**. A **Figura 4.8** apresenta o fluxo seguido pelo algoritmo para o cálculo do conjugado do motor elétrico.

Figura 4.8: Fluxo seguido pelo algoritmo para o cálculo do conjugado.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ainda cabe descrever com mais detalhes o funcionamento da função “*find_u*”. Responsável por calcular a indutância própria da fase e sua respectiva derivada, a função

“*find_u*” recebe como parâmetros o módulo (*I_entrada*) e o ângulo (*Theta_entrada*) da corrente na fase em questão. Ainda são utilizadas variáveis locais como a matriz *C*, que nessa função armazena os coeficientes que modelam o comportamento da indutância da MRV para determinado ângulo e módulo de corrente, a corrente máxima (*CorrenteLs*), a corrente mínima (*CorrenteLi*) que a máquina foi ensaiada e a derivada do ângulo (*Angulo*).

Em um primeiro momento os valores recebidos em *I_entrada* são avaliados, caso o valor seja maior que *CorrenteLs*, esse é substituído por *CorrenteLs*. Caso o valor seja menor que *CorrenteLi* esse é substituído por *CorrenteLi*. Esse procedimento tem o objetivo de ajustar os valores recebidos em *I_entrada* entre os valores máximos e mínimos de correntes admitidos pelo modelo. Os valores resultantes são armazenados na variável *I*.

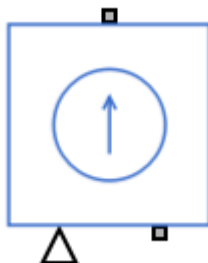
Em seguida os ângulos recebidos pela entrada *Theta_entrada* são ajustados para valores entre 0° e 45° e a variável *derivada* recebe 1, ou -1 se o ângulo em *Theta_entrada* for maior que 45°. Por fim o valor resultante das operações com *Theta_entrada* são transformados em um índice e armazenados na variável *Theta1*.

Finalmente os coeficientes correspondentes a linha *Theta1* são pesquisados na matriz *C* e por meio da função nativa do MATLAB “*polyval*” são convertidos em valores de indutância correspondentes aos valores contidos na variável *I* e armazenados na variável *ind1*. Em seguida, *Theta1* é incrementado em uma unidade e os valores de indutância são novamente calculados e armazenados na variável *ind2*. Os valores *ind1* e *ind2* são utilizados para calcular a derivada da indutância e a indutância na fase. O *script* utilizado pode ser visto no **APÊNDICE E – FIND_U**.

4.3. Simulação do conversor para uma Máquina a Relutância Variável

Como dito anteriormente para a realização da simulação no domínio do tempo foi utilizado o ambiente *Simulink/MATLAB*®. Para a criação do bloco que representa o conversor meia-ponte (*Half-bridge*), foi o um bloco que implementa uma fonte de corrente controlável, para representar as bobinas de uma MRV, veja **Figura 4.9**.

Figura 4.9: Bloco Controlled Current Source fornecido pelo Simulink.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para a modelagem do conversor, também foram utilizado um modelo pronto *MOSFET* e *Diodo* presente na biblioteca de componente do *Simulink*, veja **Figura 4.10**.

Figura 4.10: MOSFET (a) e Diodo (b) providos pelo Simulink.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O bloco *DC Voltage Source* também é acrescentado ao modelo de converso com a intenção de simular a atuação de uma bateria no sistema, neste trabalho o valor de tensão adotada para a simulação foi de 800 V, **Figura 4.11**.

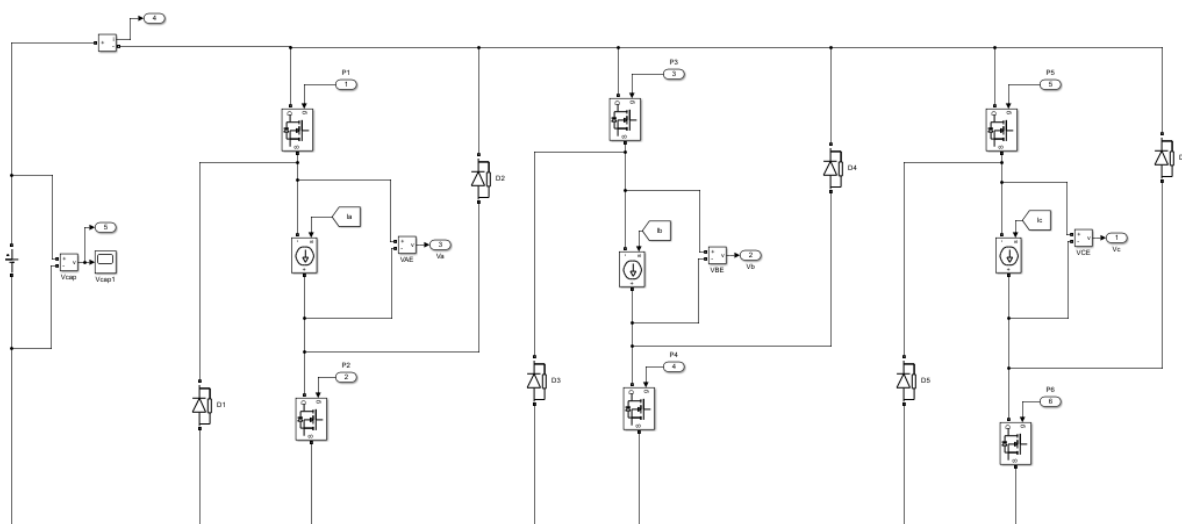
Figura 4.11: Bloco DC Voltage Source do Simulink



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O esquema do conversor em ponte simétrico para o acionamento da MRV 6x4, é apresentado na **Figura 4.12** abaixo.

Figura 4.12: Conversor em Ponte Simétrico.

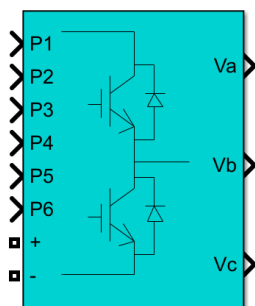


Fonte: (Elaborado pelo autor).

O valor de corrente que atravessa o bloco *Controlled Current Source* é provido pelo bloco que modela a MRV. Os blocos *MOSFET* são disparados por um segundo *script* que monitora a posição do rotor e toma a decisão de qual fase energizar.

De maneira semelhante a implementação da MRV no *Simulink*, o conjunto Conversor em ponte simétrico também foi encapsulado e tratado como um único bloco subsistema como pode ser visto logo a baixo, veja **Figura 4.13**:

Figura 4.13: Bloco Conversor em Ponte Simétrico



Fonte: (Elaborado pelo autor).

As entradas P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 e P_6 são as entradas para os impulsos que controlarão o estado dos blocos *MOSFET*, a entrada positiva (+) e negativa (-) são destinadas a conexão de blocos fonte de tensão. Este subsistema tem como saída as tensões de fase V_a , V_b e V_c .

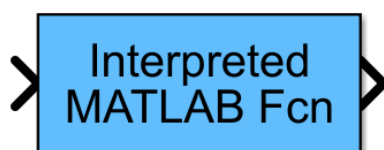
4.4. Disparo das chaves

Como discutido no Capítulo 2, o funcionamento da máquina a relutância variável (MRV) é extremamente sensível ao momento de energização de cada fase, portanto, para que o modelo apresente o comportamento desejado, a posição angular do rotor deve ser conhecida a cada instante. É importante lembrar que uma das variáveis retornadas pelo bloco MRV é o ângulo de fase da máquina. O objetivo do acionamento de uma MRV como motor é acionar a fase de forma a puxar o rotor, provocar conjugado no sentido do movimento. Essa tarefa pode ser executada a partir do momento em que cada fase é acionada antes dos polos do estator alcançar a posição de alinhamento. Com o intuito de avaliar o ângulo de fase e tomar a decisão de acionar determinada fase interativamente, um *script* foi implementado para acionar os *MOSFETS* do bloco Conversor em Ponte Simétrico em função do ângulo de fase.

Para a seleção da fase a ser acionada, uma condição de acionamento é avaliada, caso a condição seja verdadeira, ou seja, caso o rotor esteja na posição preterida, a matriz “u” funciona como uma matriz de *flags*, sinalizadores. Quando uma posição da matriz “u” recebe o valor 1, o *MOSFET* do bloco Conversor em Ponte Assimétrico ligado a esta posição será acionado. O caso em que “u” recebe 0 indica para o componente *MOSFET* que este deve continuar inoperante, o código fonte pode ser melhor avaliado pelo leitor no **APÊNDICE B**.

Para integrar este *script* com o ambiente *Simulink*, o bloco *Interpreted MATLAB Function* foi empregado. Este bloco tem com propriedade aplicar uma função MATLAB em uma entrada provida pelo *Simulink* no decorrer da simulação, o bloco pode ser visto na **Figura 4.14**.

Figura 4.14: Bloco *Interpreted MATLAB Function*.



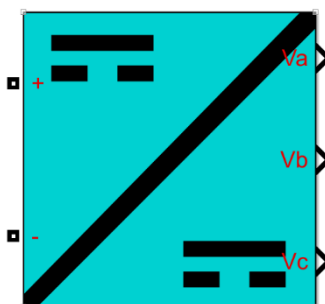
Fonte: (Elaborado pelo autor).

De maneira semelhante ao realizado na implementação da MRV do ambiente *Simulink*, blocos do tipo *Mux* e *Demux* são utilizados para concatenar as entradas deste bloco, e separar as saídas a recepção do comando por cada *MOSFET* do Bloco Conversor em Ponte Simétrica.

Não o bastante, um subsistema transpõe o ângulo *Theta* calculado na saída do subsistema Bloco MRV para o correspondente no primeiro quadrante, pois a avaliação de ângulo de disparo é realizado apenas para esta faixa de valores ($0^\circ - 90^\circ$).

Por fim, a conexão do subsistema Conversor em Ponte Simétrica com o bloco que interpreta a função de disparo das chaves, mais o subsistema que ajusta o ângulo *Theta*, formam o subsistema Conversor DC-DC. A **Figura 4.15** apresenta este subsistema.

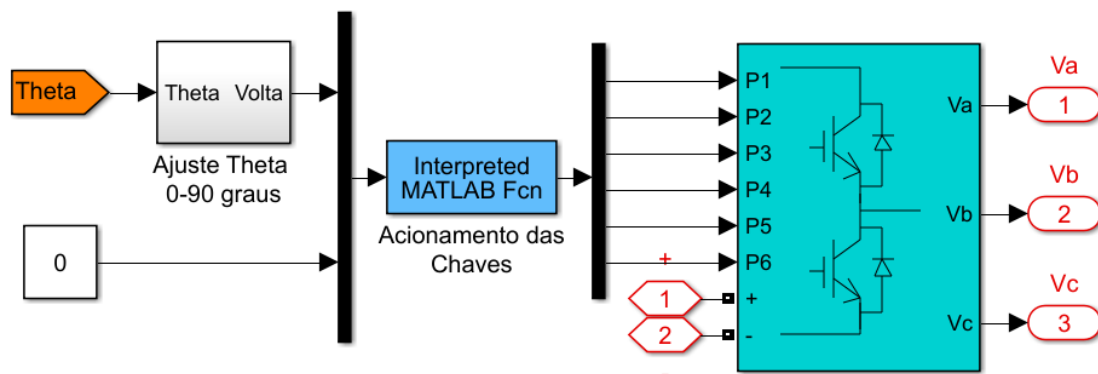
Figura 4.15: Subsistema Conversor DC-DC



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Sendo V_a , V_b , V_c as respectivas tensões das fases A, B e C da MRV 6x4. Este subsistema tem como entrada a fonte de tensão que alimenta o sistema. O interior deste Bloco pode ser visualizado logo a seguir na **Figura 4.16**.

Figura 4.16: Interior do Subsistema Conversor DC-DC



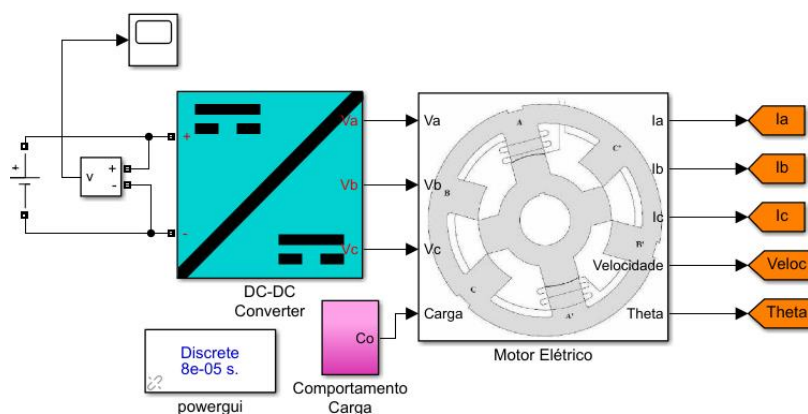
Fonte: (Elaborado pelo autor).

A figura acima, o bloco intitulado “Acionamento das Chaves” corresponde ao bloco *Interpreted* discutido até o momento. Embora este bloco receba duas entradas, uma das entradas é nula, sendo reservada para aplicações futuras.

4.5. Resultados da Simulação do Motor a Relutância Variável de Topologia 6x4

A simulação da MRV de topologia 6x4 ficou da seguinte maneira, **Figura 4.17**.

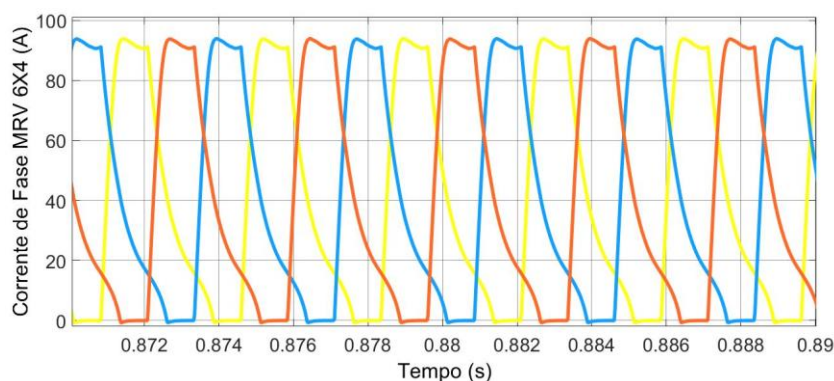
Figura 4.17: Simulação MRV 6x4



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Sendo esta composta pelos blocos anteriormente descritos. Uma das funcionalidades do *Simulink* proporciona ao usuário a possibilidade de visualizar graficamente a resposta de cada processo. Com o objetivo de validar o modelo outrora descrito, a forma de onda das correntes de fase foi visualizada, sendo que cada corrente é apresentada em cores distintas, nas quais o eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical a amplitude da corrente. O resultado pode ser visualizado a seguir, **Figura 4.18**.

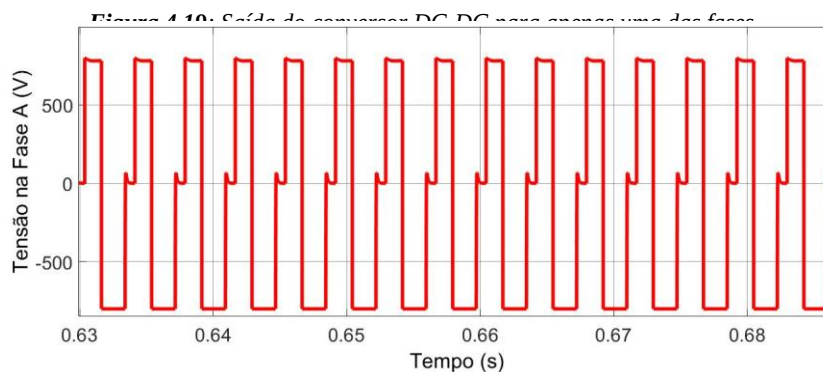
Figura 4.18: Correntes MRV 6X4



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como pode ser visto na, a resposta para a corrente de fase do modelo está em consonância com o observado em trabalhos como (ANDRADE et al, 2011), (ZHUPING & DELIANG, 2005), (OLIVEIRA, A. L.; PELIZARIA, A.; SGUAREZI FILHO; 2018).

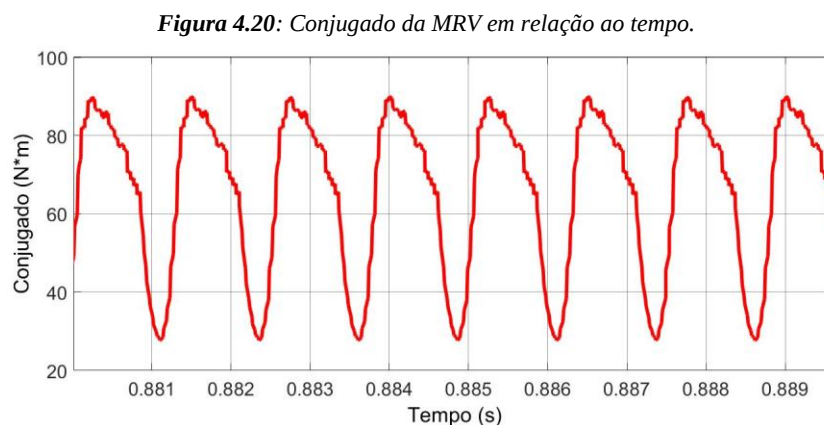
De maneira semelhante, a resposta do bloco DC-DC converter também foi visualizada e validada pela comparação de trabalhos da área, por questões de visualização, apenas a tensão de uma das fases é mostrada na **Figura 4.19** a seguir.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Este comportamento para a tensão de saída no conversor em Ponte Simétrica em trabalhos (ANDRADE et al, 2011) e (DIAS et al, 2017).

Por fim, o conjugado da MRV também pode ser visualizado na **Figura 4.20** que segue:



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na **Figura 4.20** é possível visualizar a característica pulsante do conjugado da MRV. Os pontos tremulados da imagem, podem ser creditados ao passo de simulação adotado, neste caso 10^{-8} s, muito embora o resultado tenha se aproximado do visto em (DIAS et al, 2017) e (PRAMOD et al, 2019).

4.6. Conclusão

Mesmo sem a utilização de dados derivados de ensaios do objeto de estudo, a combinação de modelos matemáticos e blocos disponibilizados pelo *Simulink* propiciaram um modelo de comportamento próximos aos encontrados na realidade. Esta característica possibilita ao projetista verificar o comportamento de um sistema, antes mesmo da implementação física.

Ao interligar diversos subsistemas pode ser notado que modelos que se aproximam da realidade, ao interagirem com outros modelos também fiéis, produzem resultados próximos aos encontrados nas implementações físicas, como é o caso do conjugado da MRV,

que nasce da interação entre o subsistema MRV, o subsistema Conversor DC-DC, um bloco fonte de tensão, disponibilizado pelo *Simulink*, e um modelo de conjugado exigido.

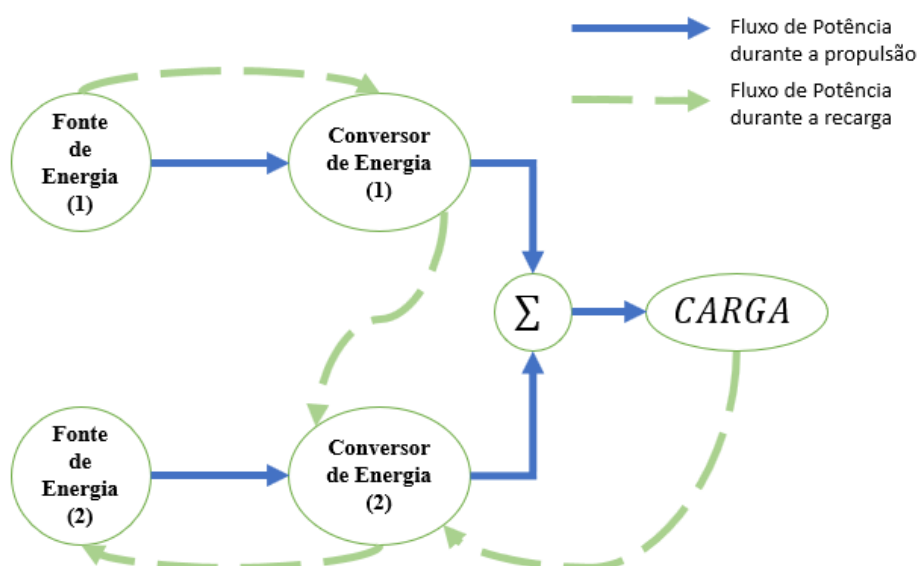
Portando, esta característica pode ser aproveitada na execução de uma etapa de pré-avaliação de uma ideia. Antes da elaboração de propostas onerosas, a inteiração entre modelo consagrados pode trazer a percepção do quão conveniente uma abordagem pode ser.

5. CONCEITOS DE VEÍCULO HÍBRIDO

Veículos que empregam ao menos dois processos distintos de conversão de energia, na obtenção de propulsão, podem ser classificados como veículos híbridos (EHSANI, 2005). Este termo costuma estar veiculado a automóveis impulsionados por uma combinação de ICE (*Internal Combustion Engine* - Motor a Combustão Interna) e EM (*Electric Motor* - Motor Elétrico).

Os HEV (*Hybrid Electric Vehicle* - Veículo Híbrido), veículos impulsionados pela associação de EM e ICE, podem ampliar o tempo de autonomia do veículo ao implementar frenagem regenerativa, na qual parte da energia gasta no processo de frenagem pode ser recuperada e armazenada em uma bateria que, por sua vez, pode alimentar parte do sistema propulsor. Ainda é possível utilizar o ICE para recarregar a bateria que alimenta o EM, otimizar a operação de cada motor para que ambos possam trabalhar de maneira a suprimir as desvantagens um do outro (MILLER, 2001). A **Figura 5.1** ilustra o conceito da arquitetura híbrida.

Figura 5.1: Fluxo de potência em um veículo elétrico híbrido.



Fonte: (adaptado de EHSANI, 2005).

Os HEV não possuem mais de dois sistemas de proporção, haja vista que o

incremento no número de fontes de impulsão poderia tornar o sistema demasiadamente complexo. Com o objetivo de resgatar parte da energia perdida durante a frenagem, um dos sistemas contém um conversor bidirecional, enquanto o outro sistema pode ter um conversor tanto unidirecional, quanto bidirecional (EHSANI, 2005).

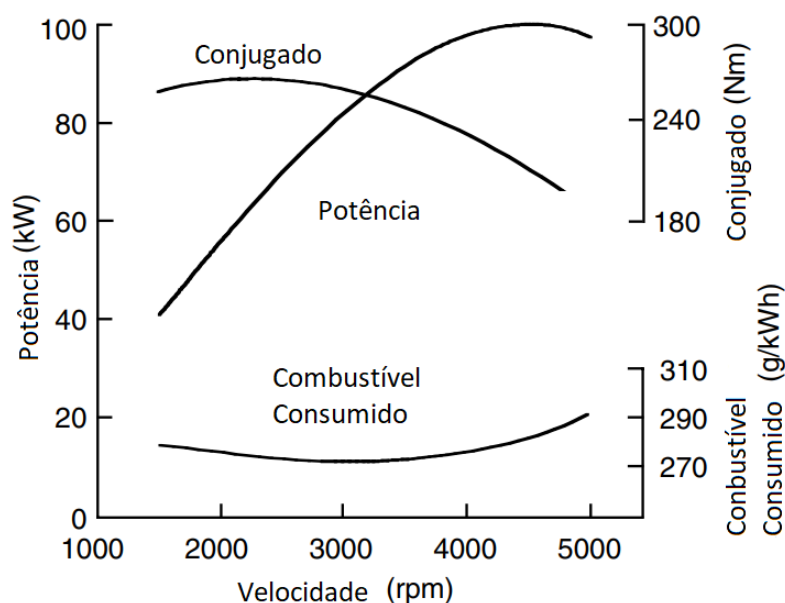
A grande dificuldade relacionada a veículos híbridos está em encontrar espaço para a alocação de partes e peças adicionais. A adição de novos sistemas ao projeto do veículo está associada a necessidade de acomodação de componentes extras. Este fator é ainda mais proeminente em carros em configurações convencionais, projetados para acomodar apenas um motor a combustão interna (LEITMAN, 2009).

5.1. Motor a Combustão

O motor a combustão interna costuma ter uma característica longe da ideal requerida para tracionar um veículo. A **Figura 5.2** apresenta o comportamento típico de um motor a combustão interna, aqui chamado de ICE. Na região de velocidade menor, 2000 rpm para este exemplo, o conjugado do motor apresenta um comportamento mais suave, esta é a região em que a amplitude do conjugado menos varia. As melhores características de combustão e conjugado são observadas na região intermediárias da **Figura 5.2**, por volta de 3000 rpm neste caso. A medida de a velocidade continua aumentando, o conjugado continua a diminuir por causa da diminuição da pressão efetiva média causada pelo aumento das perdas no motor.

Contudo, a potência aumenta e encontra o ponto de máximo por volta de 5000 rpm, uma velocidade considerada alta para este caso. Além desse ponto, o conjugado passa a diminuir de maneira mais brusca com o incremento da velocidade, esse efeito tem como resultado a diminuição da potência produzida pelo motor.

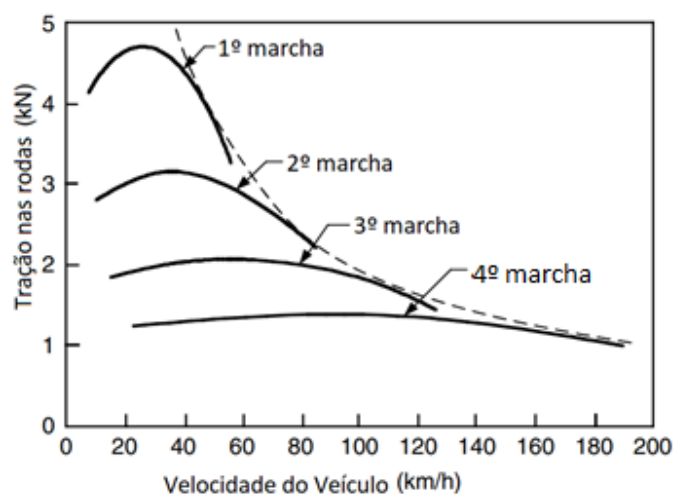
Figura 5.2: Característica de performance de um motor a combustão interna.



Fonte: (adaptado de EHSANI, 2005).

Em aplicações veiculares, a velocidade máxima permitida para um ICE (*Internal Combustion Engine* - Motor a Combustão Interna) é configurada para ser próxima da velocidade em que a potência é máxima, desta maneira a faixa de velocidade que pode ser utilizada é estreita. Para modificar esta circunstância, múltiplas relações de transmissão são empregadas como pode ser visto na **Figura 5.3**.

Figura 5.3: Tração fornecida por um ICE para múltiplas relações de transmissão.



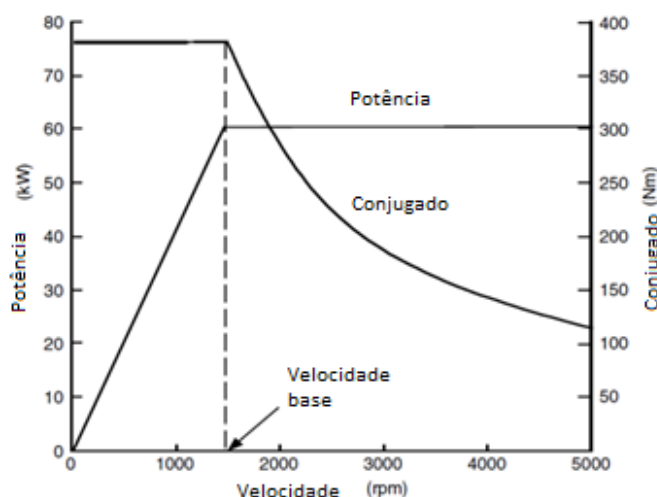
Fonte: (adaptado de EHSANI, 2005).

5.2. Motor Elétrico

5.2.1. Características do Motor Elétrico Em Veículos Elétricos

O motor elétrico em veículos elétricos possui um comportamento semelhante ao apresentado na **Figura 5.4**. É possível notar um comportamento de conjugado constante e potência variável, à medida que a velocidade, no eixo da máquina, é incrementada ou decrementada, para a região compreendida entre 0 rpm e 2000 rpm, esses valores podem sofrer modificações de acordo com o projeto e tipo do motor elétrico empregado. Após determinada velocidade limite, a máquina passa a comportar-se em regime de potência constante e conjugado inversamente proporcional à velocidade de rotação, veja **Figura 5.4**.

Figura 5.4: Comportamento de um motor elétrico em relação a variação da velocidade.



Fonte: (adaptado de EHSANI, 2005).

Quando operando em velocidades abaixo da velocidade base, a tensão de alimentação do motor elétrico é aumentada pelo conversor à medida que a velocidade de rotação do eixo é incrementada enquanto o fluxo magnético é mantido constante. No momento em que a velocidade base é excedida, a tensão é mantida constante, ao passo que o fluxo magnético no entreferro decai hiperbolicamente com o incremento da velocidade, nesta região, o conjugado decai enquanto a potência entregue pelo motor se mantém constante.

Essa característica do motor elétrico de disponibilizar o conjugado mais elevado e constante quando a rotação do eixo da máquina ainda é menor que a velocidade base permite que o veículo tenha elevada força de tração em baixas velocidades. Ou seja, a condução pode

ser mais confortável na partida do veículo, ou quando o veículo necessita subir um aclive. Também é importante ressaltar que a capacidade do motor elétrico de entregar potência constante para uma ampla faixa de velocidades é um comportamento considerado ideal para veículos, mesmo sem empregar múltiplas relações de transmissão, o conjugado do motor elétrico, na região de potência constante, já possui um comportamento semelhante ao obtido nas condições da **Figura 5.3** para o motor a combustão (EHSANI, 2005).

5.2.2. Tipos de Motores Elétricos Utilizados na Propulsão de Veículos

Diferentemente dos regimes de trabalhos em que os motores elétricos são submetidos em aplicações industriais, em aplicações automobilísticas, os motores elétricos são frequentemente submetidos a regimes de aceleração, desaceleração brusca, manutenção da velocidade acima da nominal por faixas de tempo consideráveis, regimes de operação com frequente variação de velocidade (MILLER, 2001).

Para aplicações automobilísticas, podem ser citados o motor DC, o motor de indução gaiola de esquilo, o motor síncrono de ímã permanente sem escovas e o motor a relutância variável.

5.2.2.1. Motor DC

Adaptações de carros convencionais em HEV podem ser obtidas empregando motores DC. Esse motor possui funcionamento satisfatório em operações que requerem velocidade variável ajustável, partidas frequentes e frenagem regenerativa. Por possuir controle de velocidade simples, em relação aos demais motores elétricos (controle de tensão nos enrolamentos do estator é um exemplo) e relação conjugado/velocidade adequados, o motor DC é uma opção para obtenção de propulsão em HEV e EV (MILLER, 2001).

No entanto, esta máquina possui eficiência inferior a outras máquinas elétricas, como o motor a indução, além do mais, o fato de possuir comutadores diminui a confiabilidade da máquina e aumenta a frequência com que manutenções devem acontecer. Confiabilidade é uma necessidade relevante na escolha de sistemas de propulsão em aplicações automobilísticas, por este fato, motores sem escovas tendem a ser mais atrativos (ANDRADE et al, 2001).

5.2.2.2. *Motor de Indução*

Esse motor, com rotor tipo gaiola de esquilo, pode proporcionar ganhos confiabilidade, eficiência e robustez com relação ao motor DC. Por outro lado, o controle de velocidade não é tão simples. Esta máquina apresenta uma resposta pobre para técnicas de controle de velocidade por tensão e frequência. Fato este que dificulta sua aplicação em contextos em que a velocidade muda bruscamente e frequentemente (EHSANI, 2005).

Uma possibilidade frequentemente explorada é o emprego de controle vetorial, o qual melhora a resposta do motor ao custo da aplicação de eletrônica de potência e circuitos microcontrolados. O controle vetorial mantém o campo do estator em alinhamento com o campo do rotor, com o intuito de sempre produzir conjugado máximo. No entanto, esta técnica pode ter eficiência reduzida com cargas leves (EHSANI, 2005).

5.2.2.3. *Motor síncrono de ímã permanente*

Os motores de ímã permanente são os mais competitivos com relação a propulsão de EV e HEV. Este motor pode ser encontrado em veículos elétricos de grandes montadoras de veículos. Este motor possui elevada densidade de potência, ou seja, uma máquina de dimensões reduzidas pode entregar potência equivalente a motores DC de maiores dimensões (LEITMAN, 2009).

Também é importante citar o fato dessa máquina possuir aquecimento lento, por não possuir enrolamentos no rotor, eficiência elevada em relação as demais máquinas citadas. O controle deste motor pode ser tão simples quanto o empregado no motor DC. Em operação, esse motor pode ser considerado uma máquina elétrica que produz pouco ruído sonoro (EHSANI, 2005).

Como outrora mencionado, o grande gargalo na aplicação de motores síncronos de ímã permanente está no custo e dificuldade de obtenção de matéria prima para a produção da máquina, o ímã permanente utilizado na produção do rotor possui custo elevado e estoque limitado (EHSANI, 2005; JURCA, 2012).

5.2.2.4. *Motor a Relutância Variável*

Uma máquina robusta, pelo fato de possuir alta densidade de potência, tolerância a falta de fase. Por causa da geometria recortada e ausência de enrolamentos no rotor, esta é

uma máquina com custo de manutenção reduzido e que pouco aquece durante a operação. O motor a relutância variável apresenta boa eficiência para uma larga faixa de velocidade com relação as demais máquinas citadas (ANDRADE, 2011; OLIVEIRA, 2018).

Porém, ondulações no conjugado, interferência eletromagnética, elevado ruído no ciclo de funcionamento e necessidade de conversores microcontrolados para que a máquina possa trabalhar de maneira eficiente, dificultam aplicações automobilísticas deste tipo de máquina (EHSANI, 2005; ANDRADE, 2011).

5.3. Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos

5.3.1. Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos quando ao Nível de Híbridização

Existem diferentes maneiras de constituir um sistema de propulsão híbrido, as variações podem envolver desde de questões relacionadas a bateria empregada (tamanho e tipo) até o papel realizado pelo ICE (*Internal Combustion Engine* - Motor a Combustão Interna). Desta maneira, os HEV (*Electric Vehicle* - Veículo Híbrido) podem ser classificados quanto ao nível de híbridização, como pode ser visto na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1: Classificação de Veículos Híbridos Elétricos quanto nível de Híbridização

	Micro Híbrido	Meio Híbrido	Híbrido Completo	Híbrido Plug-in
Gerenciamento automático motor a combustão interna	X	X	X	X
Frenagem regenerativa com operação acima de 60 V		X	X	X
Motor elétrico em conjunto com Moto a combustão interna		X	X	X
Propulsão realizada apenas pelo motor elétrico em alguns momentos			X	X
Recarrega a bateria por meio da rede elétrica			X	X

Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

Vale comentar que o veículo elétrico híbrido plug-in é uma classe que não depende exclusivamente do motor a combustão interna para recarregar a bateria, também existe a possibilidade de recarga conectando a veículo a uma tomada (LEITMAN, 2009).

5.3.2. Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos quando a Configuração

No que tange eficiência energética e emissão direta de poluentes na atmosfera, carros elétricos (EV) podem ser vistos como vantajosos em relação a veículos convencionais, contudo, a performance, especialmente relacionada ao tempo de operação por carga de bateria, e muito menos competitiva, devido à baixa densidade de energia das baterias, comparadas a densidade de energia de combustíveis como gasolina ou diesel (e.g. gasolina

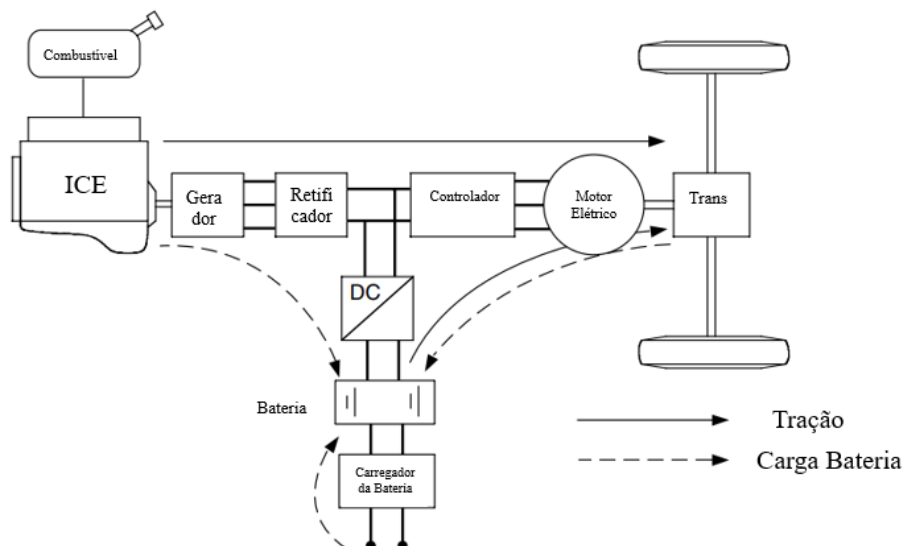
possui densidade de energia de 44,4 MJ/kg enquanto baterias modernas possuem em torno de 0,9 MJ/kg) (AJANOVIC & HAAS, 2013; EMADI, 2015)

De maneira mais genérica, a arquitetura dos HEV é definida como a conexão entre os componentes que definem as rotas do fluxo de energia e as portas de controle (EMADI, 2015). Atualmente os HEV, quanto a arquitetura, podem ser classificados em quatro tipos: híbrido série, híbrido paralelo, híbrido série-paralelo e híbrido complexo (EHSANI, 2005).

5.3.2.1. *Arquitetura Híbrido Série*

Em um HEV de arquitetura série, o EM (Electric Motor - Motor Elétrico) é responsável por tracionar o veículo, enquanto é alimentado por duas fontes de energia, geralmente, uma bateria e um ICE (*Internal Combustion Motor* - Motor a Combustão Interna), o qual tem sua energia mecânica convertida em elétrica por meio de um gerador. A bateria ainda pode ser recarregada por meio da atuação do EM como gerador em momentos de frenagem regenerativa, ou pelo ICE através do gerador. A **Figura 5.5** apresenta um esquemático da distribuição dos elementos de propulsão nesta arquitetura.

Figura 5.5: Configuração da arquitetura híbrida em série.



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

O tanque de combustível atua como fonte unidirecional de energia e o ICE acoplado ao gerador elétrico como um conversor unidirecional de energia. A saída do gerador elétrico passa por retificação, antes de ser conectada ao controlador do EM. A Bateria atua como uma fonte de energia bidirecional, esta pode ceder energia para o EM através de um conversor DC/DC, ou receber energia do ICE, do EM acionado como gerador pelo bloco de controlador do motor, ou de um carregador de bateria conectado à rede elétrica (EHSANI, 2005).

Por estar desacoplado mecanicamente das rodas, o ICE pode operar em qualquer ponto de sua curva conjugado x velocidade. Portanto, este pode, potencialmente, operar a maior parte do tempo na região de máxima eficiência energética, diminuindo questões relacionadas à emissão de poluentes, ou ainda, operar em máxima velocidade quando necessário (EMADI, 2015).

Por causa das características da curva conjugado x velocidade do EM, ele não necessita de transmissão com marchas, o que, por sua vez, torna o sistema mais barato (EMADI, 2015). Também, com o emprego de controle e tração, existe a possibilidade de instalar um EM em cada roda, fornecendo desacoplamento de velocidade, como uma

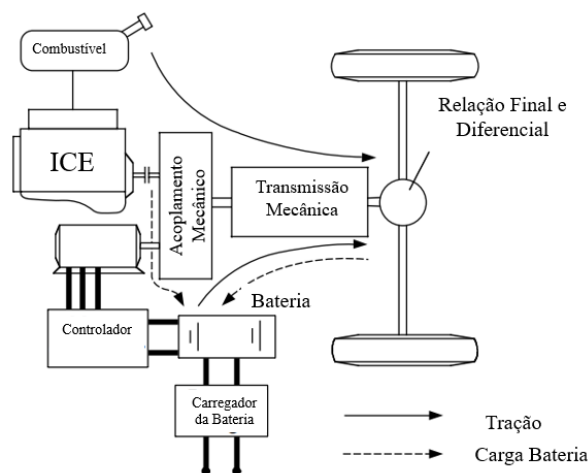
engrenagem diferencial, e limitando o escorregamento diferencial (EHSANI, 2005).

Contudo, a energia do ICE é convertida duas vezes (de mecânica para elétrica, no gerador, e de elétrica, novamente, para mecânica, no EM) o que faz com que a ineficiência do gerador e do EM, incrementem as perdas relacionadas a energia convertida pelo ICE. O gerador adiciona peso e custo ao veículo. Também é importante citar que nesta configuração, o EM deve ser dimensionado para os máximos requerimentos do sistema, desde que, ele atende sozinho à toda demanda de tração (EHSANI, 2005).

5.3.2.2. *Arquitetura Híbrido Paralela*

Nos HEV de arquitetura paralela, as rodas são tracionadas pelo ICE, de maneira semelhante ao que acontece nos veículos convencionais, mas, neste caso, o ICE é ajudado por um EM mecanicamente acoplado à transmissão. A potência do ICE e do EM se adicionam por acoplamento mecânico, como pode ser visto na **Figura 5.6**.

Figura 5.6: Configuração de uma arquitetura híbrida em paralelo.



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

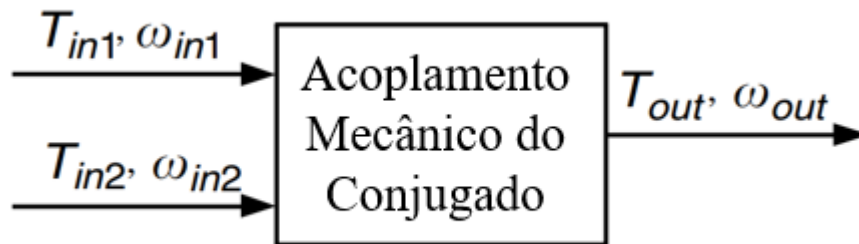
A potência do EM e do ICE podem ser combinadas de diversas maneiras, dentre as quais, podem ser destacadas: acoplamento de conjugado, acoplamento de velocidade e acoplamento de conjugado-velocidade.

5.3.2.2.1. *Arquitetura Paralela Acoplamento de Conjugado*

No acoplamento por conjugado, o conjugado do EM é somado ao conjugado do ICE,

ou o conjugado do ICE é dividido em duas partes: uma parte para propulsão do veículo e outra para a carga da bateria. A **Figura 5.7** apresenta de maneira conceitual o acoplamento mecânico pelo conjugado, o qual tem duas entradas.

Figura 5.7: Acoplamento Mecânico do Conjugado.



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

Uma das entradas é o conjugado do ICE enquanto a outra é o conjugado do EM. Se as perdas forem ignoradas, o conjugado pode ser descrito da seguinte maneira.

$$T_{out} = \frac{T_{in1}}{k_1} + \frac{T_{in2}}{k_2} \quad (5.1)$$

Onde k_1 e k_2 são constantes do dispositivo, T_{out} é o conjugado resultante, e T_{in1} e T_{in2} são os conjugados desenvolvido por cada motor. De maneira semelhante a velocidade angular instantânea (ω), pode ser escrita conforme segue:

$$\omega_{out} = k_1 \cdot \omega_{in1} = k_2 \cdot \omega_{in2} \quad (5.2)$$

Onde, ω_{in1} e ω_{in2} são as velocidades angular instantânea desenvolvidas por cada máquina, ω_{out} é a velocidade angular instantânea resultante do acoplamento.

Em HEV em arquitetura paralela com acoplamento de conjugado, ainda existem

diferentes maneiras como este acoplamento pode ser realizado, onde a caixa de transmissão pode estar em diferentes posições, com ou sem marchas. São classificadas em acoplamento em eixo (quando o EM e o ICE estão no mesmo eixo), e em acoplamento em dois eixos (quando estão em eixos separados) (EMADI, 2015).

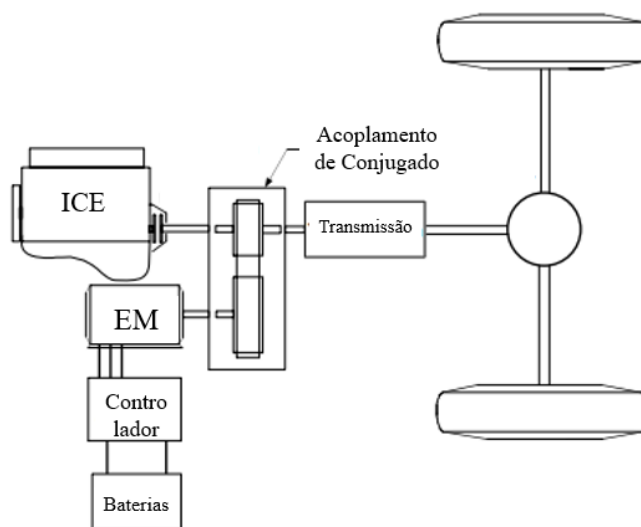
Por ser considerada a mais simples, a configuração de um eixo é mais comumente utilizada em carros convencionais adaptados em HEV (*Mild Hybrids*) onde o EM (*Electric Motor* - Motor Elétrico) auxilia na partida, em alguns momentos, contribui com potência e realiza frenagem regenerativa. Nesta configuração, o acoplamento de conjugado se dá pelo rotor da EM. A transmissão pode ser tanto entre o EM e o ICE (*posttransmission*) quanto entre o EM e as rodas (*pretransmission*) (EMADI, 2015).

Na configuração de *posttransmission*, a transmissão é utilizada para alterar o ponto de operação do ICE, com o objetivo de melhorar o desempenho do veículo. O EM deve ser projetado para atender uma ampla faixa de potência constante. Na configuração *pretransmission*, os motores devem operar na mesma faixa de velocidade, sendo que o conjugado de ambas as máquinas é modificado pela transmissão (EMADI, 2015).

O conjugado ainda pode ser acoplado mesmo com o EM e o ICE em eixos separados. Esta arquitetura permite com que parte da configuração de um veículo tradicional seja mantida, adicionando tração elétrica no outro eixo. Nesta configuração, os conjugados são somados e o veículo passa a ter tração nas quatro rodas (EMADI, 2015).

Como a transmissão de cada motor pode ter uma ou várias marchas, a arquitetura paralela com conjugado acoplado em dois eixos é tida como mais sofisticada. Ao mesmo tempo, esta sofisticação, possibilita a realização de vários perfis de conjugado, isso porque duas transmissões com múltiplas marchas podem vir a permitir que cada motor opere em sua região ótima, além de permitir mais flexibilidade nas características do motor (EMADI, 2015), a **Figura 5.8** exemplifica, de maneira esquemática, o acoplamento de conjugado em dois eixos.

Figura 5.8: Acoplamento de conjugado com dois eixos.

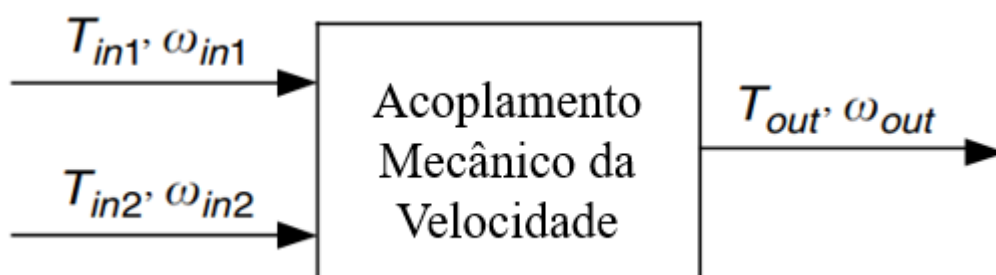


Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

5.3.2.2.2. Arquitetura Paralela com Acoplamento de Velocidade

Duas fontes distintas de conjugado podem ser acopladas pela velocidade, como mostrado na **Figura 5.9**.

Figura 5.9: Acoplamento Mecânico da Velocidade



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

Onde T_{in1} e ω_{in1} são o conjugado e a velocidade angular instantânea do motor 1, T_{in2} e ω_{in2} são o conjugado e a velocidade angular instantânea do motor 2, e T_{out} e ω_{out} são o conjugado resultante e a velocidade angular instantânea resultante do acoplamento, respectivamente.

A característica do acoplamento de velocidade pode ser descrita como:

$$\omega_{out} = k_1 \cdot \omega_{in1} + k_2 \cdot \omega_{in2} \quad (5.3)$$

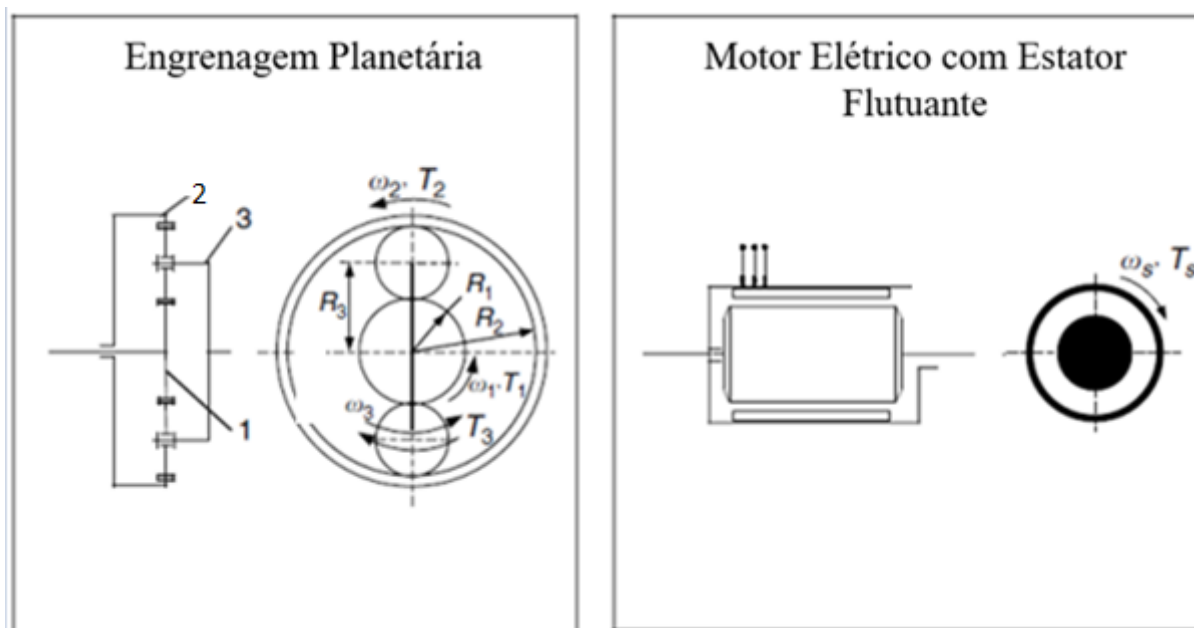
E também pela Equação (6.4)

$$T_{out} = \frac{T_{in1}}{k_1} = \frac{T_{in2}}{k_2} \quad (5.4)$$

Onde k_1 e k_2 são constantes do dispositivo de acoplamento.

Dois dispositivos tipicamente utilizados como acopladores de velocidade são a engrenagem planetária e motor elétrico com estator flutuante. Sendo a engrenagem planetária mais comumente utilizada. A **Figura 5.10** apresenta os dispositivos anteriormente discutidos.

Figura 5.10: Dispositivos de acoplamento de velocidades típicos.



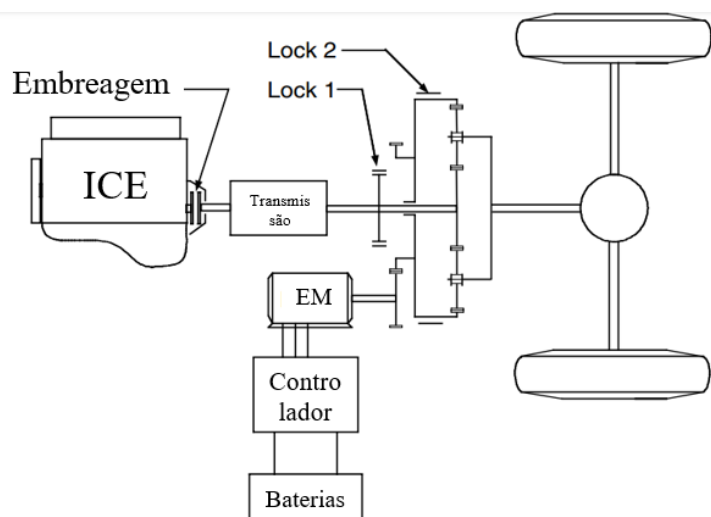
Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

A engrenagem Planetária consiste em um elemento de três conexões distintas: a engrenagem solar, a engrenagem anelar e o orbital, assinalados como 1,2,3, respectivamente, na **Figura 5.11**. O relacionamento de velocidade e conjugado indicam ser dispositivos de acoplamento de velocidade. As constantes k_1 e k_2 dependem apenas dos raios das engrenagens, ou do número de dentes se necessário.

Em uma configuração ordinária, as velocidades das engrenagens solar se adicionam e como saída tem-se a velocidade no orbital.

Assim como nos híbridos em paralelo por acoplamento de conjugado, a arquitetura híbrida com acoplamento de velocidade possui variações. A **Figura 5.11** a seguir exemplifica esta arquitetura.

Figura 5.11: Configuração híbrida elétrica com acoplamento de velocidades por engrenagem



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

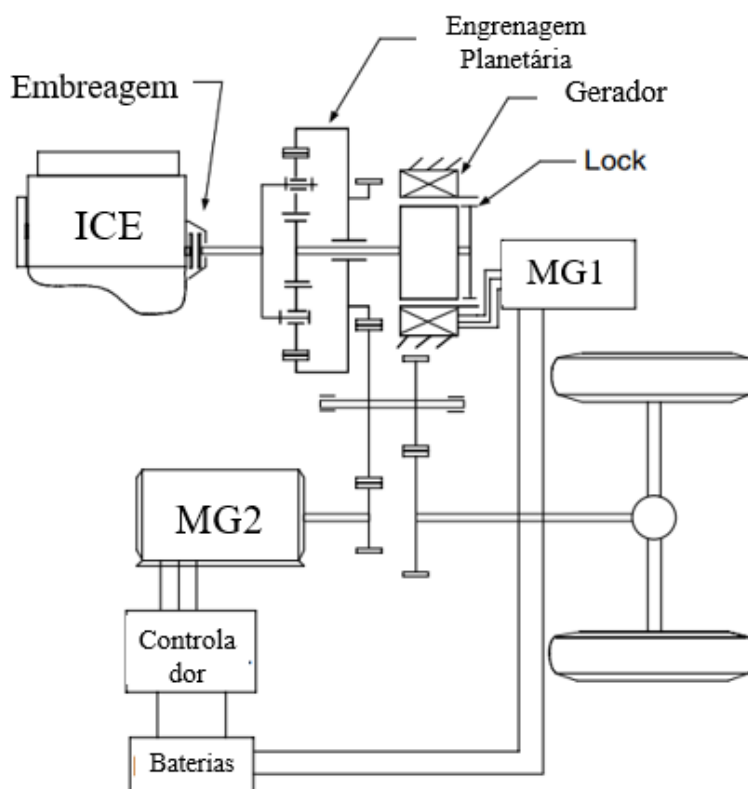
O ICE fornece potência para a engrenagem solar através da embreagem e da transmissão. A transmissão é utilizada para modificar a relação conjugado-velocidade do ICE de maneira a garantir a tração requisitada. Agora o EM, fornece potência por meio da engrenagem anelar. As travas 1 e 2 permitem que o veículo opere de diferentes maneiras, como carregar a bateria por meio do ICE, no modo puramente elétrico, no modo frenagem regenerativa e no modo tracionado unicamente pelo ICE (EHSANI, 2005).

Quando a influência da velocidade sobre a eficiência do motor é crítica para o projeto, o acoplamento de velocidade pode ser visto como uma solução, pois esta configuração permite liberdade na escolha das velocidades de cada motor (EHSANI, 2005).

5.3.2.3. *Arquitetura Híbrida Série-Paralelo*

Na arquitetura série-paralelo o tipo de acoplamento pode ser alternativamente escolhido. Combinando características das arquiteturas outrora descritas, nesta arquitetura o projetista tem uma liberdade maior na escolha com a qual cada planta (elétrica e a combustão) operará de maneira a possibilitar a operação otimizada em termos de performance e eficiência. Por exemplo, o acoplamento de conjugado poderia ser utilizado para baixas velocidades e subidas em aclives, enquanto o acoplamento de velocidade pode ser empregado em operações que exigem mais velocidade pois quando em acoplamento de velocidade o ICE pode operar na região de eficiência otimizada (EHSANI, 2005). A **Figura 5.12** a seguir exemplifica a arquitetura série-paralela aplicada ao Toyota Prius.

Figura 5.12: Arquitetura com acoplamento integrado de conjugado e velocidade (Toyota Prius).



Fonte: (Adaptado de EHSANI, 2005).

Nesta configuração, um pequeno motor-gerador (MG1) de 20kW é conectado na engrenagem planetária (unidade de acoplamento de velocidades) pela engrenagem solar. O motor convencional (ICE) é conectado na engrenagem planetária através do orbital, e este é conectado às engrenagens solar e anelar através das engrenagens satélites. A engrenagem planetária divide a velocidade (rotação) do motor convencional (ICE) em duas, uma parte vai para MG1 através da engrenagem solar, a outra parte vai para as rodas através da engrenagem anelar e de uma relação final de transmissão. Um motor-gerador maior (MG2) de 67 kW também é conectado na engrenagem planetária através da engrenagem anelar e diretamente ligado através de uma transmissão às rodas (EHSANI, 2005)

Na partida, o ICE provoca a rotação da engrenagem solar e das demais engrenagens. À medida que o veículo começa a se movimentar, o controlador começa a drenar potência do gerado para o motor elétrico, o que faz com que um conjugado contrário ao movimento surja no gerador (consequentemente na engrenagem solar). Para suprir esta resistência, o controlador aumenta a solicitação de potência do ICE. O resultado é uma força na engrenagem anelar que faz com que o veículo comece a ganhar velocidade.

Quando o veículo está em movimento as relações entre os motores é configurada para que o ICE opere eficientemente e em baixa rotação. MG1 faz com que a engrenagem satélite gire no sentido que favorece o movimento, a rotação da engrenagem satélite adiciona-se a rotação da engrenagem conectada ao ICE (engrenagem orbital) fazendo com que a engrenagem anelar gire com maior velocidade. Nesta configuração MG1 funciona como motor e MG2 funciona como gerador, ora alimentado MG1, ora alimentado a bateria. O controlador controla o fluxo de energia da bateria que ora alimenta MG1, ora recebe energia de MG2. Este modo é chamado de *Overdrive* do Prius (alta velocidade e baixa energia).

Quando é desejável que o veículo receba mais potência, o MG2 trabalha como motor em conjunto com o ICE. Nesta configuração, grande parte da potência produzida pelo ICE vai para as rodas e uma parcela menor vai para o MG1, que neste momento atua como gerador proporcionando energia para MG2, via engrenagem planetária. MG2 adiciona conjugado para a engrenagem anelar. A bateria também pode fornecer potência extra para MG2.

Operando impulsionado apenas pelo sistema elétrico, o ICE fica parado enquanto o MG1 gira livremente sem carga no sentido oposto ao do movimento. A tração das rodas é totalmente provida pelo MG2 atuando como motor.

5.4. Conclusão

O termo HEV (*Hybrid Electric Vehicle* - Veículo Híbrido) designa não apenas uma modalidade de veículo, mas uma família de veículos impulsionados por uma planta elétrica e uma planta mecânica, onde o papel desenvolvido por cada elemento pode variar e definir novas arquiteturas e maneiras de buscar o melhor aproveitamento dos motores instalados no veículo.

Com os conceitos básicos a respeito de HEV devidamente compreendidos a maneira como se dá a interligação do ICE e do HEV pode vir a ser mais clara, juntamente com as justificativas pelas escolhas tomadas. A próxima etapa é a modelagem e simulação dos componentes de um veículo híbrido.

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VEÍCULO HÍBRIDO

Com uma ideia clara de como a planta mecânica e a planta elétrica podem interagir uma com a outra, a próxima etapa é modelar e simular o veículo híbrido. Os elementos relacionados ao sistema de tração tradicional serão oriundos da biblioteca *Simscape* do *Simulink*. Conforme o realizado no **CAPÍTULO 4**, uma breve apresentação será realizada de cada novo componente introduzido na simulação, desta maneira objetiva-se discutir com maior riqueza de detalhes a simulação construída. A planta de tração elétrica foi construída nos capítulos anteriores e não será novamente apresentada. Os elementos relacionados ao acoplamento da planta elétrica com a planta mecânica também serão abordados. Todos os exemplos aqui demonstrados foram construídos com o emprego do MATLAB® 2017b.

6.1. Conversão de sistema físico para Simulink e de Simulink para sistema físico

Os blocos utilizados para a modelagem do veículo possuem sinais incompatíveis com os blocos tradicionais do *Simulink*. Para que as bibliotecas possam se comunicar entre si, é necessário a utilização de blocos de conversão. A **Figura 6.1** apresenta os blocos responsáveis pela conversão dos sinais dentro do *Simulink*.

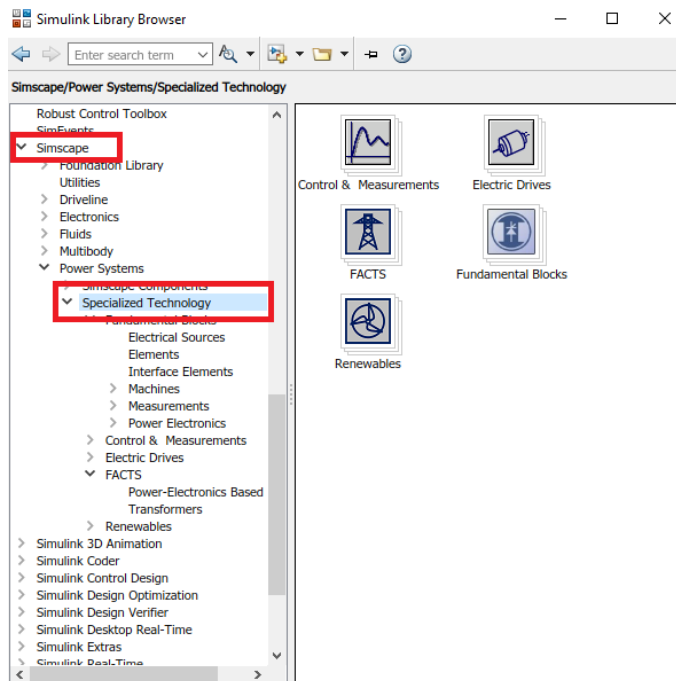
Figura 6.1: Em (1) vemos o bloco responsável por converter sinais físicos para sinais *Simulink*, em (2) temos a operação contrária.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Chama-se, sinal físico (PS – *Physic System*), sinais que estão associados aos blocos que modelam sistemas físicos dentro do *Simulink*. Com exceção da biblioteca *Specialized Technologies*, veja **Figura 6.2**, encontrada dentro da biblioteca *Power Systems*, as bibliotecas contidas dentro da *Simscape* possuem blocos com sinais do tipo PS.

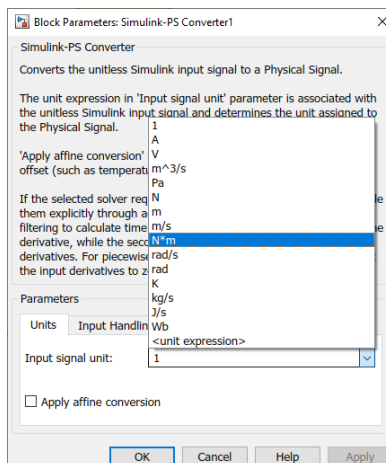
Figura 6.2: Localização biblioteca *Specialized Technology*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para converter um sinal do domínio *Simulink* (S) para um sinal no domínio físico (PS), basta conectar a entrada de (2), **Figura 6.1**, no sinal que se deseja converter e sinalizar a unidade métrica no menu interior ao bloco, como visto logo a seguir, **Figura 6.3**.

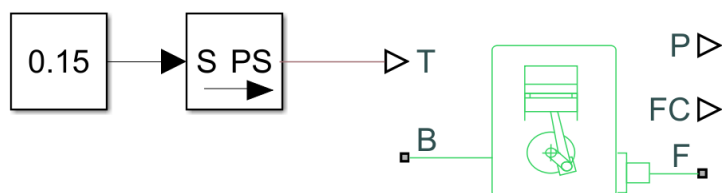
Figura 6.3: Configuração de sistema métrico no bloco de conversão de sistema *Simulink* para físico



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Esta conversão é necessária mesmo para sinais físicos adimensionais como na **Figura 6.4** a seguir.

Figura 6.4: Exemplo de Conversão de sinal no domínio Simulink para o domínio físico



Fonte: (Elaborado pelo autor).

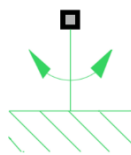
Na **Figura 6.4**, o bloco no canto esquerdo se chama *Constant* (Constate). Esse bloco fornece um valor constate. O bloco seguinte converte o valor constate do bloco *Constant* para um sinal do tipo PS para que possa ser atribuído a porta *T*. Como será explicado mais a frente, a porta *T* é um sinal normalizado, portanto, adimensional. Mesmo neste caso, a conversão é necessária.

Para a realização da operação oposta, converter do domínio físico (PS), para o domínio *Simulink* (S) basta conectar a entrada de (1), **Figura 6.1**, ao sinal que se deseja converter.

6.2. Referência mecânica rotacional

Os blocos que trabalham no domínio físico (PS) precisam ter acoplados a si uma referência, no caso dos blocos no domínio físico rotacional (como é o caso dos blocos aqui utilizados) a porta de referência (geralmente a porta *B*) deve ser conectada ao bloco *Mechanical Rotational Reference*, este bloco pode ser visto logo a seguir, veja **Figura 6.5**.

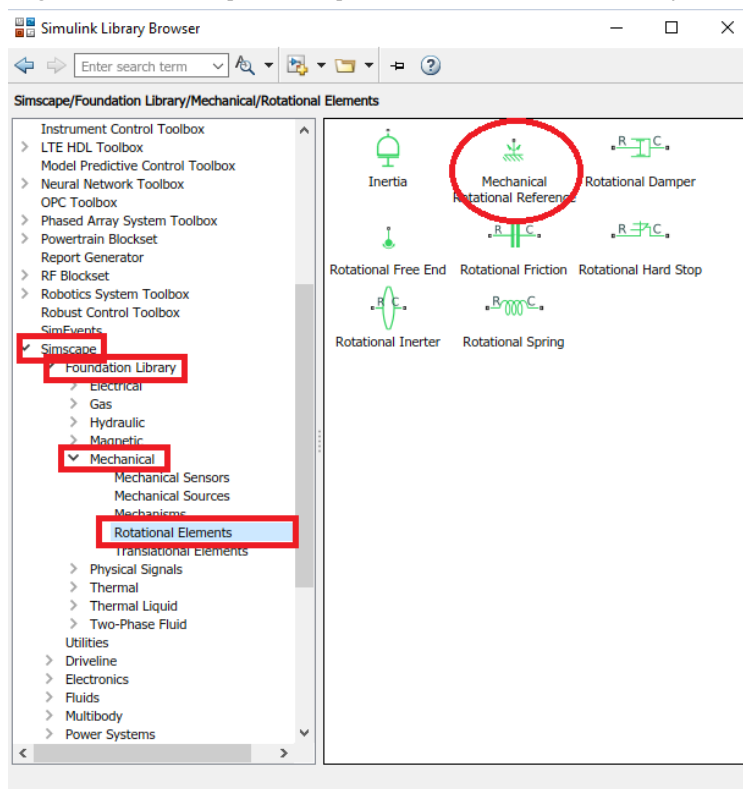
Figura 6.5: Bloco de referência rotacional do sistema.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Esse bloco pode ser encontrado por meio do caminho *Simscape -> Foundation Library -> Mechanical -> Rotation Elements* como pode ser visto em logo abaixo em **Figura 6.6**.

Figura 6.6: Caminho para o componente *Mechanical Rotational Reference*.

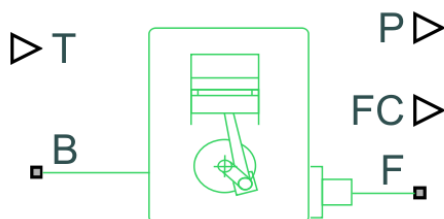


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3. Motor a combustão

O *Simulink* ainda disponibiliza blocos com a capacidade de simular o comportamento de partes de um carro. O bloco do *Generic Engine* representa um motor de combustão interna genérico, **Figura 6.7**.

Figura 6.7: Bloco Generic Engine

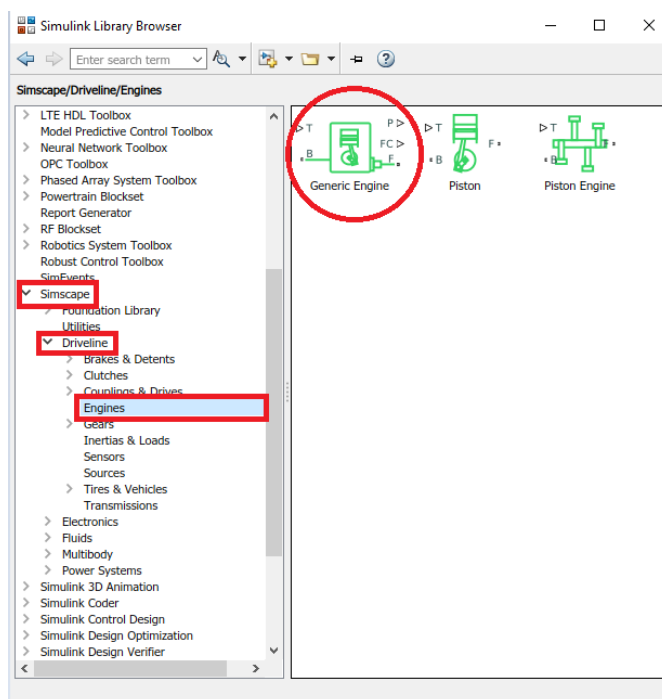


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A principal função do bloco *Generic Engine* (Motor Genérico) é fornecer o conjugado calculado do motor a combustão em (F), como saída, baseado no sinal de entrada (T), que representa um sinal normalizado de aceleração, e na velocidade angular instantânea do motor a combustão (ω). As saídas (P) e (FC) proveem os valores de Potência Entregue pelo motor e a taxa de consumo de combustível respectivamente. A porta (B) é acoplada à referência do sistema.

Este bloco pode ser encontrado por meio do caminho *Simscape -> Driveline -> Engines* como o apresentado em

Figura 6.8: Caminho para encontrar o componente Generic Engine.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Esse modelo é especificado por uma função de Potência Demandada, $g(\omega)$, a qual fornece a máxima potência para uma dada velocidade angular instantânea (ω). A Potência Entregue pelo motor a combustão (P) é modelada como função da velocidade angular instantânea (ω) e do sinal normalizado de aceleração (T), com pode ser visto na equação (6.1) a seguir:

$$P(\omega, T) = T \cdot g(\omega) \quad (6.1)$$

Sendo o conjugado mecânico podendo ser definido pela equação (6.2):

$$T_{mec} = \frac{P(\omega, T)}{\omega} \quad (6.2)$$

Substituindo a Equação (6.1) em (6.2) observa-se de maneira mais clara a interdependência entre o conjugado da saída (T_{out}), velocidade angular instantânea (ω), e a aceleração normalizada, ou demanda de conjugado, (T).

$$T_{out} = \frac{T \cdot g(\omega)}{\omega} \quad (6.3)$$

Tomando ω_o como a velocidade angular instantânea em que o motor entrega a maior potência possível, $P_{m\acute{a}x}$, para este modelo, a Potência Demandada, $g(\omega)$, é definida como função da máxima Potência Entregue pelo motor ($P_{m\acute{a}x}$) e por $p(u)$.

$$g(\omega) = P_{\text{máx}} \cdot p(u) \quad (6.4)$$

Onde $p(1) = 1$, e $\frac{dp(1)}{du} = 0$, em que u é definido como fração de ω em relação a ω_o , como visto em (6.5).

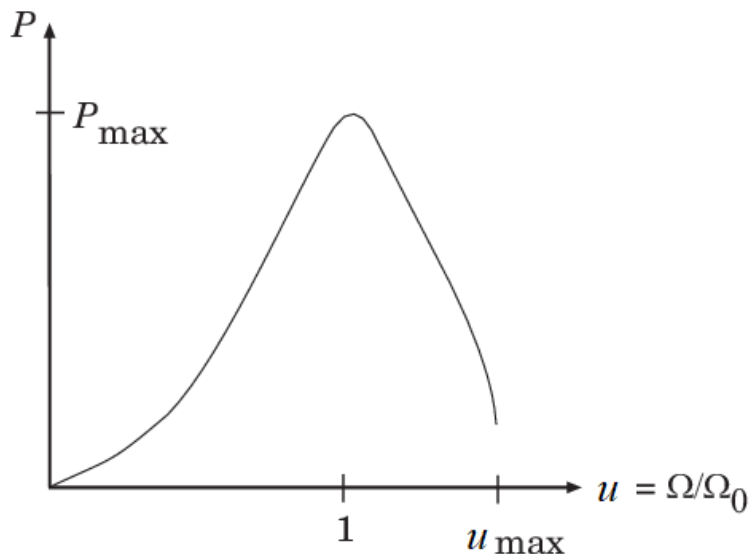
$$u = \frac{\omega}{\omega_o} \quad (6.5)$$

O termo $p(u)$ pode ser obtido por meio de dados ensaiados do motor, como potência entregue (P) por velocidade angular instantânea (ω), conjugado (F) por velocidade angular instantânea (ω). O bloco *Generic Engine* calcula o valor de $p(u)$ por meio de um polinômio de terceiro grau, do tipo:

$$p(u) = p_1 \cdot u + 2p_2 \cdot u^2 - p_3 \cdot u^3 \quad (6.6)$$

O qual é calculado para as condições $p_1 + p_2 - p_3 = 1$ e $p_1 + 2p_2 - 3p_3 = 0$. A **Figura 6.9** apresenta o comportamento típico da potência demanda (P) em relação a variação da velocidade angular normalizada (u).

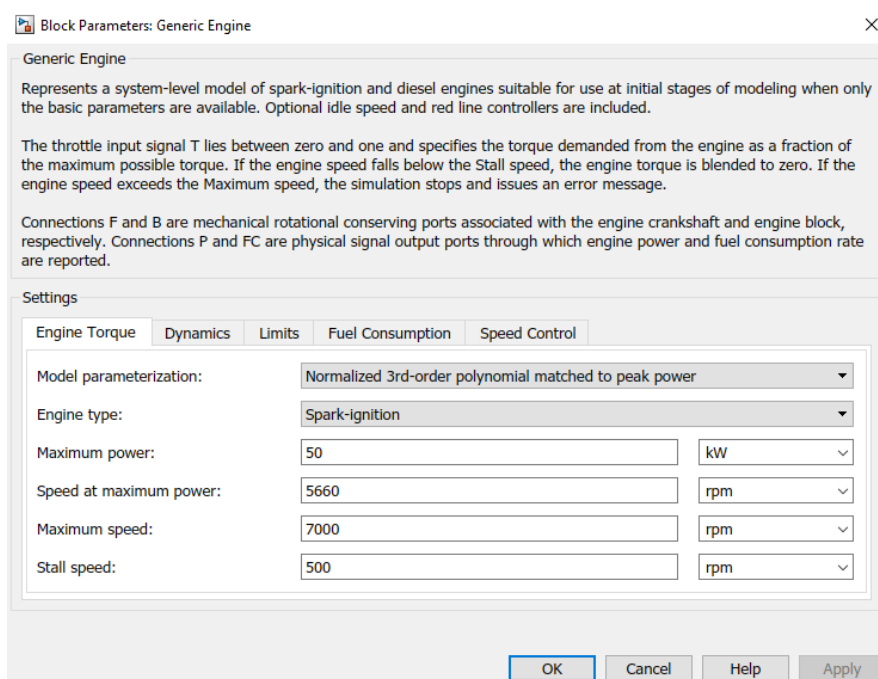
Figura 6.9: Comportamento típico da demanda de potência em relação a velocidade angular normalizada.



Fonte: (adaptado de MATLAB, 2010).

Para parametrizar esse modelo usando o polinômio de terceiro grau é necessário acessar as configurações do componente com um clique duplo do botão esquerdo do mouse sobre o mesmo. Uma tela conforme a **Figura 6.10** a seguir aparecerá.

Figura 6.10: Tela de configurações do bloco Generic Engine.

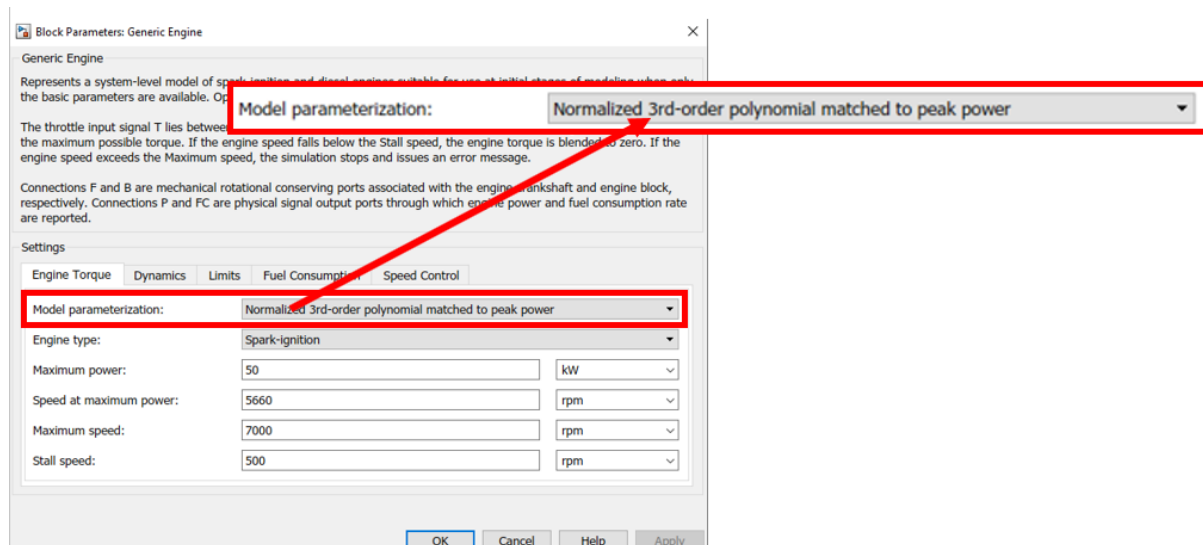


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3.1. Conjugado do Motor a Combustão

Na aba *Engine Torque* (Conjugado do motor), em *Model parameterization* (Parâmetros do modelo) a opção *Normalized 3rd-order polynomial matched to peak power* (Polinômio de 3º ordem normalizado combinado com a potência de pico) deve ser selecionada conforme visto em **Figura 6.11**.

Figura 6.11: Seleção do modelo polinômio de terceira ordem para a parametrização do bloco *Generic Engine*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como existem vários valores possíveis para os coeficientes da Equação (6.6), o *Simulink* fornece dois tipos de motores (*Spark-Ignition* e o *Diesel*) cada um com seus respectivos coeficientes. Esses valores podem ser conferidos na **Tabela 6.1**.

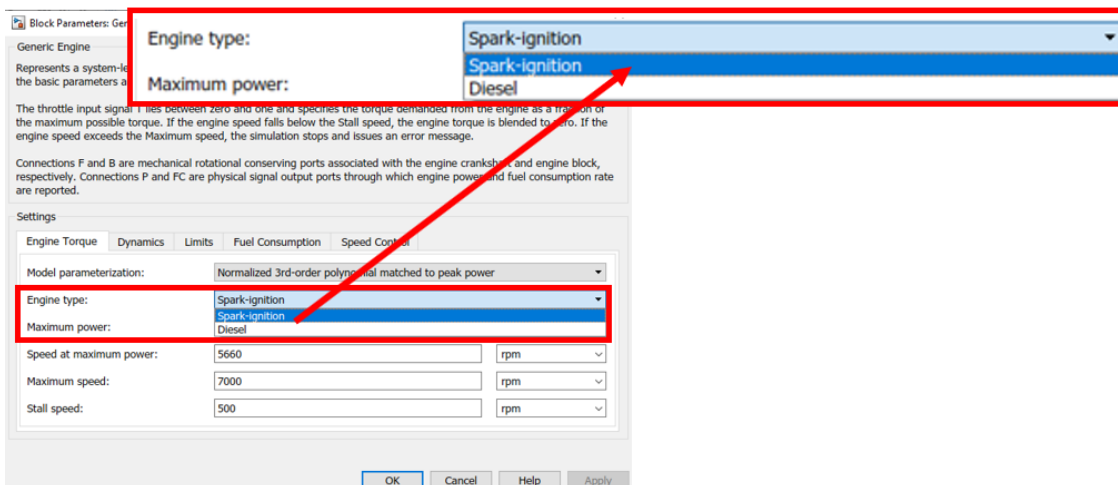
Tabela 6.1: Valores dos coeficientes dos motores disponibilizados pelo *Simulink*.

Potência Demandada Coeficiente	Tipo de Motor:	
	Spark-Ignition	Diesel
$p1$	1	0,6526
$p2$	1	16,9480
$p3$	1	13,4740

Fonte: (adaptado de MATLAB, 2010).

As opções de motores a combustão fornecidos pelo *Simulink* podem ser vistas na **Figura 6.12**.

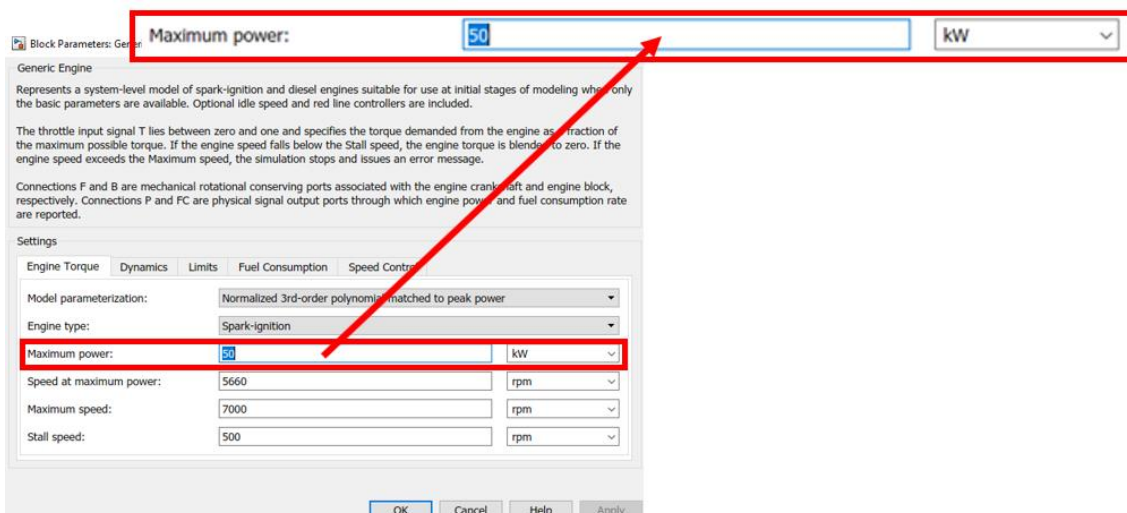
Figura 6.12: Opções de motores a combustão disponibilizados pelo Simulink.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Outro importante parâmetro na descrição do motor a combustão é a potência máxima que o mesmo pode fornecer (P_{max}), veja **Figura 6.13**.

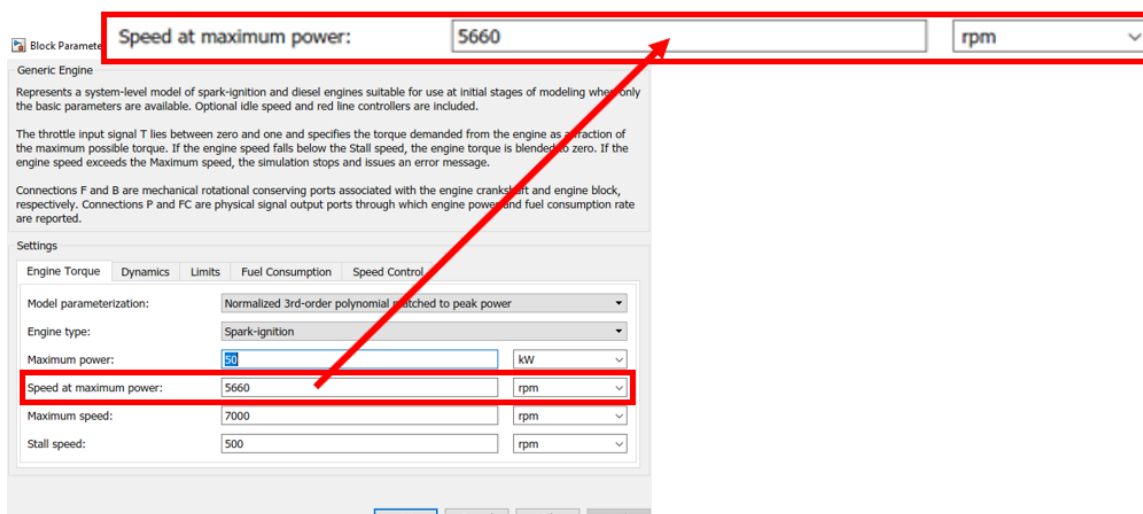
Figura 6.13: Configuração da potência máxima do motor a combustão.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Juntamente com velocidade angular instantânea a potência demandada máxima (ω_o), veja a **Figura 6.14**, modelam o ponto de máximo da curva potência demanda (P) em relação a variação da velocidade angular normalizada (u) do motor em estudo:

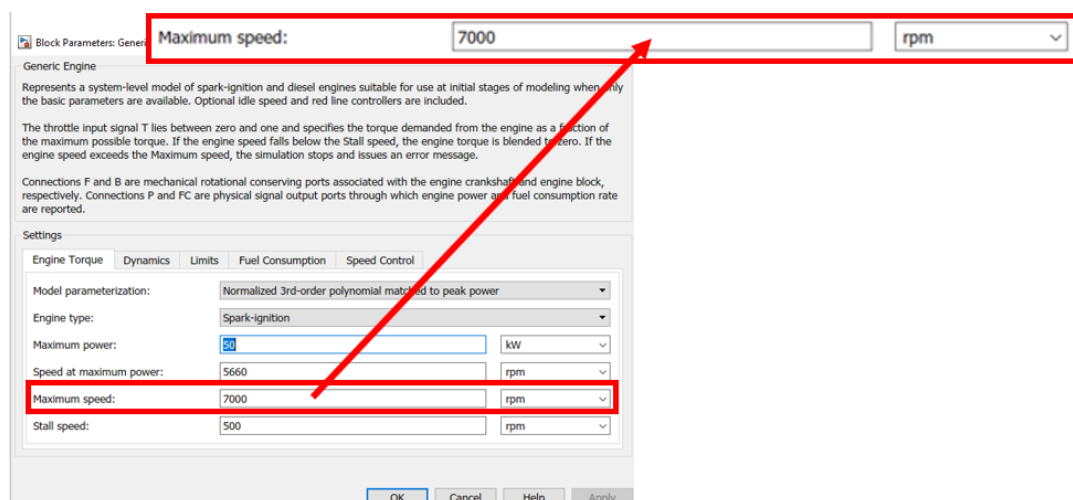
Figura 6.14: Parametrização da Generic Engine, Velocidade a potência demandada máxima



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Também são configurados os limites de velocidade do motor a combustão, a **Figura 6.15** apresenta a configuração da velocidade máxima do componente.

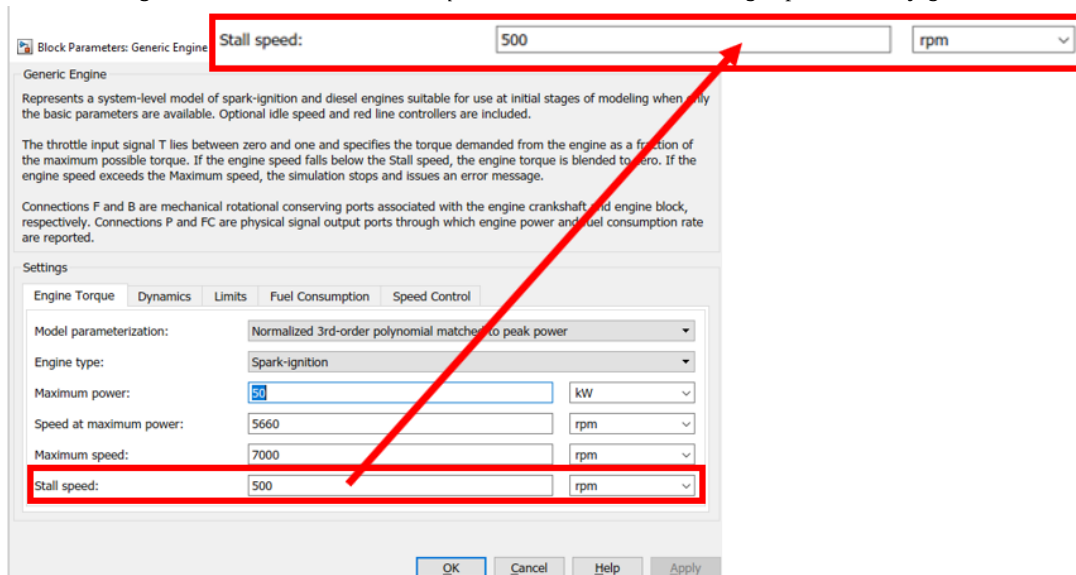
Figura 6.15: Parametrização da Generic Engine, Velocidade Máxima



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O último parâmetro do motor é o *Stall speed* que nada mais é que a velocidade angular mínima que o motor a combustão consegue produzir conjugado. Veja **Figura 6.16** a seguir.

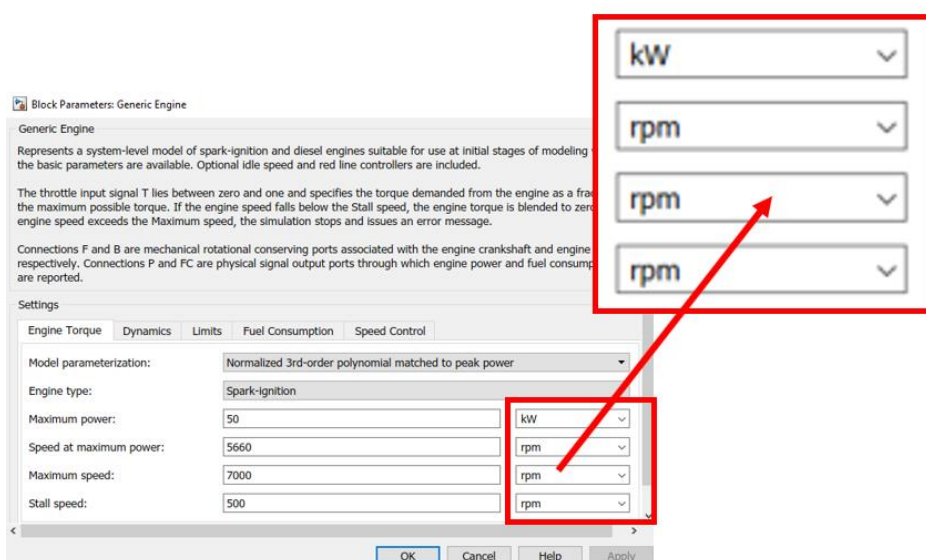
Figura 6.16: Velocidade mínima que o motor a combustão consegue produzir conjugado.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

As caixas ao lado dos valores atribuídos ao bloco *Generic Engine*, veja **Figura 6.17**, são as respectivas unidades atribuídas a cada valor. Essas unidades são configuráveis.

Figura 6.17: Unidades dos valores do bloco *Generic Engine*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A **Figura 6.18** resume os valores utilizados para a caracterização do *Generic Engine* em termos de potência e velocidade angular.

Figura 6.18: Configurações de conjugado e velocidade do Generic Engine.

Model parameterization:	Normalized 3rd-order polynomial matched to peak power	
Engine type:	Spark-ignition	
Maximum power:	50	kW
Speed at maximum power:	5660	rpm
Maximum speed:	7000	rpm
Stall speed:	500	rpm

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Esses são valores foram ajustados empiricamente para a simulação. Muito embora não exploradas neste trabalho, existem outras opções de parametrização do modelo. A opção *Tabulated power data* (Dados de potência tabulados) permite que os valores de potência (*Power vector*) em função da velocidade do eixo (*Speed vector*), amostrados de um determinado motor, sejam inseridos diretamente no modelo, veja **Figura 6.19**.

Figura 6.19: Parametrização do Generic Engine em termos potência e velocidade angular.

Block Parameters: Generic Engine

Generic Engine

Represents a system-level model of spark-ignition and diesel engines suitable for use at initial stages of modeling when only the basic parameters are known.

Model parameterization: Tabulated power data

The throttle input signal T lies between zero and one and specifies the torque demanded from the engine as a fraction of the maximum possible torque. If the engine speed falls below the Stall speed, the engine torque is blended to zero. If the engine speed exceeds the Maximum speed, the simulation stops and issues an error message.

Speed vector: [500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000] rpm

Connections F and B are mechanical connections for the engine's output shaft. Connections P and FC are physical signal output ports through which engine power and fuel consumption rate are reported.

Settings

Engine Torque Dynamics Limits Fuel Consumption Speed Control

Model parameterization: Tabulated power data

Speed vector: [500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000] rpm

Power vector: [20, 40, 78, 120, 145, 148, 125, 60] kW

Interpolation method: Linear

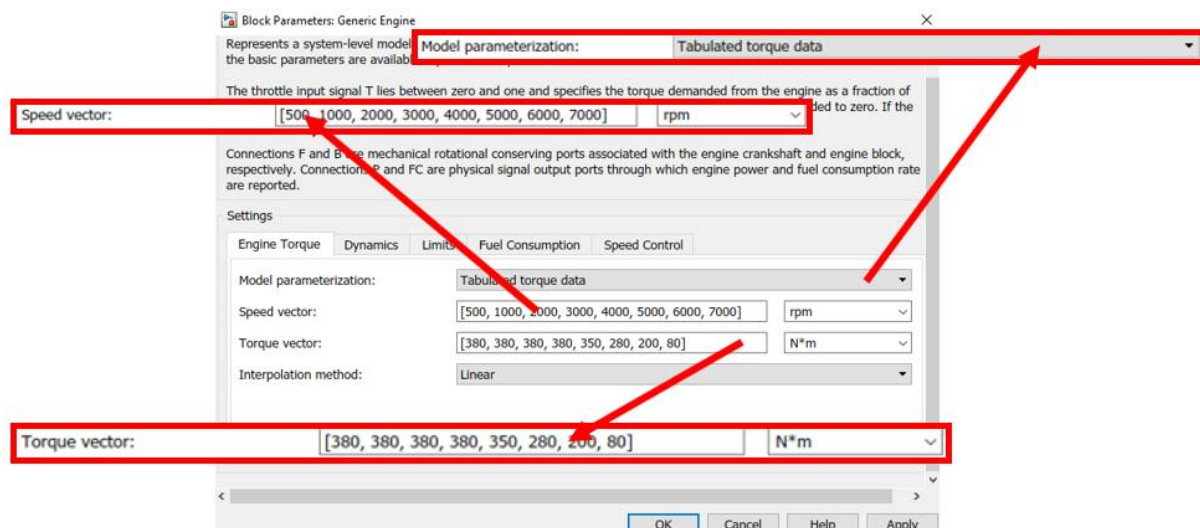
OK Cancel Help Apply

Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção de parametrização de modelo *Tabular torque data* (Dados de conjugado

tabulados) permite que valores amostrados de conjugado (*Torque vector*) em função da velocidade do eixo (*Speed vector*) possam ser inseridos diretamente no modelo, veja **Figura 6.20**.

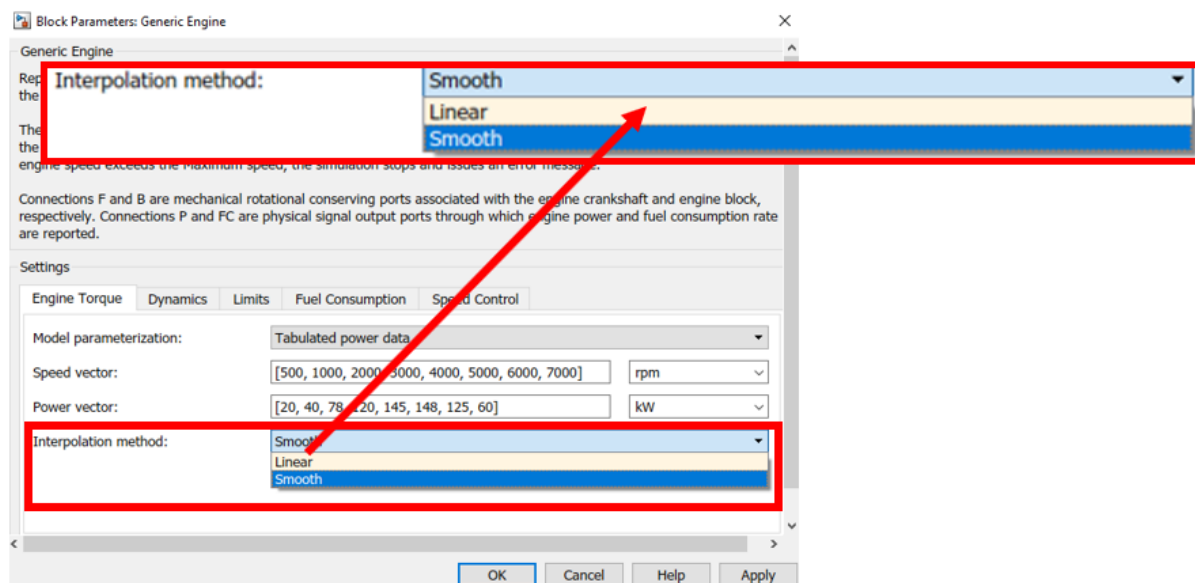
Figura 6.20: Parametrização do Generic Engine em termos de amostras de conjugado por velocidade.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Quando se trabalha com dados amostrados, o método de interpolação deve ser configurado no bloco *Generic Engine*. Na opção *Interpolation method* (Método de interpolação), **Figura 6.21**, permite a escolha de dois métodos diferentes de interpolação, o método *Linear* (Linear) e o método *Smooth* (Suave).

Figura 6.21: Métodos de interpolação do Generic Engine.

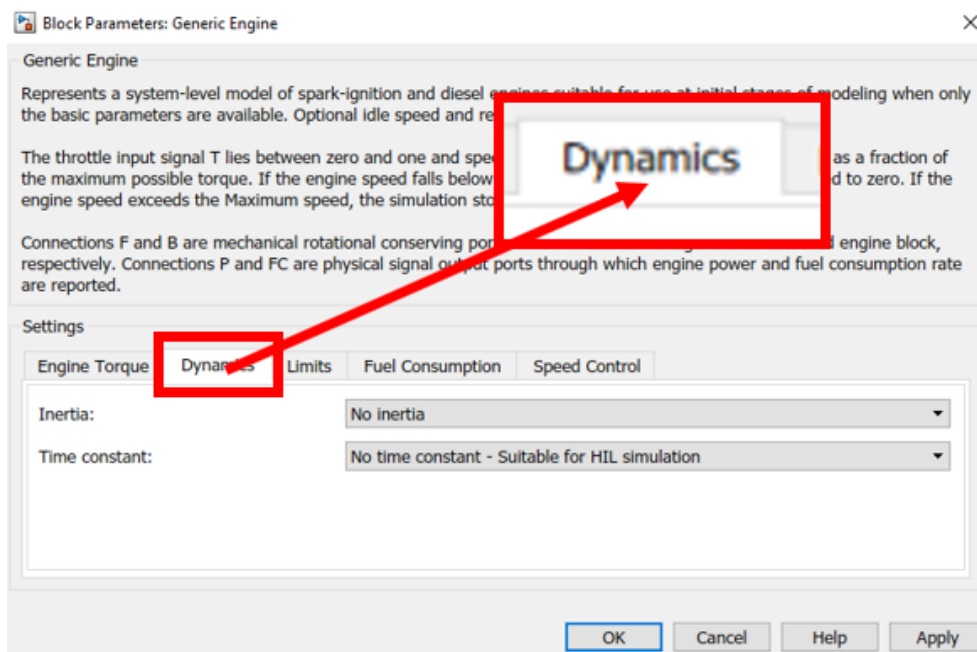


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3.2. Dinâmicas

Na aba *Dynamics*, **Figura 6.22**, as características de inércia do virabrequim e reposta do bloco podem ser configuradas.

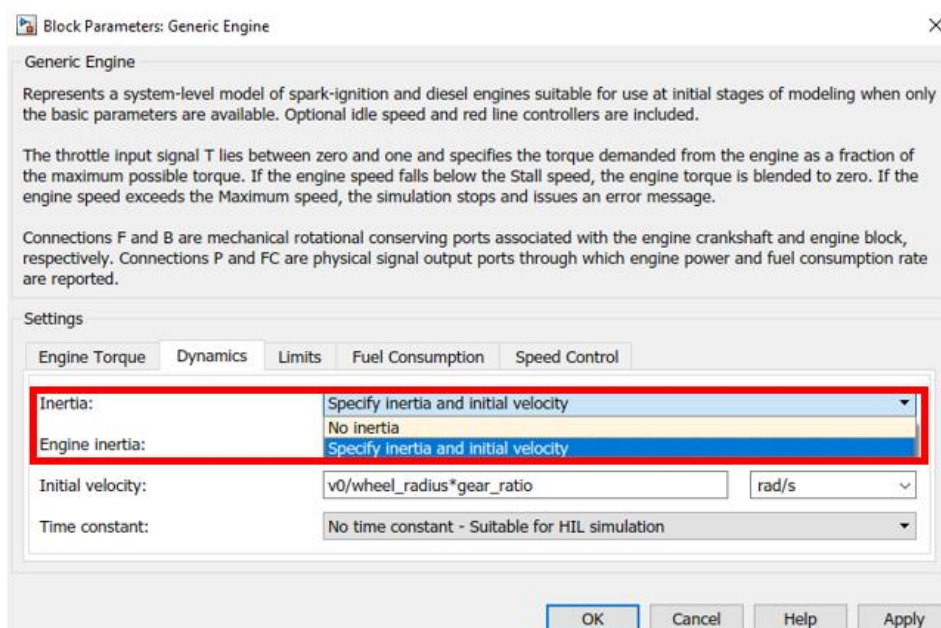
Figura 6.22: Configurações dinâmicas do bloco Generic Engine.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na opção *Inertia*, o virabrequim pode ser configurado como sem inércia (*No inertia*) ou com inércia específica e velocidade inicial (*Specify inertia and initial velocity*), veja **Figura 6.23**.

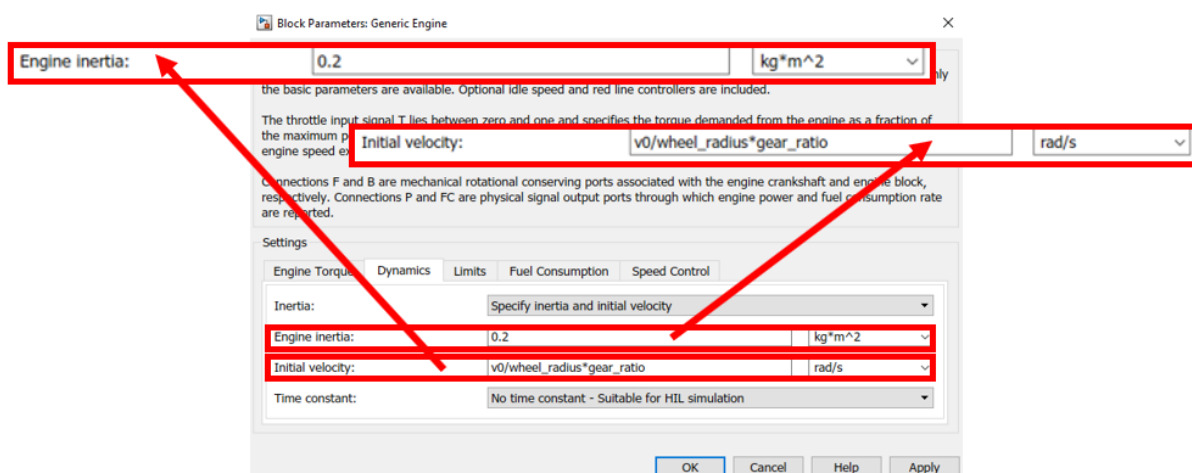
Figura 6.23: Configurações de inércia do virabrequim.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

No caso da seleção da opção *Specify inertia and initial velocity* (Especificar inércia e velocidade inicial) o valor da inércia do virabrequim (*Engine inertia*) e a velocidade inicial do bloco (*Initial velocity*) devem ser configuradas, veja **Figura 6.24**.

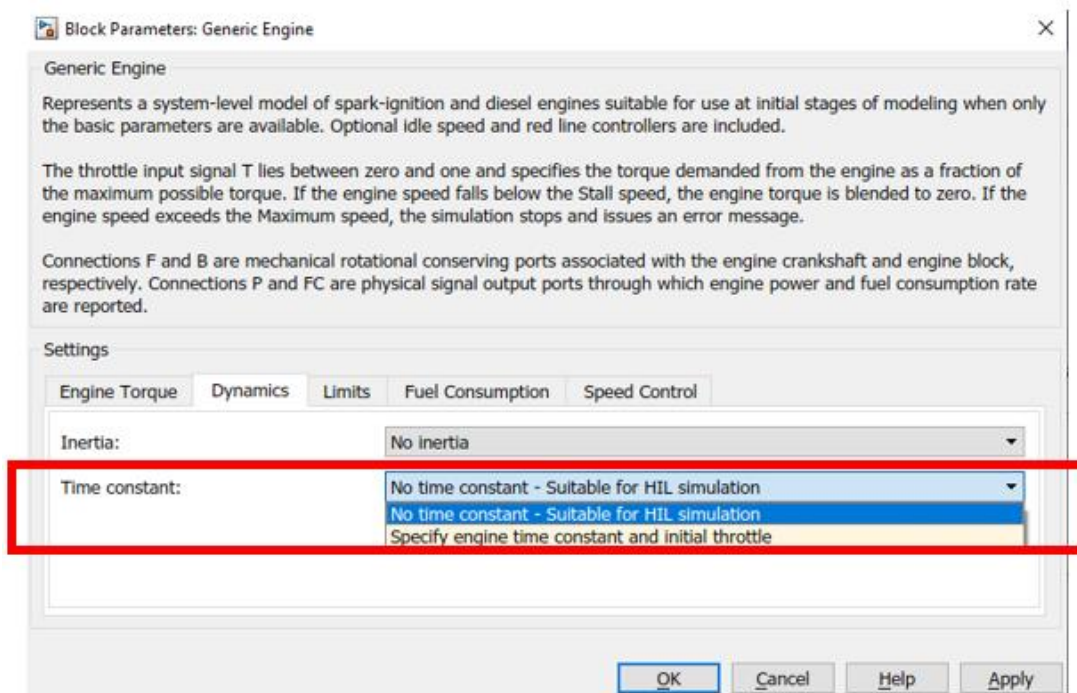
Figura 6.24: Configuração de inercia e velocidade inicial do bloco *Generic Engine*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

As características de resposta do motor podem ser configuradas na configuração *Time constant*. Existem duas configurações, veja **Figura 6.25**.

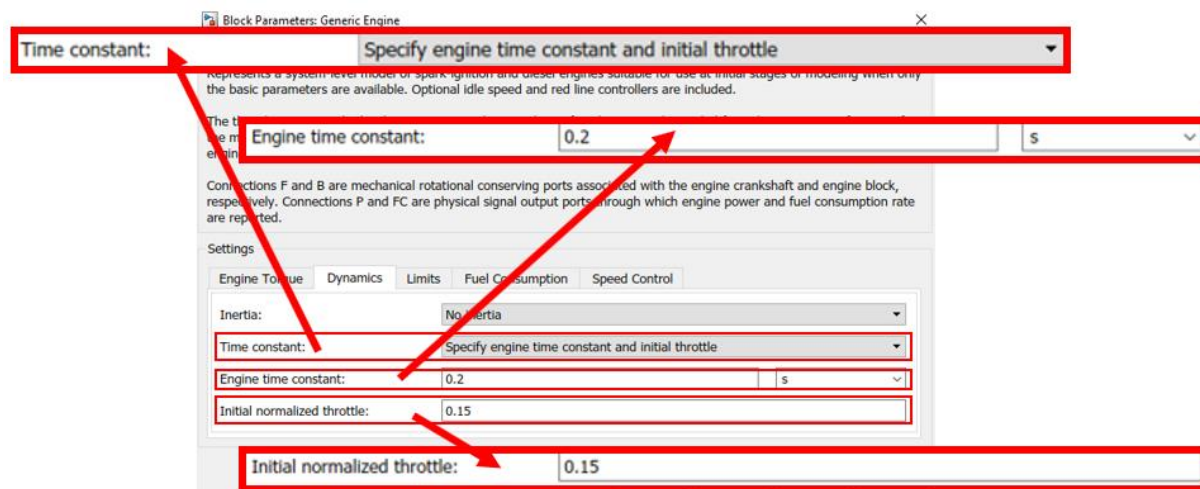
Figura 6.25: Configuração da resposta do bloco *Generic Engine*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A configuração *No time constant – Suitable for HIL simulation* (Sem constante de tempo – Adequada para simulação de HIL) o bloco reage sem atraso. Quanto a opção *Specify engine time constant and initial throttle* (Especifique constante de tempo e aceleração inicial do motor) a constante de tempo do motor (*Engine time constant*) e a aceleração normalizada (*Initial normalized throttle*) devem ser configuradas, veja **Figura 6.26**.

Figura 6.26: Configuração do tempo de resposta do bloco Generic Engine.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

As configurações dinâmicas empregadas neste trabalho podem ser vistas na **Figura 6.27**.

Figura 6.27: Configurações dinâmicas do bloco Generic Engine.

Inertia:	Specify inertia and initial velocity	
Engine inertia:	0.2	kg*m^2
Initial velocity:	v0/wheel_radius*gear_ratio	rad/s
Time constant:	Specify engine time constant and initial throttle	
Engine time constant:	0.2	s
Initial normalized throttle:	0.15	

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Observe que a opção *Initial velocity* (Velocidade inicial) foi configurada utilizando variáveis para que a simulação tivesse coerência quando iniciada em velocidade inicial. Como o motor a combustão está ligado diretamente nas rodas, a velocidade inicial do veículo pode ser diretamente transformada na rotação do eixo do motor a combustão por meio da relação:

$$\omega = \frac{v_0}{wheel_radius * gear_ratio} \quad (6.7)$$

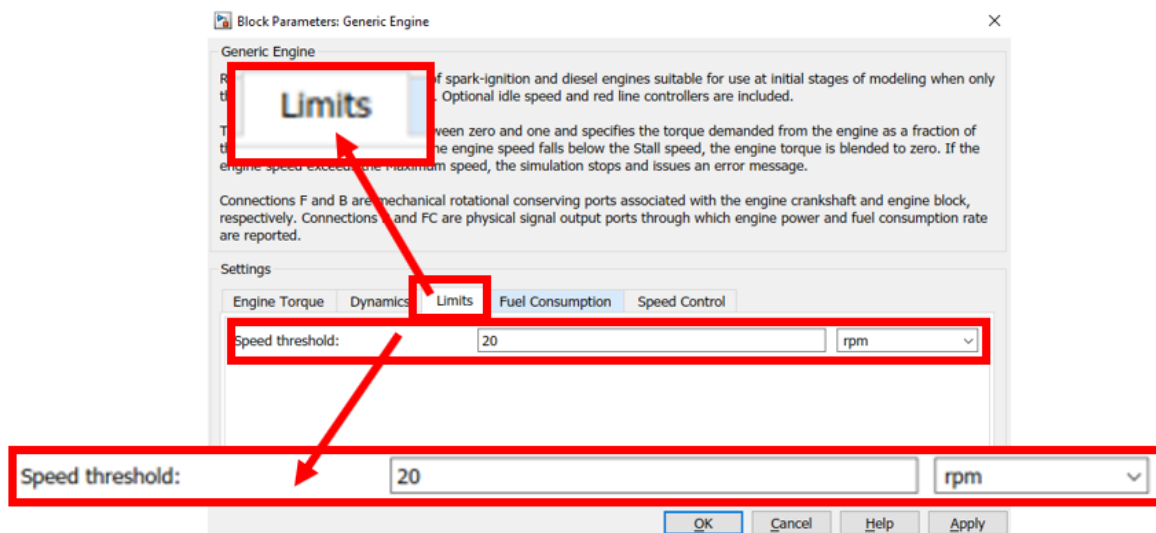
sendo que:

- ω velocidade angular;
- v_0 velocidade do veículo;
- $wheel_radius$ perímetro externo da roda;
- $gear_ratio$ relação de engrenagens na Caixa de engrenagem.

6.3.3. Limites

Na aba *Limits* (Limites), veja **Figura 6.28**, a velocidade angular em que o bloco *Generic Engine* começará a prover conjugado para o sistema. Esse momento de participação é configurado na opção *Speed threshold* (Limiar de velocidade).

Figura 6.28: Configuração do momento em que o bloco começará a ceder conjugado para o sistema.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na simulação ficou implementado conforme visto na **Figura 6.29**. Muito embora O valor de 20 rpm tenha sido configurado, ele não faz diferença por causa da configuração de *Stall speed* (Velocidade de estol) realizada anteriormente, veja **Figura 6.18**.

Figura 6.29: Configuração do momento em que o bloco *Generic Engine* começa a interagir com o sistema.

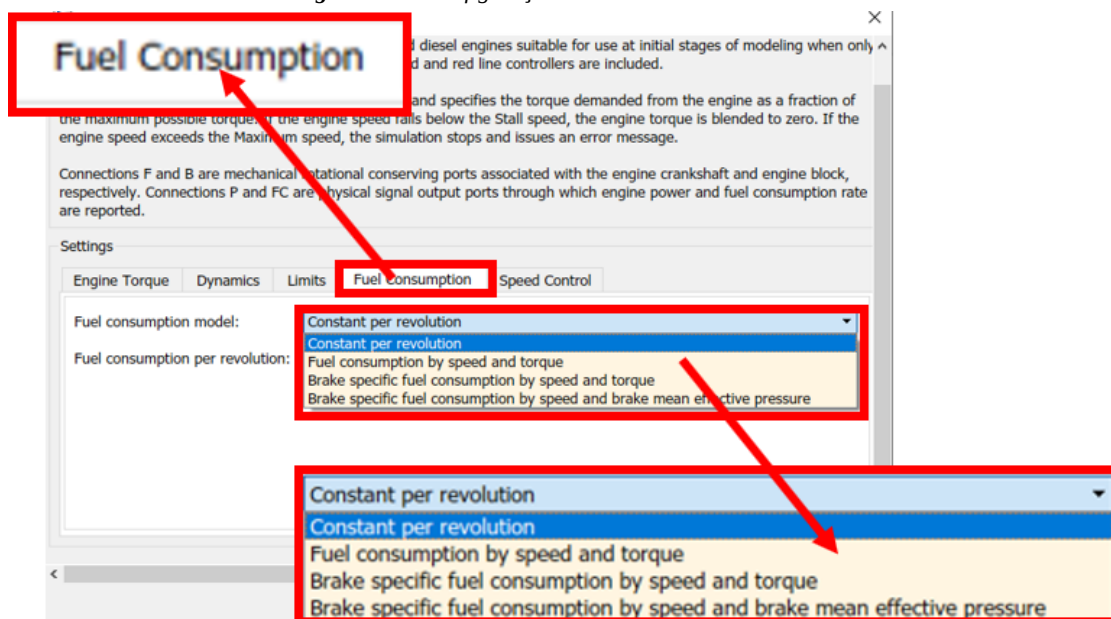
Speed threshold:	20	rpm
------------------	----	-----

Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3.4. Consumo de Combustível

Outra variável que pode ser observada no bloco *Generic Engine* é o consumo de combustível. Semelhante ao realizado nas configurações de conjugado, aba *Engine Torque*, um modelo deve ser escolhido, veja **Figura 6.30**.

Figura 6.30: Configurações de consumo de combustível.

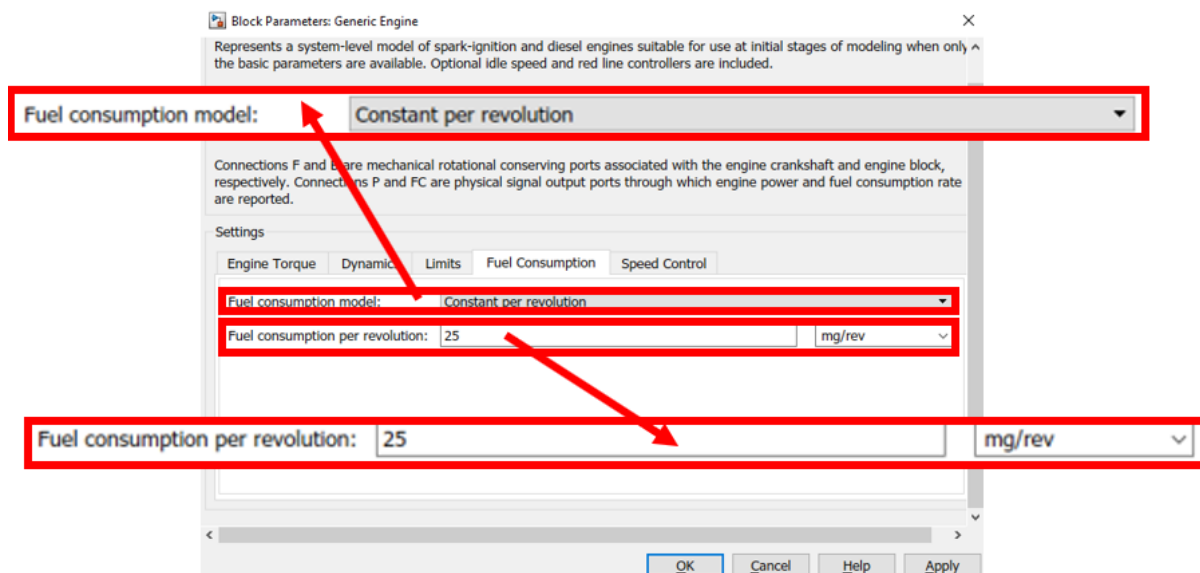


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção *Constant per revolution* (Constante por revolução) computa o valor configurado a cada rotação do motor a combustão, em outras palavras, quanto maior a velocidade no eixo do motor, maior será o montante de combustível consumido em um dado intervalo de tempo. Apenas a quantidade de combustível consumido por revolução deve ser

configurada, veja **Figura 6.31**.

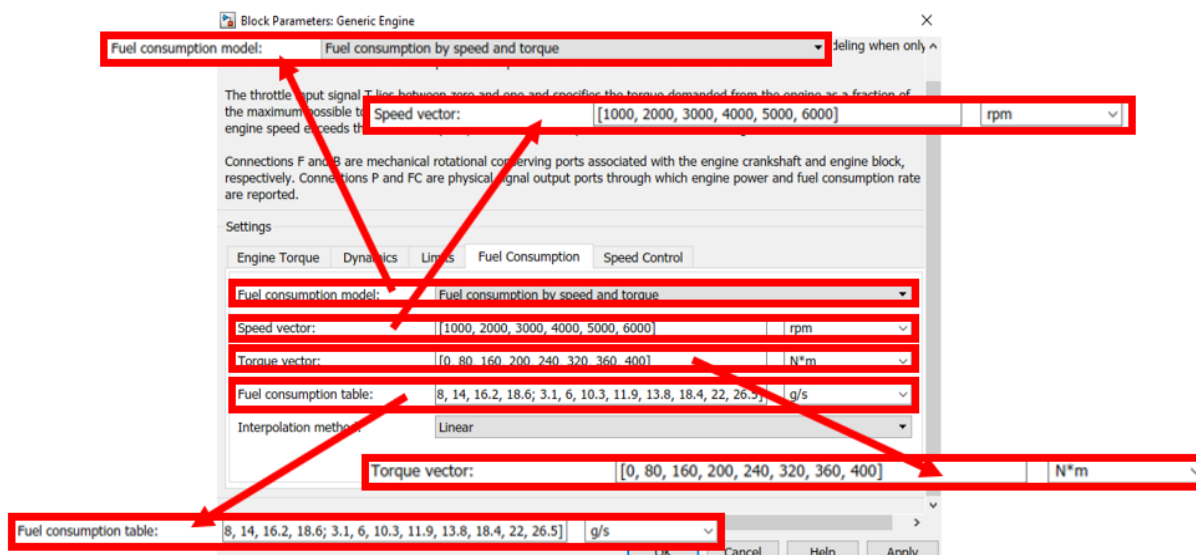
Figura 6.31: Configuração do consumo de combustível em termos de Constant por revolution.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção *Fuel consumption by speed and torque* (Consumo de combustível por velocidade e conjugado) é parametrizada pelo conjunto de amostras de velocidade angular (*Speed vector*) em função do conjugado (*Torque vector*) e combustível consumido (*Fuel consumption table*) e deve ser inserido como pode ser visto em **Figura 6.32**.

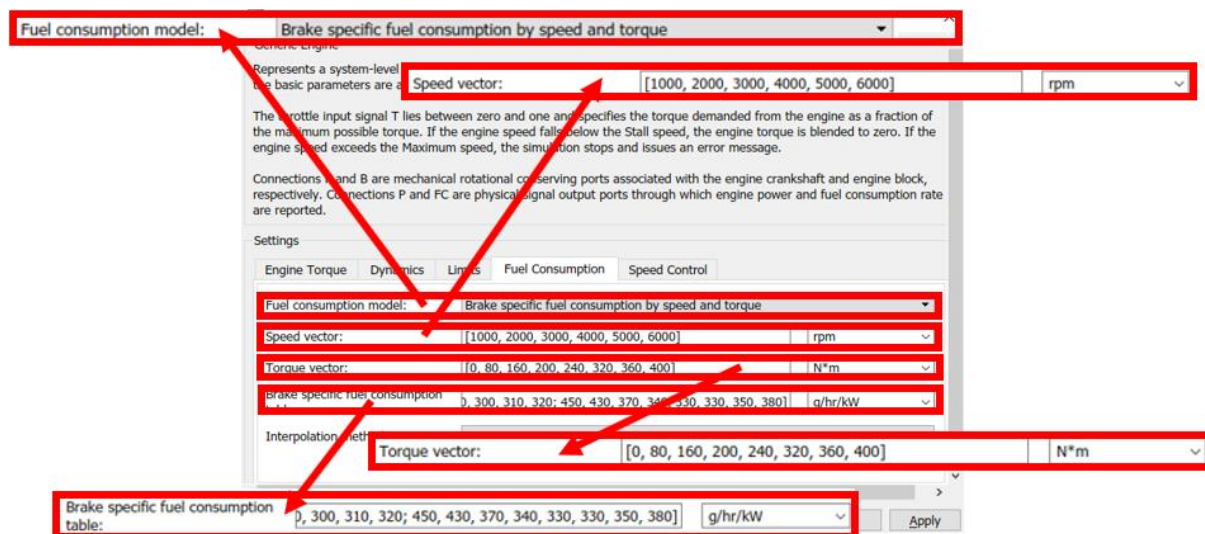
Figura 6.32: Configuração do consumo de combustível em termos de Fuel consumption by speed and torque.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção *Brake specific fuel consumption by speed and torque* (Consumo de combustível específico do freio por velocidade e conjugado) é análoga ao apresentado até agora. Nesta opção o conjunto de dados a ser introduzido é a velocidade do eixo do motor (*Speed vector*) em função do conjugado (*Torque vector*) e a taxa de consumo do combustível dividida pela potência da frenagem (*Brake specific fuel consumption table*) como visto em **Figura 6.33**.

Figura 6.33: Configuração do consumo do bloco *Generic Engine* em termos do *Break specific consumption by speed and torque*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

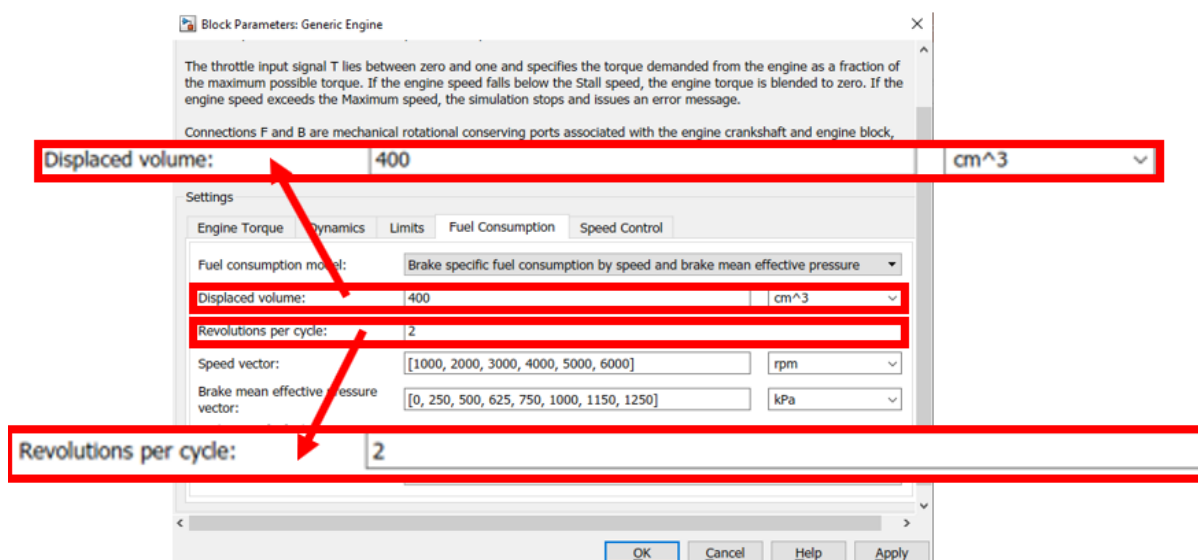
Outra opção de parametrização é a opção *Brake specific fuel consumption by speed and brake mean effective pressure* (Consumo de combustível específico do freio por velocidade e pressão efetiva média do freio). Neste caso um conjunto de dados composto pela velocidade do eixo do motor (*Speed vector*) em função da taxa de consumo de combustível dividida pela potência da frenagem (*Brake specific fuel consumption table*) e a pressão efetiva média da frenagem (*Brake mean effective pressure vector*), veja **Figura 6.34**, é complementado pelo volume do cilindro (*Displaced value*) e a quantidade de revolução do eixo do motor por ciclo (*Revolution per cycle*), veja **Figura 6.35**.

Figura 6.34: Conjunto de dados para a configuração Brake specific fuel consumption by speed brake mean effective pressure.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

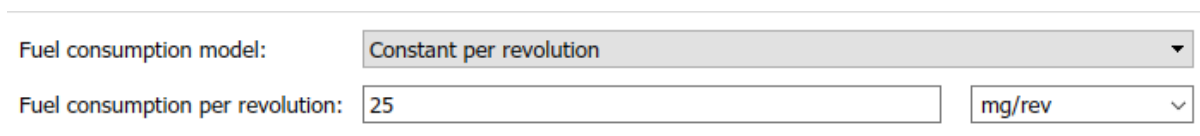
Figura 6.35: Configuração das constantes da parametrização Brake specific consumption by speed and brake mean effective pressure.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Os métodos de interpolação aplicados ao conjunto de dados, assim como as configurações, são idênticos aos utilizados na aba *Engine Torque*. O consumo de combustível foi configurado da como pode ser visto na **Figura 6.36**.

Figura 6.36: Configuração de consumo de combustível do modelo.



Fuel consumption model: Constant per revolution

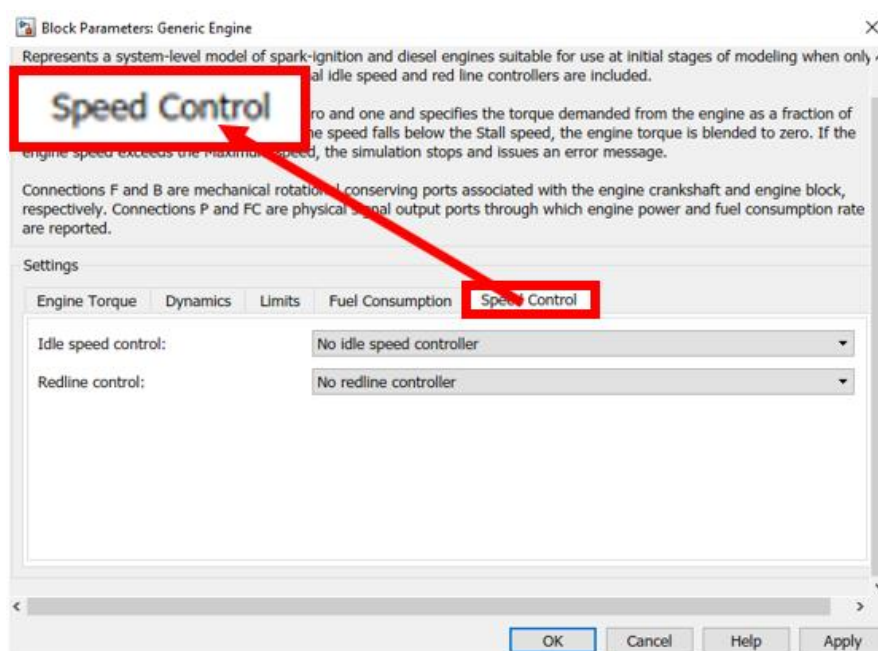
Fuel consumption per revolution: 25 mg/rev

Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.3.5. Controle de velocidade

A última aba desse bloco é a *Speed Control*, veja **Figura 6.37**.

Figura 6.37: Aba Speed Control.



Block Parameters: Generic Engine

Represents a system-level model of spark-ignition and diesel engines suitable for use at initial stages of modeling when only a minimal idle speed and red line controllers are included.

Speed Control

Connections F and B are mechanical rotational conserving ports associated with the engine crankshaft and engine block, respectively. Connections P and FC are physical signal output ports through which engine power and fuel consumption rate are reported.

Settings

Engine Torque Dynamics Limits Fuel Consumption **Speed Control**

Idle speed control: No idle speed controller

Redline control: No redline controller

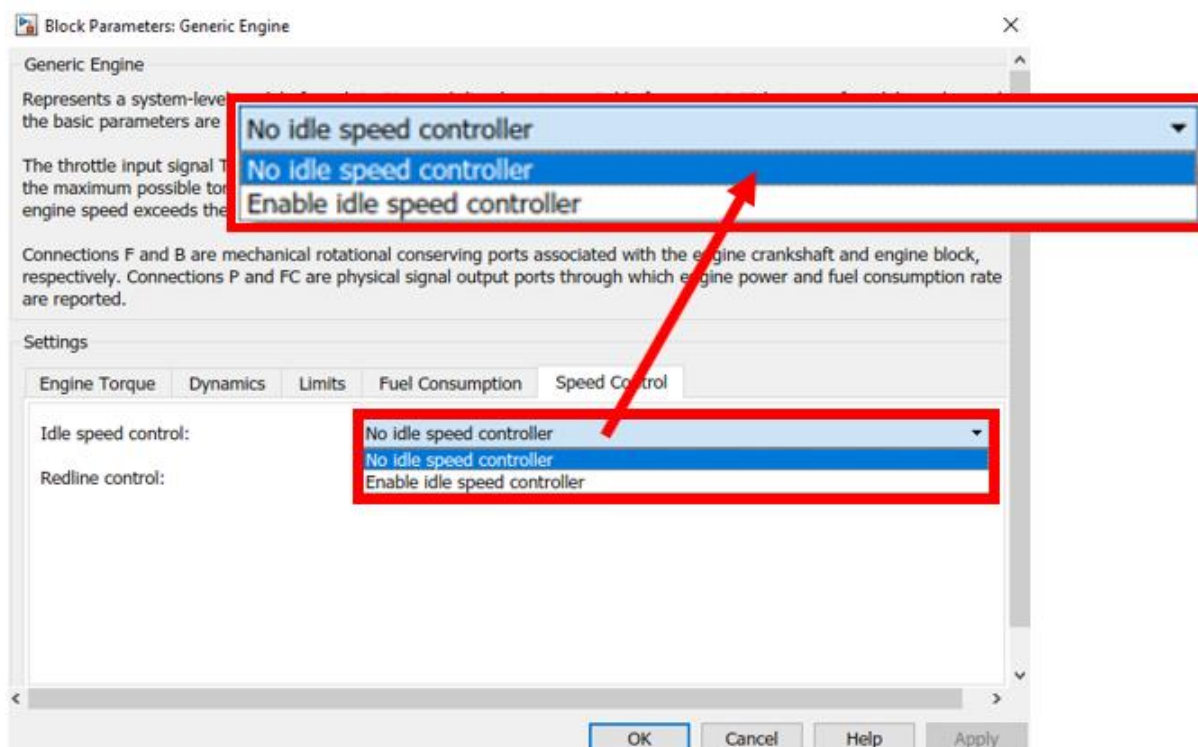
OK Cancel Help Apply

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na opção *Idle speed control* (Controle de velocidade osciosa) existem dois modelos de controle disponíveis, *No idle speed control controller* (essa é a opção padrão, a entrada de aceleração normalizada é utilizada diretamente) e *Enable idle speed controller* (Essa opção

habilita outros parâmetros. Incrementa a aceleração normalizada sempre que a rotação do motor fica abaixo de uma referência para prevenir o travamento do motor simulado), veja **Figura 6.38**.

Figura 6.38: Opções de modelo de parametrização do controle de velocidade sem carga.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ao habilitar a opção *Enable idle speed controller* a aceleração normalizada é ajustada seguindo o modelo visto na Equação (6.8).

$$\Pi = \max(\Pi_i, \Pi_c)$$
(6.8)

Tomando Π_c como sendo:

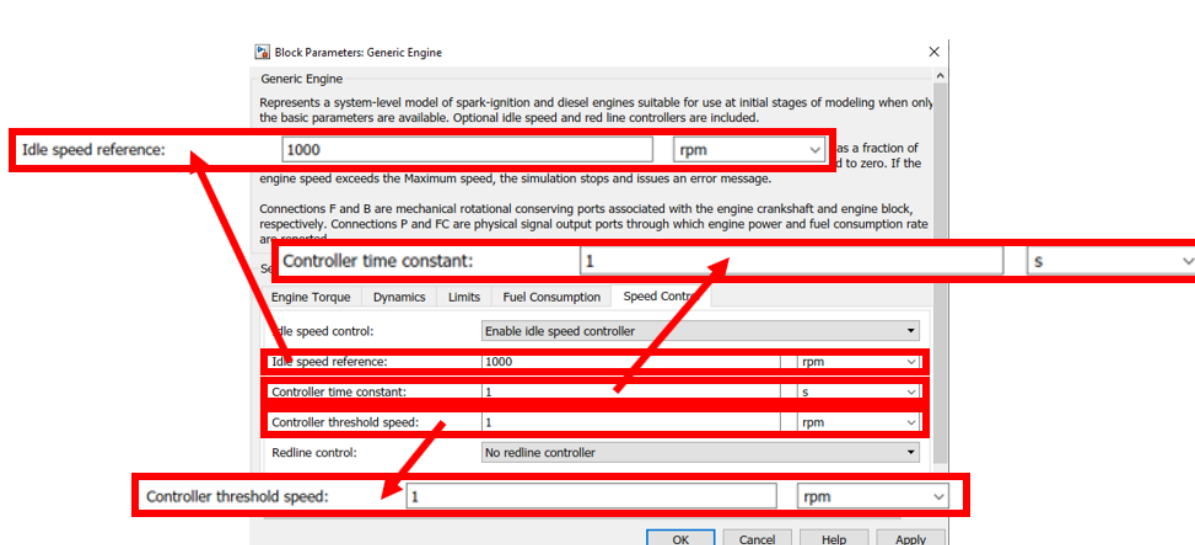
$$\Pi_i = \frac{0,5 \cdot \left(1 - \tanh\left(4 \cdot \frac{u - u_r}{u_t}\right)\right)}{t} \quad (6.9)$$

Onde temos,

- Π aceleração normalizada do motor;
- Π_i aceleração normalizada na porta T ;
- Π_c aceleração normalizada controlada;
- u velocidade angular normalizada do motor a combustão;
- u_r velocidade referência;
- u_t velocidade que aciona o controle;
- t constante de tempo do controlador.

Três novos parâmetros necessitam de configuração. O parâmetro *Idle speed reference* (Referência de velocidade ociosa) define a velocidade referência para o controlador (u_r), o valor padrão é 1000 rpm. O parâmetro *Controller time constant* (Constante de tempo do controlador) define a constante de tempo do controlador (t). O parâmetro *Controller time threshold speed* define a velocidade na qual o controlador começa a atuar, veja **Figura 6.39**.

Figura 6.39: Parâmetros do modelo *Enable idle speed controller*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

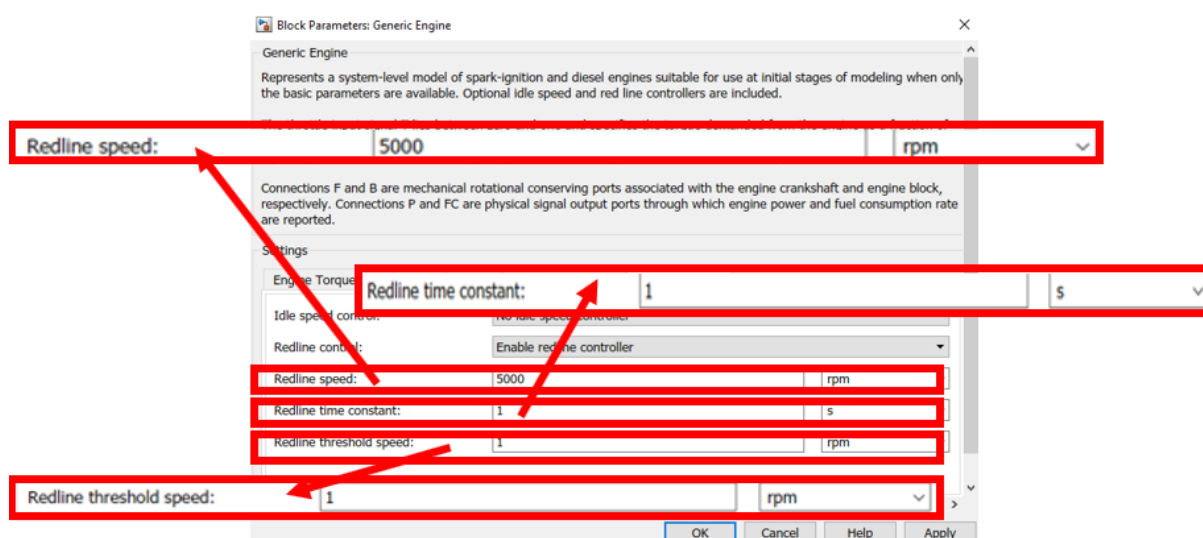
Outro modelo que deve ser parametrizado no *Speed control* (Controle de velocidade) é o *Redline control* (Controle de linha vermelha). Enquanto o modelo de *Idle speed* determina o valor mínimo da aceleração normalizada para evitar o travamento do motor, o *Redline control* evita que o motor alcance um linear máximo de velocidade com base no controle de aceleração normalizada. O modelo utilizado é o mesmo empregado em *Idle speed control*, contudo, para o controlador do *Redline*.

- u_r é a velocidade referência para o *Redline*;
- u_t é a velocidade que o controle começa a atuar;
- t é a constante de tempo do *Redline control*.

O *Redline control* possui duas opções de modelo. A opção *No redline controller* (Sem controle de linha vermelha) é a opção padrão, neste caso o controlador do *Redline* não é aplicado e a velocidade pode aumentar indiscriminadamente.

Quando a opção *Enable redline controller* (Habilitar o controlador de linha vermelha) é habilitada o controlador passa a atuar sobre o sistema evitando velocidades excessivas. Neste caso, três novos parâmetros devem ser configurados, veja a **Figura 6.40**.

Figura 6.40: Parâmetros da opção *Enable redline model*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

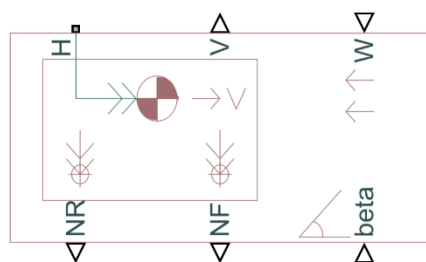
O parâmetro *Redline speed* é a velocidade de referência sobre a qual o controle

atuará. O parâmetro *Redline time constant* (Constante de tempo da linha vermelha) é a constante de tempo relacionada ao incremento, ou decremento, da aceleração normalizada. O parâmetro *Redline threshold speed* (Limiar de velocidade de linha vermelha) é empregado para suavizar a ação do controlador delimitando uma região em que a intensidade da resposta varia.

6.4. Modelo Corpo do Carro

Outro componente importante disponibilizado pelo *Simulink*, para a simulação de um carro, é o bloco *Vehicle Body* (Corpo do veículo). A Bloco **Figura 6.41** apresenta o bloco empregado.

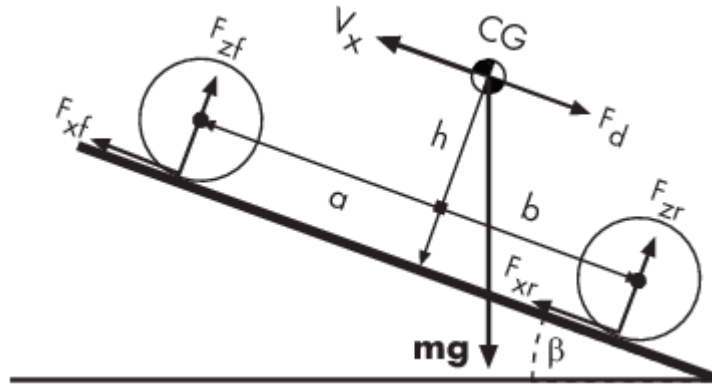
Figura 6.41: Bloco *Vehicle Body*



Fonte: (Elaborado pelo autor).

De forma semelhante a um bloco em um plano inclinado, o corpo de carro é modelado em dois eixos de movimento longitudinal, **Figura 6.42**.

Figura 6.42: Modelagem do Corpo de um Carro juntamente com as forças que com ele interagem.



Fonte: (MATHLAB, 2010).

Em que (CG) é o centro de massa do veículo, (h) é a altura de (CG) em relação ao centro das rodas. (a) é a distância entre a roda dianteira e a projeção do centro de massa na reta que liga as rodas pelo centro, (β) é o ângulo de inclinação do terreno, (b) é a distância entre a roda traseira e a projeção do centro de massa na reta que liga as rodas pelo centro, V_x é a velocidade do longitudinal do veículo, (F_d) é a força de arraste, (F_{zr}) é a força normal sobre as rodas traseiras, (F_{zf}) é a força normal sobre as rodas dianteiras, (F_{xr}) é a força longitudinal sobre as rodas traseiras, (F_{xf}) é a força longitudinal sobre as rodas dianteira, ($m \cdot g$) é o produto da massa do veículo com a aceleração gravitacional o que resulta na força peso. Desta maneira, a velocidade do veículo pode ser calculada por meio da equação (6.10).

$$m \cdot \frac{dV_x}{dx} = F_x - F_d - m \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (6.10)$$

Na qual o termo F_x nada mais é do que a contribuição da força longitudinal de cada roda, podendo ser definida da seguinte maneira:

$$F_x = n \cdot (F_{xf} + F_{xr}) \quad (6.11)$$

Sendo n o número de rodas especificadas para o modelo. A força de arraste (F_d), para este modelo, é equacionada da seguinte maneira:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x + V_w)^2 \cdot \text{sgn}(V_x + V_w) \quad (6.12)$$

Em que (C_d) é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, (ρ) é a densidade do ar, (A) é a área frontal do veículo, (V_x) é a velocidade do veículo, (V_w) é a velocidade do vento.

Para o cálculo da força normal sobre cada roda dianteira é calculado por meio da seguinte expressão:

$$F_{zf} = \frac{-h \cdot (F_d + m \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) + m \cdot \frac{dV_x}{dx}) + b \cdot m \cdot g \cdot \cos(\beta)}{n(a + b)} \quad (6.13)$$

Em quanto para a força normal sobre as rodas traseiras a expressão utilizada pelo sistema é da forma:

$$F_{zr} = \frac{+h \cdot (F_d + m \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) + m \cdot \frac{dV_x}{dx}) + a \cdot m \cdot g \cdot \cos(\beta)}{n(a + b)} \quad (6.14)$$

A saída (NR) fornece o valor da força normal no eixo traseiro do carro, em quanto, semelhante, (NF) fornece o valor da força normal sobre o eixo dianteiro. Neste modelo, são consideradas rodas de mesmas dimensões conectadas a cada eixo. Outra saída deste modelo

é a velocidade longitudinal do veículo que pode ser obtida por meio da saída (V). Na entrada (β), o ângulo de inclinação do terreno é inserido. A porta (W) é alimentada com a velocidade do vento contrária ao movimento do carro e a entrada (H) está associada ao deslocamento horizontal do carro.

Os parâmetros que podem ser configurados neste modelo em relação as características físicas do veículo são a massa do veículo, o número de rodas por eixo, a distância horizontal do centro de gravidade do corpo do carro ao eixo dianteiro, distância horizontal do centro de gravidade ao eixo traseiro, altura do eixo de gravidade em relação ao solo, área frontal do veículo.

Alguns fatores ambientais que interferem no comportamento do corpo do veículo também são trabalhados, sendo estes: coeficiente de arraste; aceleração gravitacional; densidade do ar.

A velocidade inicial do veículo também pode ser configurada. O movimento do veículo é o resultado do efeito de todas as forças e conjugado que atuam sobre ele. As forças longitudinais dos pneus impulsionam o veículo. O peso veículo atua sobre seu centro de gravidade, o qual, dependendo da inclinação do terreno, pode atuar a favor ou contra o movimento. O arrasto aerodinâmico sempre atua contra o movimento, diminuindo sua velocidade.

6.4.1. *Parâmetros*

Para parametrizar esse modelo de corpo de veículo, na aba *Parameters*, é necessário inserir a massa do veículo no parâmetro *Mass*. O número de rodas por eixo é inserido no parâmetro *Number of wheels per axle* como visto na **Figura 6.43**.

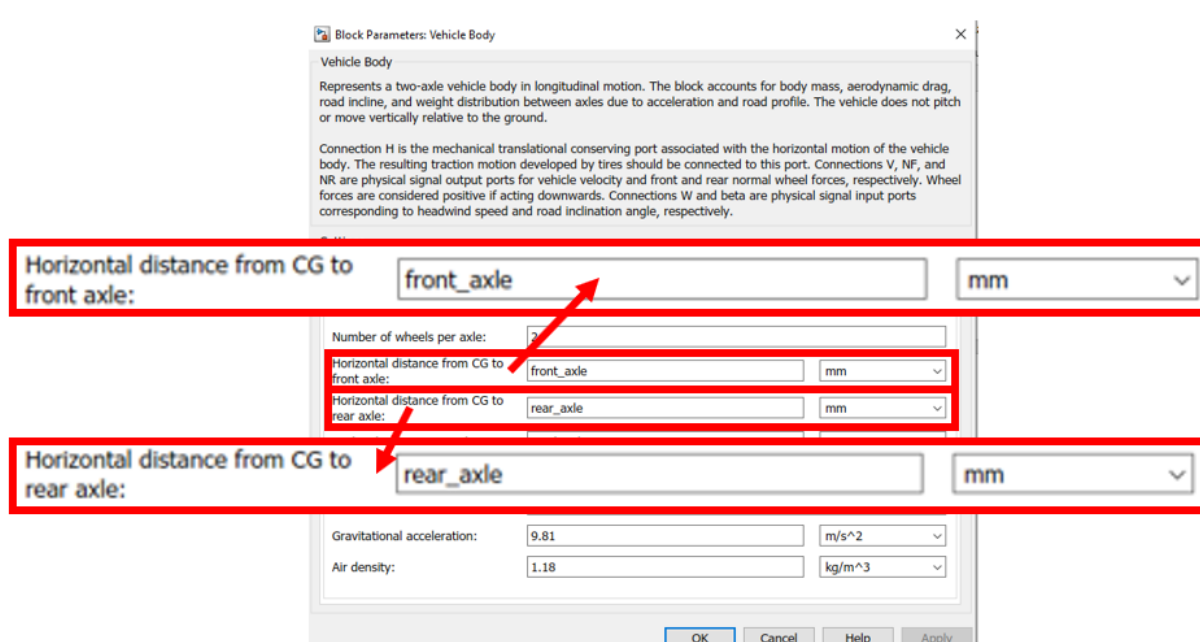
Figura 6.43: Parâmetros de massa e distribuição de rodas do bloco *Vehicle Body*.

The image shows the 'Block Parameters: Vehicle Body' dialog box. The 'Mass' field is highlighted with a red box and contains the text 'rider_mass+vehicle_mass' with a unit dropdown set to 'kg'. The 'Number of wheels per axle' field is also highlighted with a red box and contains the value '2'. Red arrows point from the 'Mass' field to the 'Number of wheels per axle' field. Other fields include 'Horizontal distance from CG to front axle' (set to 'front_axle'), 'Horizontal distance from CG to rear axle' (set to 'rear_axle'), and 'CG height above ground' (set to 'CG_height'). The 'Gravitational acceleration' is set to '9.81' and 'Air density' is set to '1.18'.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

No parâmetro *Mass* (Massa) a variável *rider_mass* é a massa do condutor e a variável *vehicle_mass* a massa do veículo. O parâmetro *Horizontal distance from CG to front axle* (Distância horizontal do CG às rodas dianteiras) configura a distância horizontal do eixo dianteiro ao centro de gravidade do veículo. O parâmetro *Horizontal distance from CG to rear axle* (Distância horizontal do CG às rodas traseiras) configura a distância horizontal do eixo traseiro ao centro de gravidade do veículo, veja **Figura 6.44**.

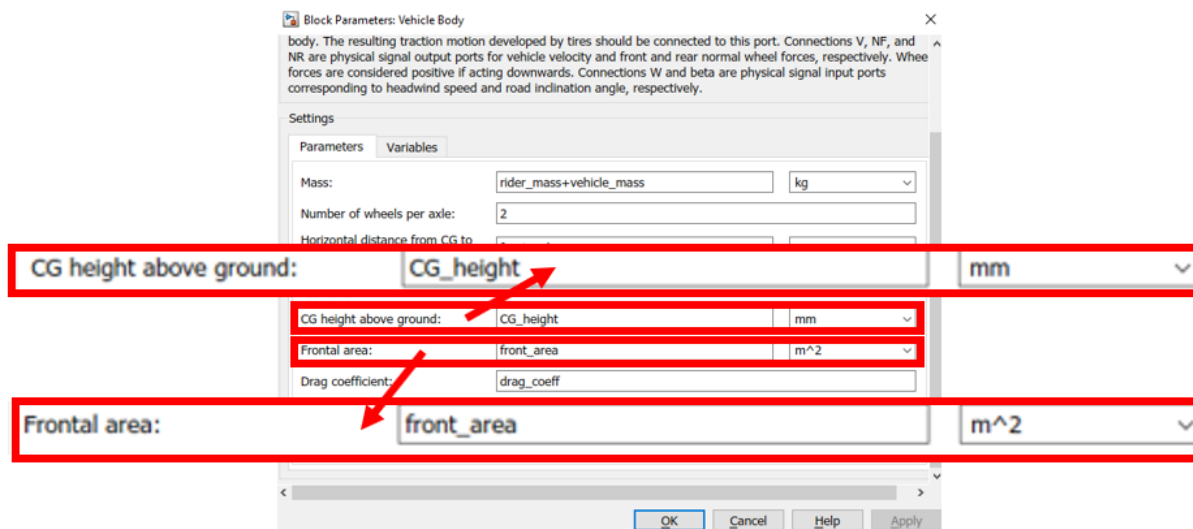
Figura 6.44: Distância horizontal do eixo dianteiro e traseiro do centro de gravidade do modelo.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A altura (h) do centro de gravidade do veículo e o solo é configurado no parâmetro *CG height above ground* (Altura do CG sobre o terreno). A área frontal do veículo é configura no parâmetro *Frontal area* (Área frontal), veja **Figura 6.45**.

Figura 6.45: Altura do centro de gravidade e área frontal do bloco *Vehicle Body*.

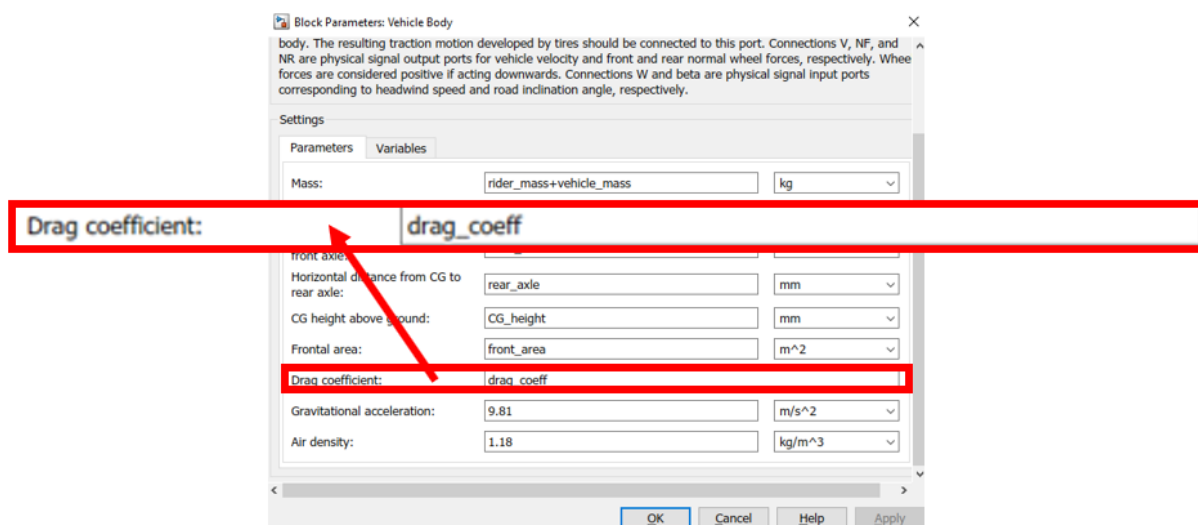


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Neste caso a variável *CG_height* representa a altura do centro de gravidade do veículo e *front_area* representa a área frontal do veículo.

O coeficiente de arrasto é representado pela variável *drag_coeff* e é adicionada ao modelo por meio do parâmetro *Drag coefficient*, veja **Figura 6.46**.

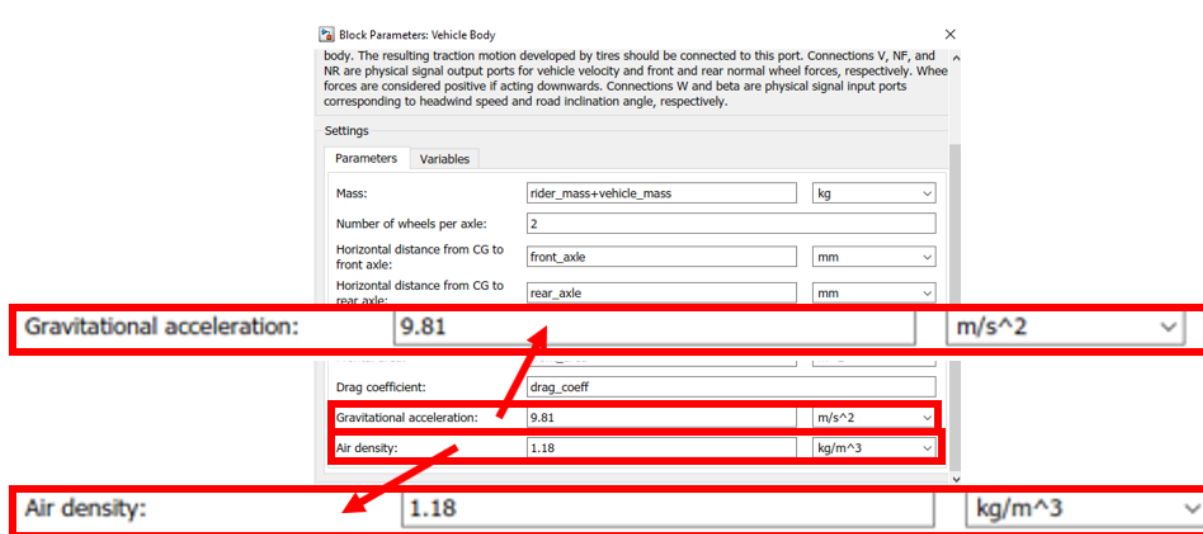
Figura 6.46: Coeficiente de arrasto do bloco Vehicle Body.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Os dois últimos parâmetros do modelo empregado para o corpo do veículo são a aceleração da gravidade e a densidade do ar, veja **Figura 6.47**.

Figura 6.47: Aceleração da gravidade e densidade do ar do bloco Vehicle Body.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A aba parâmetros ficou da seguinte maneira, veja **Figura 6.48**.

Figura 6.48: Parâmetros do bloco Vehicle Body.

Mass:	rider_mass+vehicle_mass	kg
Number of wheels per axle:	2	
Horizontal distance from CG to front axle:	front_axle	mm
Horizontal distance from CG to rear axle:	rear_axle	mm
CG height above ground:	CG_height	mm
Frontal area:	front_area	m^2
Drag coefficient:	drag_coeff	
Gravitational acceleration:	9.81	m/s^2
Air density:	1.18	kg/m^3

Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.4.2. Variáveis

Na aba *Variable*, veja **Figura 6.49**, é possível configurar as condições iniciais do modelo, e a prioridade que esta variável pode ter sobre outras variáveis, em outras palavras, se condições iniciais diferentes são configuradas para a mesma variável, a variável de maior prioridade sobrescreverá a de prioridade inferior, caso a caixa *Override* (Sobrepôr) seja marcada.

Figura 6.49: Configuração das variáveis do bloco *Vehicle Body*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Diferentemente dos valores configurados na aba *Parameters*, os valores de *Variables* são ignorados sempre que não são utilizados pelo conjunto de equações associadas ao modelo. As configurações da aba *Variables* ficaram como visto na **Figura 6.49**.

6.5. Modelo Pneu

Este bloco modela um pneu com características longitudinais dadas por uma fórmula empírica. O bloco *Tire (Magic Formula)* pode ser visto logo a seguir na **Figura 6.50**.

Figura 6.50: Bloco Tire (Magic Formula).



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Neste modelo a porta (*A*) representa o eixo no qual a roda é acoplada. A porta (*H*) representa o cubo da roda, o qual transmite o impulso gerado pelo pneu para o resto do veículo. A entrada (*N*) recebe os valores de força normal a qual o pneu está submetido. A saída (*S*) disponibiliza um sinal que representa o deslizamento do pneu durante a simulação. Uma entrada (*M*) ainda pode ser habilitada para que os coeficientes do modelo sejam inseridos dinamicamente. Essa variante é útil para modelar uma roda em condições de pavimentação irregular.

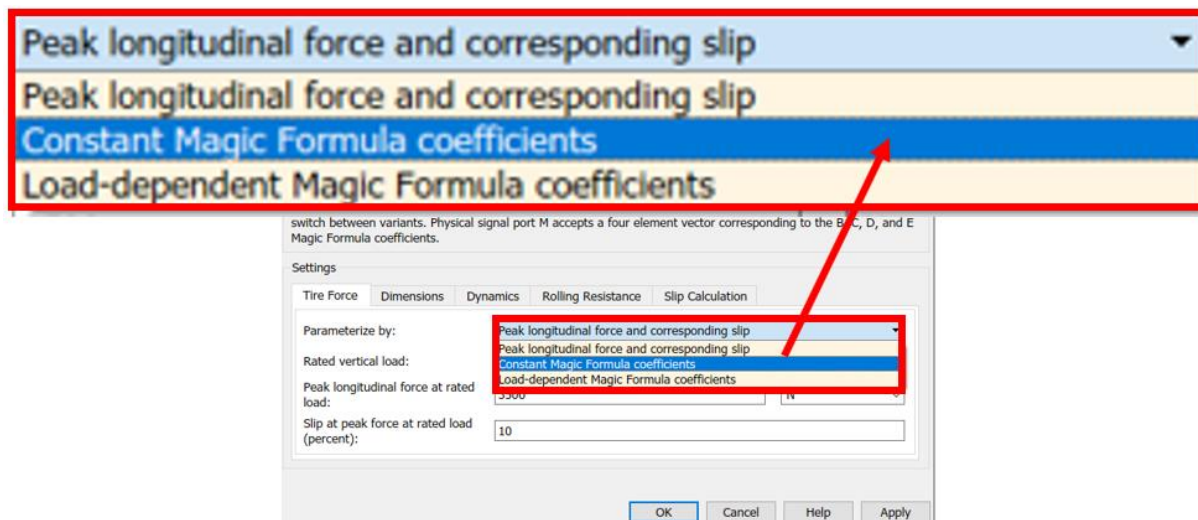
Para habilitar a porta (*M*) basta clicar com o botão direito sobre o bloco *Tire (Magic Formula)* e seguir por *Simscape -> Block choices -> Variant friction coefficients*. Os coeficientes são inseridos no formato de um vetor de quatro elementos no formado $[b, c, d, e]$.

Esse bloco é capaz de assumir apenas movimentos longitudinais e não inclui curvatura, giro ou movimento lateral. Esse modelo trata o pneu e a roda com uma combinação rígida em contato com a estrada e sujeito a deslizamento sobre o piso. Quando o conjugado é aplicado ao eixo da roda, o pneu empurra o solo (enquanto sujeito ao atrito de contato) e transfere o resultado desta ação para a roda. Essa ação faz com que o solo empurre a roda para frente ou para traz.

6.5.1. Força da Roda

Na aba *Tire Force* (Força da Roda) a maneira como a *Magic Formula* (Formula Mágica) modelará a interação roda/pavimento. Existem três opções de parametrização para esse modelo, veja **Figura 6.51**.

Figura 6.51: Opções de parametrização do bloco Tire (Magic Formula).



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção *Peak longitudinal force and corresponding slip* (Força longitudinal de pico e deslizamento correspondente) parametriza o modelo utilizando as forças que agem sobre a roda.

Os parâmetros a serem configurados nessa opção são *Rated vertical load* (Carga vertical normal) que é a força normal suportada por cada roda do veículo; *Peak longitudinal force at rated load* (Força longitudinal de pico na carga nominal) que parametriza a força longitudinal máxima que a roda exerce sobre o pneu quando a carga vertical é igual ao seu valor nominal; e *Slip at peak force at rated load* (Escorregamento no pico da força nominal), dado em porcentagem, é o valor do escorregamento de contato quanto a força longitudinal é máxima e a força normal está em seu valor nominal. Esses parâmetros podem ser vistos na **Figura 6.52**.

Figura 6.52: Parâmetros da opção *Peak longitudinal force and corresponding slip*.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na parametrização do modelo pelo método *Constant Magic Formula coefficients* (Coeficientes constantes da Fórmula Mágica) os coeficientes da *Magic Formula* são inseridos diretamente, veja **Figura 6.53**.

Figura 6.53: Parametrização do modelo pela opção *Constant Magic Formula coefficients*.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

Neste caso, assim como em casos anteriores, os coeficientes são inseridos através de variáveis configuradas no ambiente MATLAB®. As configurações apresentadas na **Figura**

6.53 foi a forma adotada para as rodas neste trabalho.

Outra maneira de parametrização é por *Load-dependent Magic Formula coefficients* (Coeficientes da Formula Mágica em função da carga) onde os coeficientes da *Magic Formula C, D, E, K, H e V* são carregadas na forma de vetores para definir a dependência da carga, veja **Figura 6.54**.

Figura 6.54: Configuração dos coeficientes da Magic Formula em função da carga.

The image shows a software interface for configuring Magic Formula coefficients. It consists of two overlapping windows. The top window, which is highlighted with a red border, contains the following input fields:

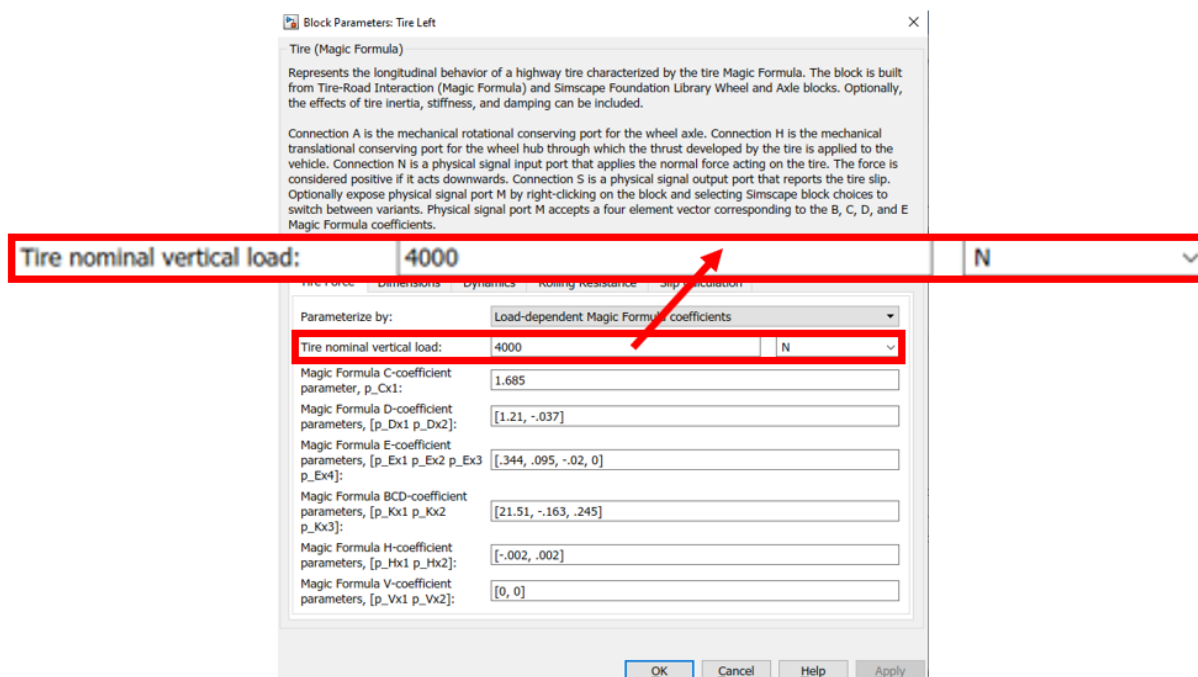
- Magic Formula C-coefficient parameter, p_{Cx1} : 1.685
- Magic Formula D-coefficient parameters, $[p_{Dx1} \ p_{Dx2}]$: [1.21, -.037]
- Magic Formula E-coefficient parameters, $[p_{Ex1} \ p_{Ex2} \ p_{Ex3} \ p_{Ex4}]$: [.344, .095, -.02, 0]
- Magic Formula BCD-coefficient parameters, $[p_{Kx1} \ p_{Kx2} \ p_{Kx3}]$: [21.51, -.163, .245]
- Magic Formula H-coefficient parameters, $[p_{Hx1} \ p_{Hx2}]$: [-.002, .002]
- Magic Formula V-coefficient parameters, $[p_{Vx1} \ p_{Vx2}]$: [0, 0]

The bottom window is a smaller, semi-transparent version of the same interface, showing the same input fields. A red arrow points from the bottom window to the top one. At the bottom of the interface are buttons for OK, Cancel, Help, and Apply.

Fonte: (Elaborado pelo autor).

O valor da carga vertical nominal da rodagem (*Tire nominal vertical load*) é outro valor que deve ser parametrizado nesta opção, este é o valor nominal da força normal que atua sobre a roda, veja **Figura 6.55**.

Figura 6.55: Parametrização da Tire nominal vertical load.

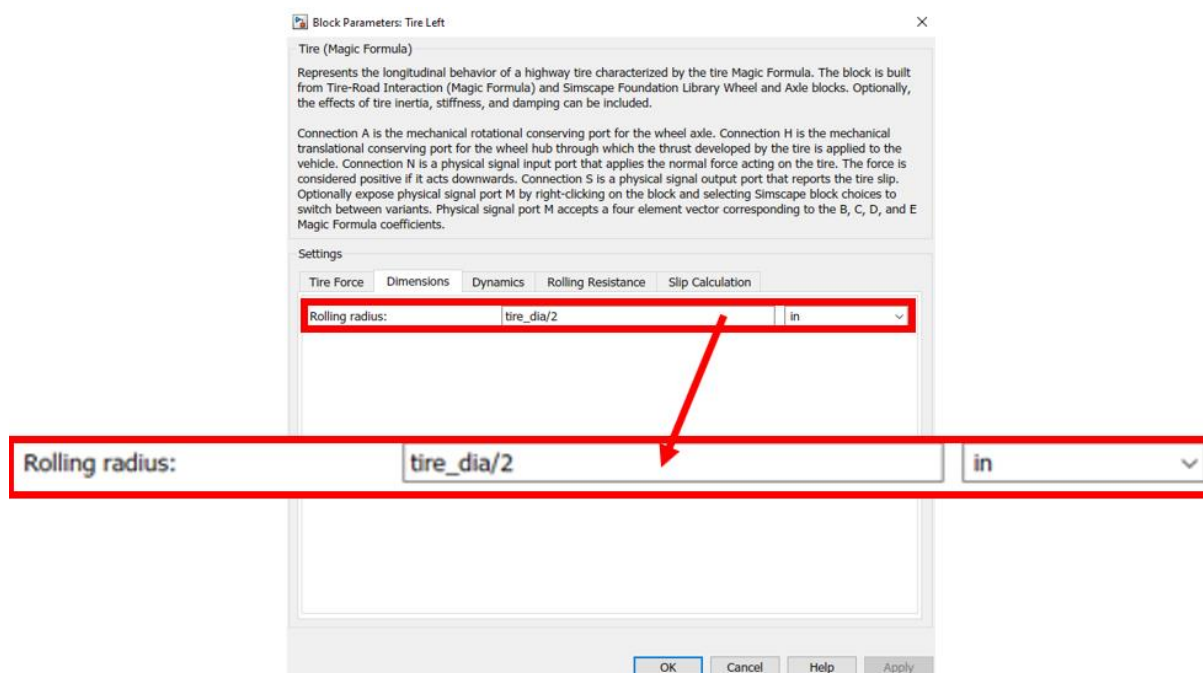


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.5.2. Dimensões

A aba *Dimensions* (Dimensões) o raio roda-pneu é inserido como visto na **Figura 6.56**.

Figura 6.56: Parametrização das dimensões do bloco Tire (Magic Formula).



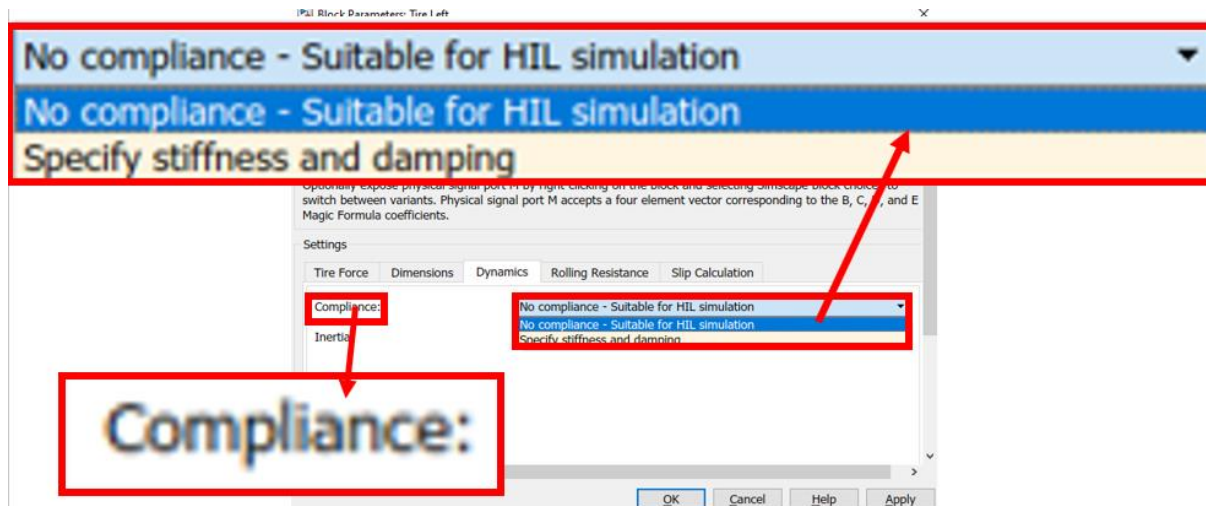
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Novamente optou-se por utilizar uma variável na configuração de outro parâmetro do modelo, desta vez a variável utilizada é *tire_dia* que representa o diâmetro roda-pneu em polegadas (in). Para obter o raio roda-pneu a variável é dividida por dois como visto na **Figura 6.56**.

6.5.3. Dinâmicas

Na aba *Dynamics* (Dinâmicas) a inercia e a deformação dinâmica da roda podem ser modeladas. A opção *Compliance* (Conformidade) parametriza o modelo como sem deformação dinâmica (*no compliance – Suitable for HIL simulation*) ou com a deformação dinâmica especificada (*Specify stiffness and damping*), veja **Figura 6.57**.

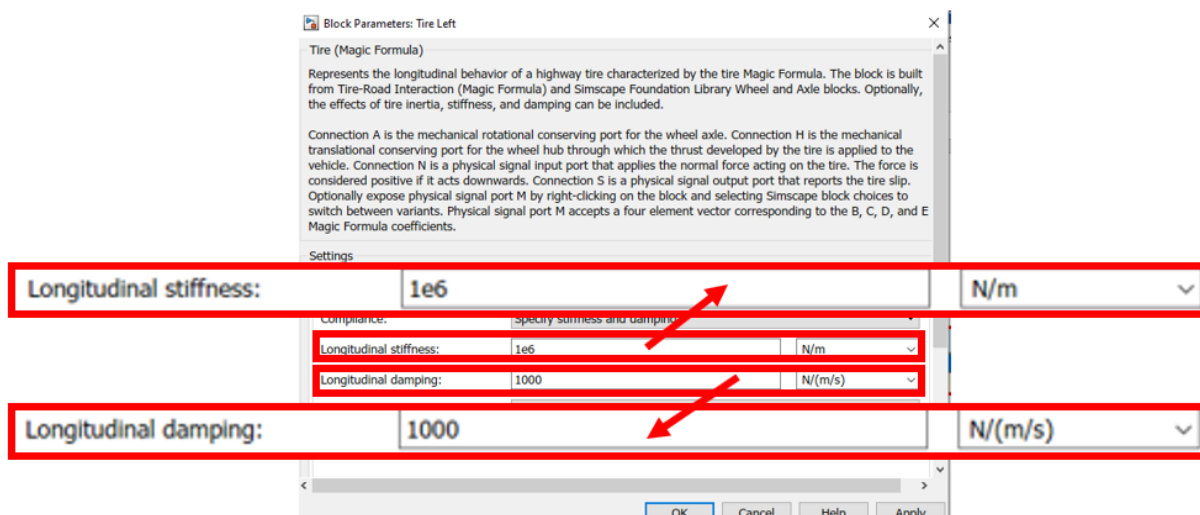
Figura 6.57: Parametrização da deformação dinâmica do bloco Tire (Magic Formula).



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Se a opção *Specify stiffness and damping* for selecionada o pneu será modelado como um corpo que deforma sob carga, tal qual uma mola amortecida. Duas novas opções devem ser parametrizadas, veja **Figura 6.58**.

Figura 6.58: Configuração da opção *Specify stiffness and damping*.



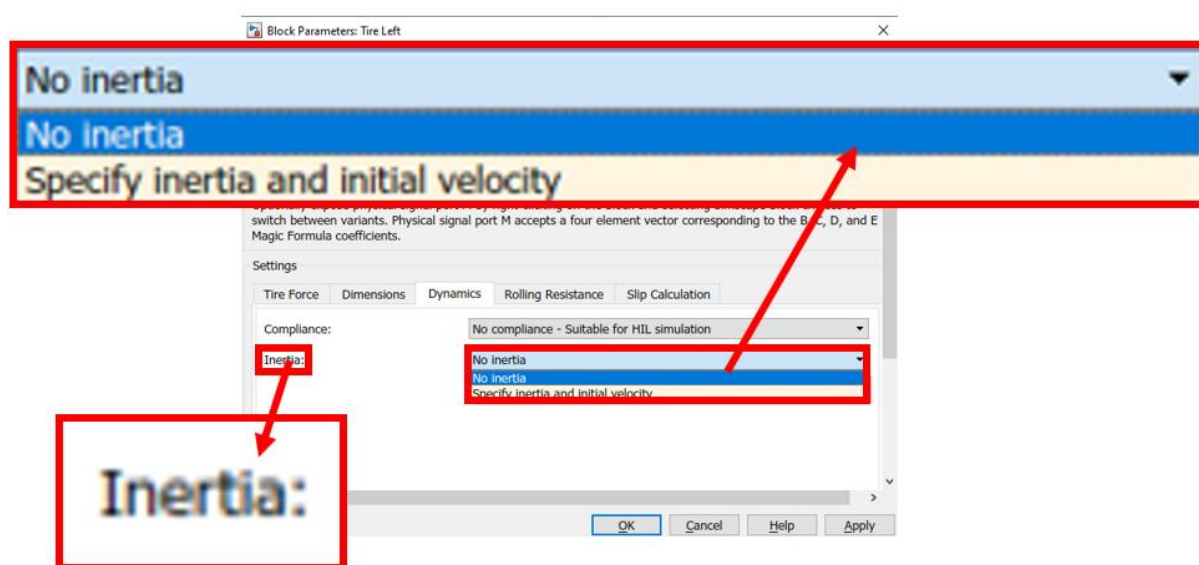
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Em *Longitudinal stiffness* (Rigidez longitudinal) a rigidez longitudinal do pneu é

inserida enquanto na opção *Longitudinal damping* (Amortecimento longitudinal) o amortecimento longitudinal é definido. Vale lembrar que as unidades são definidas no menu em lista como visto na **Figura 6.17**.

Outra opção de parametrização da aba *Dynamics* é a *Inertia* (Inércia) onde é definido como a inércia rotacional será modelada. As maneiras de parametrização da inércia podem ser vistas em **Figura 6.59**.

Figura 6.59: Opções de parametrização da inércia rotacional do boco Tire (Magic Formula).

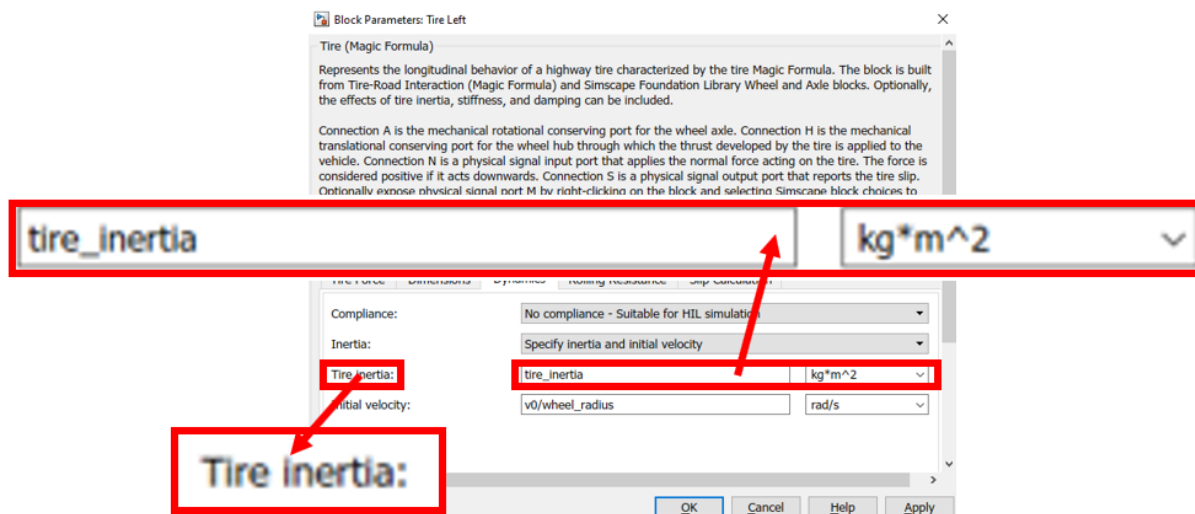


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A opção *No inertia* (Sem inércia) faz com que o pneu seja modelado sem inércia. A opção *Specify inertia and initial velocity* (Especifique a inércia e a velocidade inicial) habilita a edição de dois novos parâmetros: *Tire inertia* (Inércia do pneu) e *Initial velocity* (Velocidade Inicial).

Em *Tire inertia* a inércia rotacional do conjunto roda-pneu é especificada, veja **Figura 6.60**.

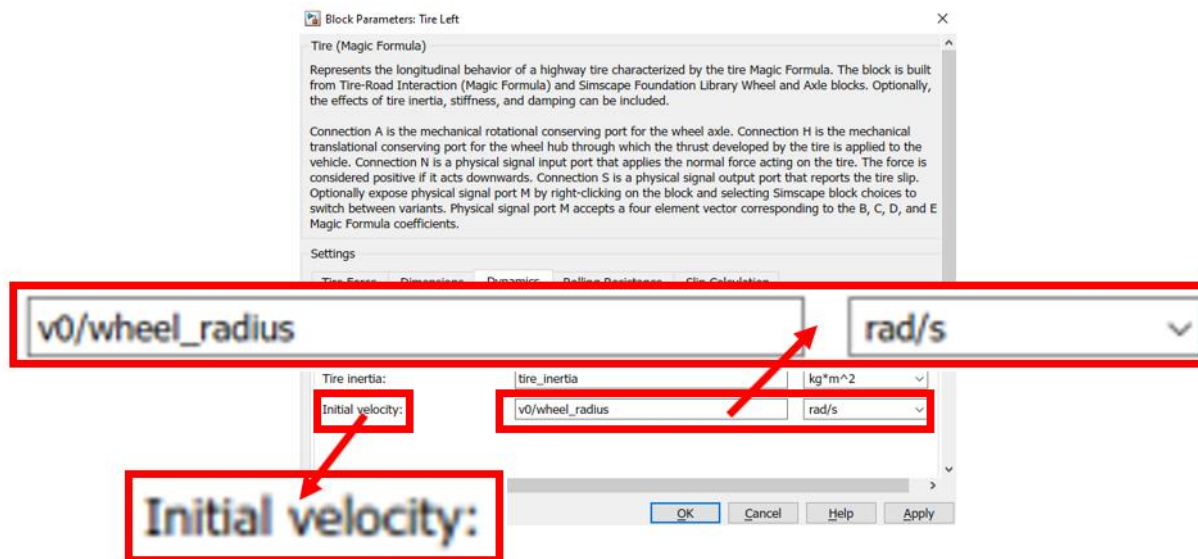
Figura 6.60: Configuração de valor para a inércia rotacional do bloco Tire (Magic Formula).



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Na opção *Initial velocity* (Velocidade Inicial) a velocidade angular $\omega(0)$ do conjunto roda-pneu é configurado, veja **Figura 6.61**.

Figura 6.61: Configuração da velocidade inicial do bloco Tire (Magic Formula).



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para a simulação o modelo foi configurado como pode ser visto na **Figura 6.62**.

Figura 6.62: Parametrização adotada para o bloco Tire (Magic Formula).

Compliance:	No compliance - Suitable for HIL simulation ▼	
Inertia:	Specify inertia and initial velocity ▼	
Tire inertia:	tire_inertia	kg*m^2 ▼
Initial velocity:	v0/wheel_radius	rad/s ▼

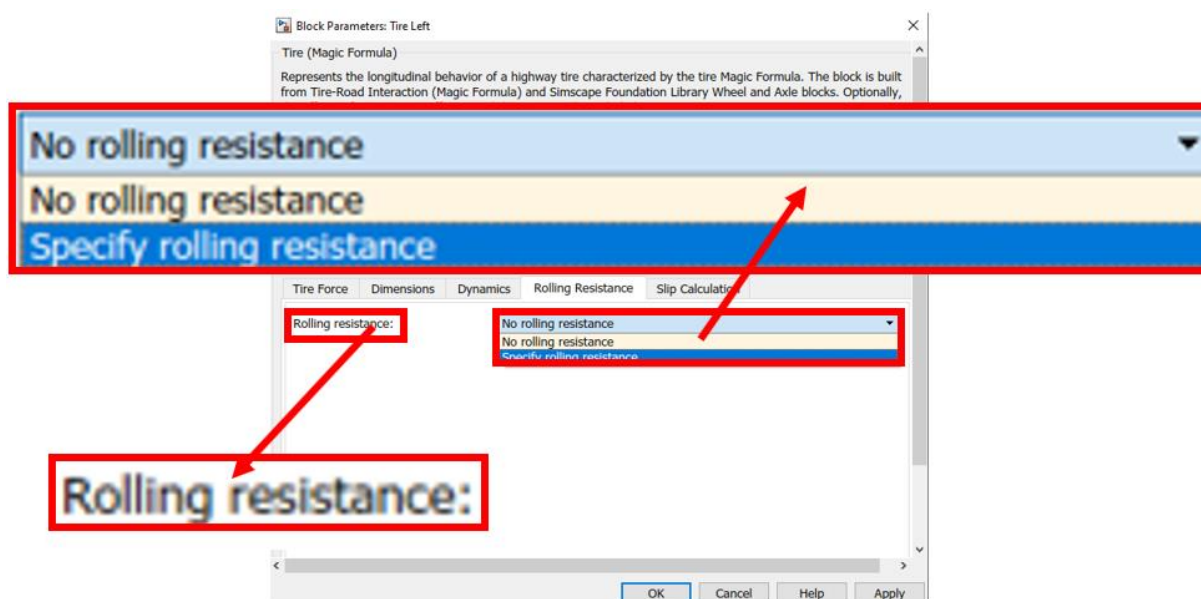
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Observe que semelhantemente ao realizado **Figura 6.27**, a parametrização da opção *Initial velocity* é realizada por uma relação entre vereáveis que relaciona a velocidade linear do veículo a velocidade angular da roda. Esse é um cuidado tomado para que a coerência, entre as velocidades iniciais de cada bloco da simulação, seja mantida a cada atualização de parâmetro.

6.5.4. Resistência ao Rolamento

Na aba *Rolling Resistance* (Resistência ao Rolamento) é escolhido o método utilizado para especificar a resistência ao rolamento atuante no cubo da roda em movimento. Pode ser feita a opção por um modelo sem resistência ao rolamento aplicando a opção *No rolling resistance* (Sem resistência ao rolamento). Em *Specify rolling resistance* (Especifique a resistência ao rolamento) um modelo deve ser escolhido e parametrizado. Ambas as opções podem ser vistas na **Figura 6.63**.

Figura 6.63: Opções de modelo na aba Rolling Resistance.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O modelo de coeficientes de resistência constante, a resistência ao rolamento é diretamente proporcional ao coeficiente de resistência, veja Equação (6.15).

$$F_{rol} = F_N \cdot \mu_{rol} \quad (6.15)$$

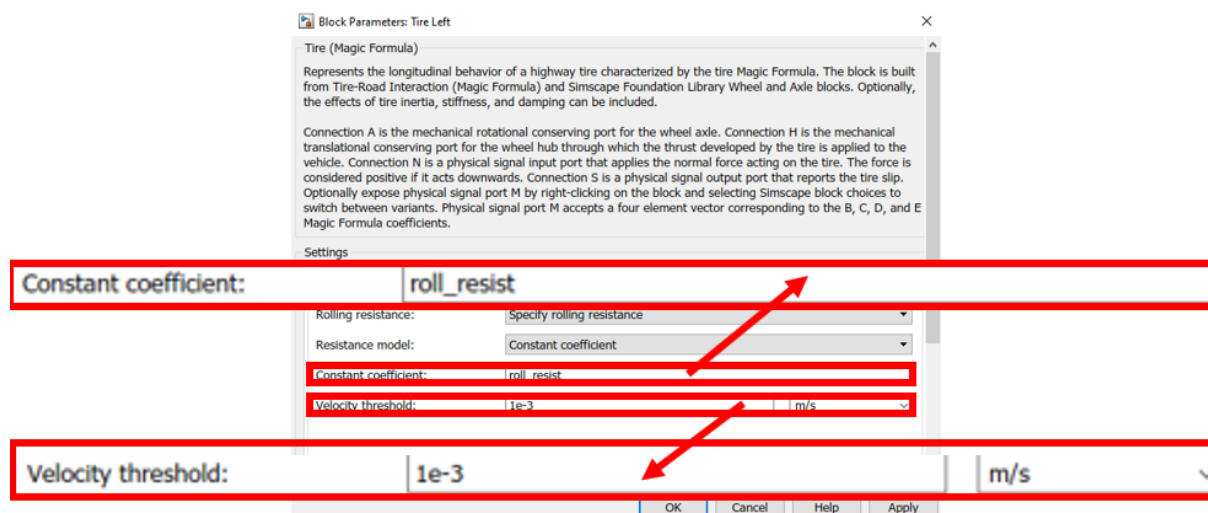
Onde,

- F_{rol} – Força de resistência ao rolamento;
- F_N – Força normal;
- μ_{rol} – Coeficiente de rolamento.

Para que o modelo seja parametrizado pela opção *Constant coefficient* (Coeficiente constante) o coeficiente que define a proporcionalidade entre a força normal e força de resistência ao rolamento é configurado em *Constant coefficient* (Coeficiente constante). O parâmetro *Velocity threshold* (limite de velocidade) define a velocidade em que a força de

resistência ao rolamento será aplicada integralmente no cubo da roda, além de garantir sua continuidade mesmo se a velocidade mudar abruptamente para a direção oposta, veja **Figura 6.64**.

Figura 6.64: Parâmetros da opção *Constant coefficient*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Outra forma de parametrização da resistência ao rolamento é em função da pressão e velocidade na opção *Pressure and velocity dependent* (Pressão e velocidade dependentes). Este modelo usa a seguinte relação, veja Equação (6.16).

$$F_{rol} = \left(\frac{P_r}{P_{r0}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{F_N}{F_{N0}} \right)^{beta} \cdot F_{N0} \cdot (A + B \cdot |v_{cubo}| + C \cdot v_{cubo}^2) \quad (6.16)$$

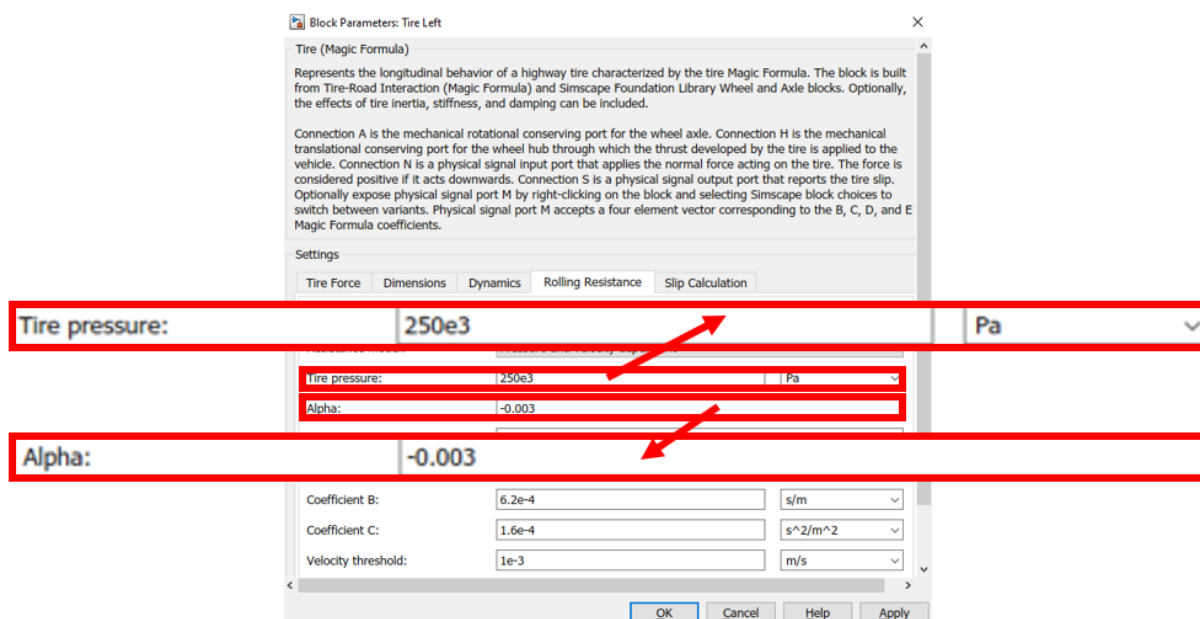
Onde,

- F_{rol} – Força de resistência ao rolamento;
- P_r – Pressão no pneu;
- v_{cubo} – Velocidade do cubo da roda;
- α, β, A, B, C – Coeficientes aproximados;
- P_{r0} – 1 Pascal (P_a);

➤ $F_{N_0} = 1$ Newton (N).

Neste caso, os parâmetros a serem configurados são: *Tire pressure* (Pressão do pneu – Pressão insuflada no pneu), *Alpha* (Alfa – Expoente da pressão da roda na equação do modelo), veja **Figura 6.65**.

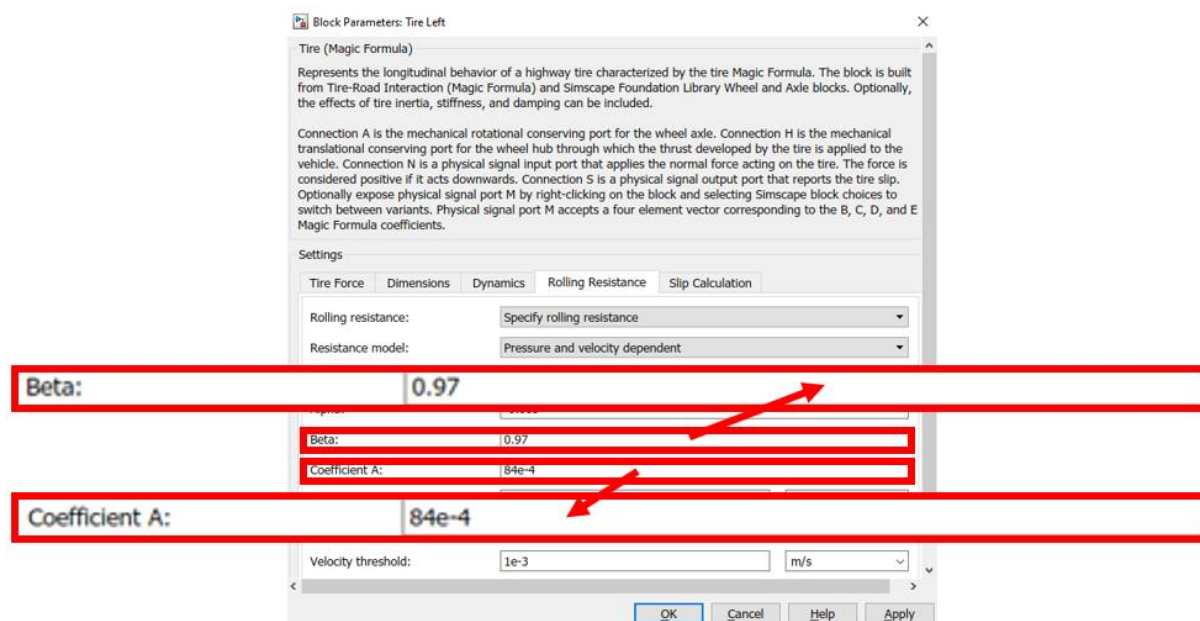
Figura 6.65: Parametrização da pressão e coeficiente alpha do modelo.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Beta (Beta – Expoente da força normal na equação do modelo), *Coefficient A* (Coeficiente A – Componente da força independente da velocidade na equação do modelo), veja **Figura 6.66**.

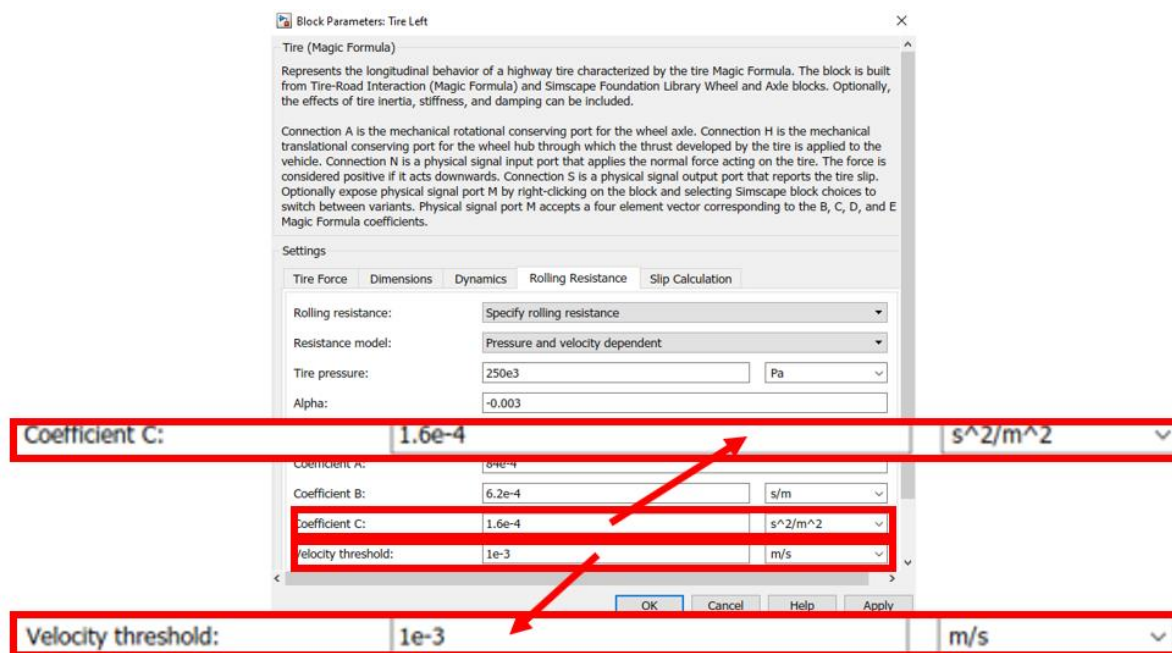
Figura 6.66: Parametrização do expoente Beta e Coeficiente A do modelo.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Coefficient C (Coeficiente C – Componente da força dependente do termo velocidade ao quadrado na equação do modelo) e *Velocity threshold* (Limiar de velocidade – Velocidade na qual a força de resistência ao rolamento é totalmente transmitida para o cubo da roda), veja **Figura 6.67**.

Figura 6.67: Parametrização do limiar de velocidade e Coeficiente C do modelo.



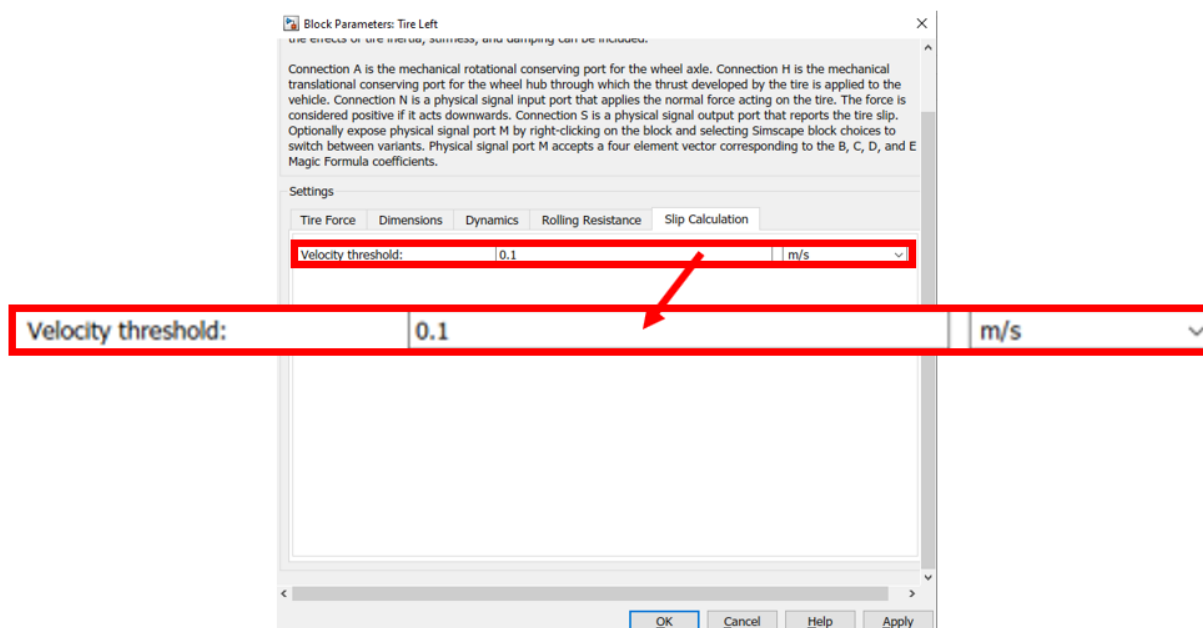
Fonte: (Elaborado pelo autor).

O modelo foi parametrizado com base em *Constant coefficient*, conforme o apresentado na **Figura 6.64**. A variável *roll_resist* parametriza o componente *Constant coefficient* enquanto o valor do parâmetro *Velocity threshold* é mantido com o valor padrão (10^{-3} m/s).

6.5.5. Cálculo do escorregamento

O único parâmetro encontrado na aba *Slip Calculation* (Cálculo do escorregamento) é *Velocity threshold* (Limiar de velocidade – Velocidade do cubo da roda abaixo da qual o cálculo do escorregamento é modificado para evitar uma evolução singular na velocidade zero), veja **Figura 6.68**.

Figura 6.68: Parametrização do cálculo de escorregamento.



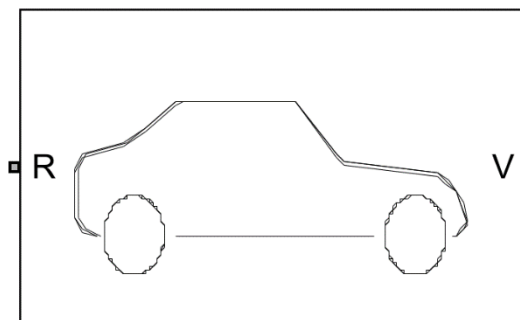
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Este parâmetro permaneceu com o valor padrão, 0,1 m/s.

6.6. Modelo Carro

A combinação dos blocos *Tire (Magic Formula)* e *Vehicle Body* formam, neste modelo, o subsistema carro. O subsistema carro pode ser visto na **Figura 6.69** logo a seguir.

Figura 6.69: Subsistema Carro

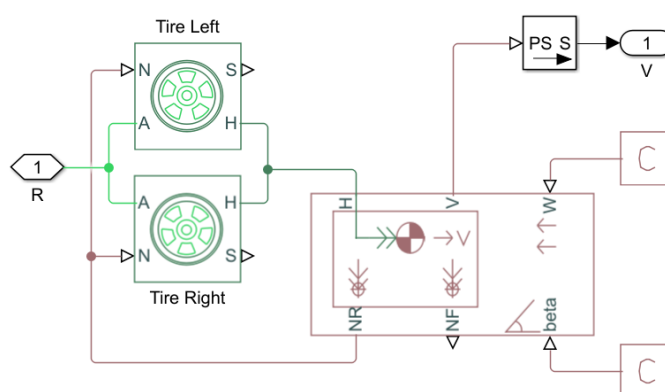


Fonte: (Elaborado pelo autor).

No interior do subsistema carro, reside a combinação dos blocos *Vehicle Body* e *Tire*

(*Magic Formula*). Como o bloco de corpo do carro ainda necessita de informações do tipo ângulo de aclave do terreno (β) e velocidade do vento, dois blocos do tipo constante foram configurados com valor zero e conectados a estas portas. Desta maneira, considera-se com que o modelo esteja sendo guiado em um terreno plano e sem correntes de ar. A título de simulação, foram conectadas rodas apenas ao eixo traseiro do veículo, as rodas que serão tracionadas, o modelo *Vehicle Body* funcionará como se tivesse rodas conectadas na parte frontal também, porém, não será possível visualizar os efeitos da dinâmica do veículo das rodas dianteiras. A **Figura 6.70** apresenta a parte interna o subsistema Carro.

Figura 6.70: Bloco Carro



Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.7. Interface Bloco MRV / Bloco Carro

Para converter o MRV para um fornecedor de conjugado rotacional para o sistema carro, além de realizar a conversão do sinal do domínio *Simulink* para o domínio físico, também é necessário interligar este modelo a uma fonte controlável de conjugado. O bloco escolhido para este trabalho foi *Ideal Torque Source* (Fonte ideal de conjugado). Este bloco funciona como uma fonte ideal de conjugado, transmitindo o sinal da entrada para a saída independentemente do sistema acoplado a saída. A **Figura 6.71** a seguir apresenta o bloco encontrado no *Simulink*.

Figura 6.71: Bloco Ideal Torque Source



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O bloco possui a porta (R) para saída de conjugado resultante. A porta (C) é a entrada de conjugado relacionada a referência adotada e a porta (S) é a entrada para o sinal PS (*Physic signal*).

6.8. Caixa de engrenagem

Este bloco aplica uma relação de engrenagens, modificando o conjugado e a velocidade angular seguindo a seguinte relação (6.17).

$$N_F \cdot \omega_F = N_B \cdot \omega_B \quad (6.17)$$

Onde N_F e N_B são o número de dentes de cada engrenagem, ω_F e ω_B são as velocidades angulares instantâneas de cada engrenagem. Por meio da Equação (6.2), para uma potência constante, podemos perceber que o conjugado também é alterado. A **Figura 6.72** a seguir apresenta o bloco encontrado no *Simulink*.

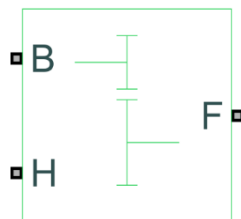
Figura 6.72: Bloco Simple Gear

A porta (B) é uma entrada e representa o conjugado aplicado ao eixo da engrenagem

Fonte: (Elaborado pelo autor).

base. A porta (F) é a saída do conjugado resultante da relação engrenagem base (B) e engrenagem seguidora (F). Existe a opção de habilitar uma porta de conversão térmica, porta (H), para modelagem térmica, veja **Figura 6.73**.

Figura 6.73: Bloco Simple Gear com porta (H).



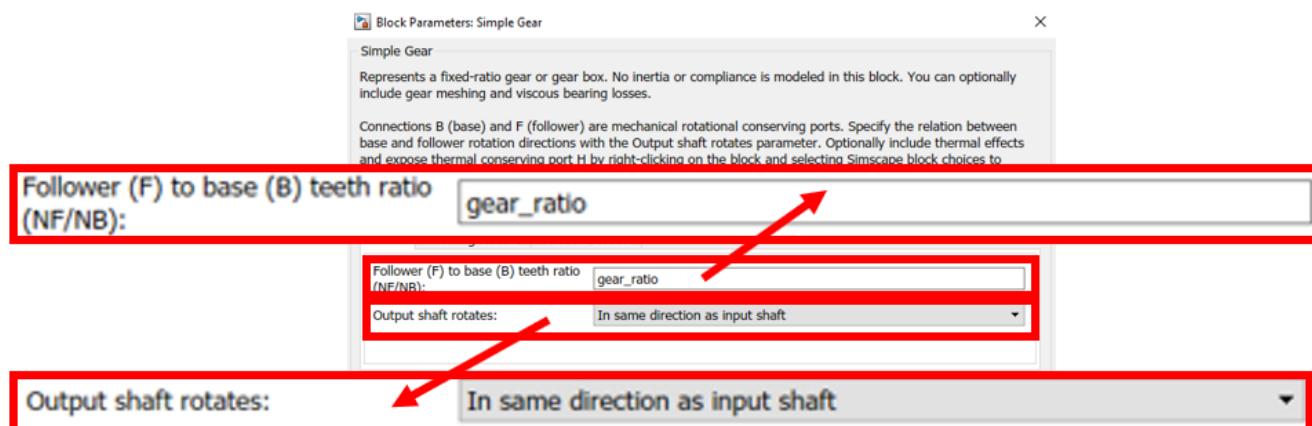
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para habilitar a porta (H) é necessário selecionar o bloco com o botão direito do mouse e seguir o caminho *Simscape > Block choices > Show thermal port*, selecionado a opção *Show thermal port* (Mostrar porta térmica).

Neste bloco, a inércia, assim como a deformação, das engrenagens é desprezada. A perda por atrito pode ser simplificada para diminuir o custo computacional da simulação.

O bloco recebe a razão entre os dentes das engrenagens no parâmetro *Follower (F) to base (B) teeth ratio (NF/NB)* (Razão de dentes (NF/NB) seguidor (F) para base (B)). A opção *Output shaft rotates* (Rotação do eixo de saída) configura a direção do movimento de rotação do eixo de acionamento do seguidor (saída) em relação ao movimento do eixo acionador da base (entrada), como pode ser visto a seguir **Figura 6.74**.

Figura 6.74: Configuração de transmissão

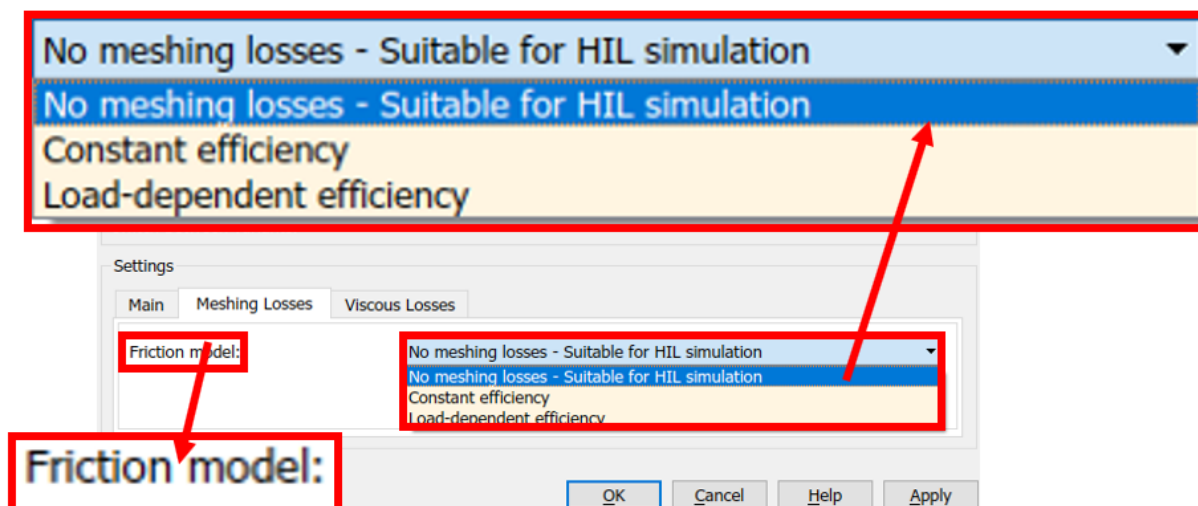


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.8.1. Perdas de malha

A aba *Meshing Losses* (Perdas de malha) modela as perdas devido ao atrito entre as engrenagens. Quando a porta (*H*) está desabilitada os métodos disponíveis são: *No meshing losses* (Sem perdas de malha), *Constant efficiency* (Eficiência constante), *Load-Dependent Efficiency* (Eficiência dependente da carga), veja **Figura 6.75**.

Figura 6.75: Modelos de perdas de malha para o bloco sem porta (*H*).



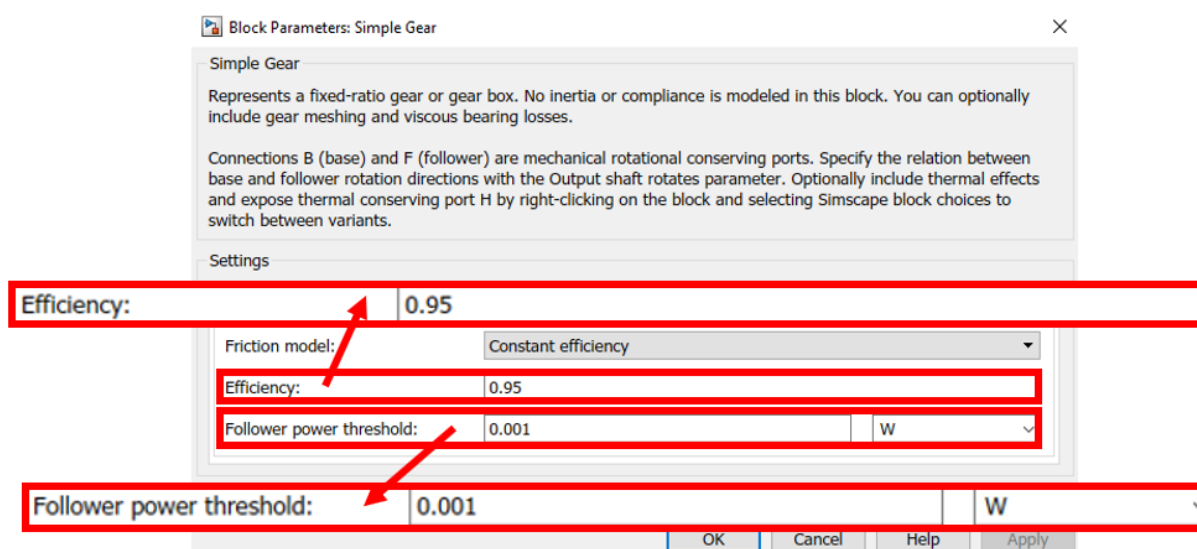
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Em *No meshing losses* as perdas por atrito no sistema de engrenagens são

desprezadas. A malha é tida como ideal.

Em *Constant efficiency* o conjugado transferido é reduzido devido um fator de eficiência parametrizado em *Efficiency* (Eficiência). Esse fator é independente da carga, inversamente proporcional as perdas de malha e deve estar contido no intervalo entre zero e um. Outro parâmetro desta opção é *Follower power threshold* (Limite de potência do seguidor) onde é definido a partir de qual valor de potência o fator de eficiência é integralmente aplicado. A baixo desse valor de potência o fator de eficiência é suavizado para um, seguido uma função tangente hiperbólica, veja **Figura 6.76**, este foi o método utilizado na simulação.

Figura 6.76: Parametrização da perda de malha por coeficiente constante.

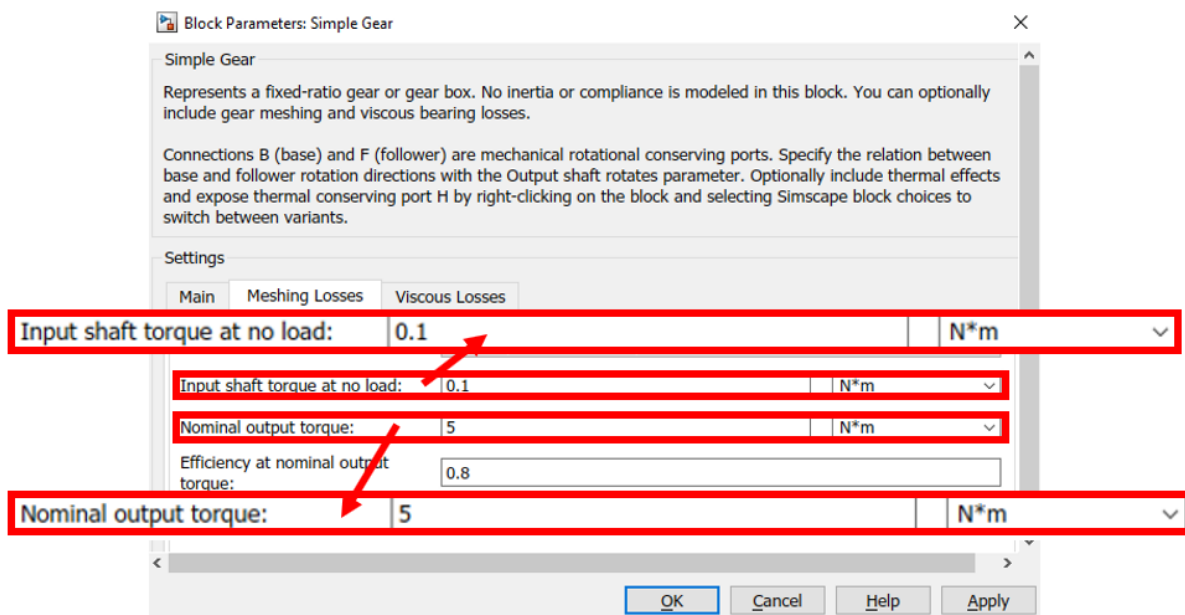


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Outra opção de parametrização é *Load-dependent efficiency* (eficiência dependente da carga) onde o conjugado transferido é atenuado por um fator de eficiência dependente da carga no eixo. O fator de eficiência é um valor entre zero e um.

Nessa opção deve ser parametrizado o *Input shaft torque at no load* (Conjugado no eixo de entrada sem carga) que define o conjugado que atua sobre o eixo de entrada quando a transferência de conjugado para o eixo de saída é igual a zero. *Nominal output torque* (Conjugado nominal de saída) que define o conjugado de saída que normaliza a eficiência dependente da carga, veja **Figura 6.77**.

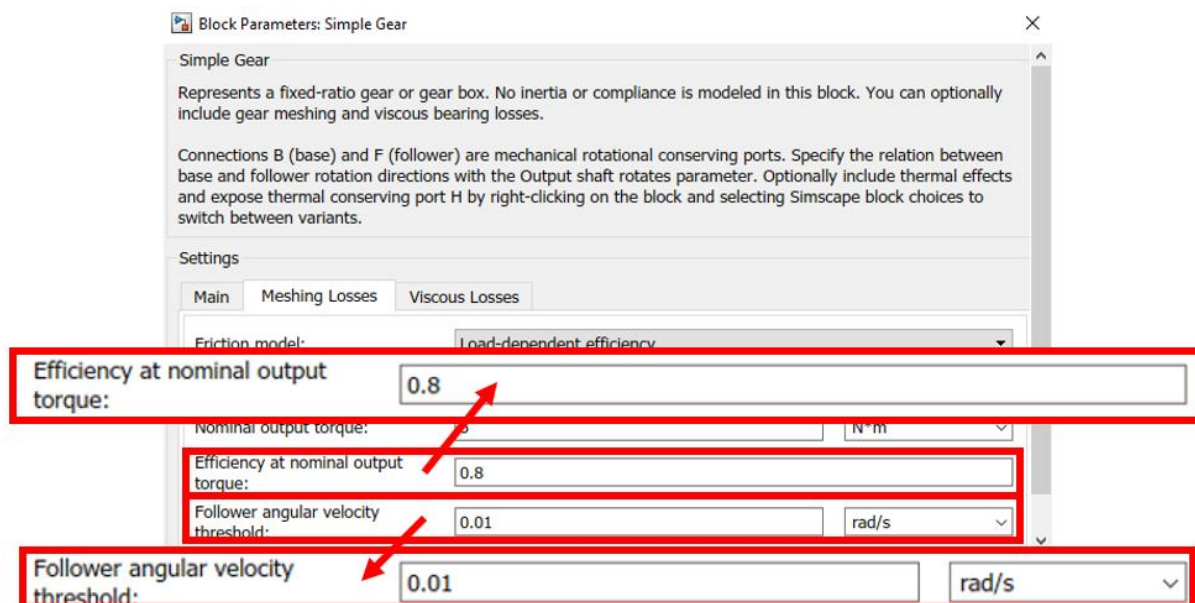
Figura 6.77: Parametrização do Input shaft torque at no load e Nominal output torque.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Efficiency at nominal output torque (Eficiência no conjugado nominal de saída) é o parâmetro que define o valor da eficiência da transferência de conjugado quando o conjugado de saída está no valor nominal. Em *Follower angular velocity threshold* (Limiar de velocidade angular do seguidor (F)) parametriza-se a velocidade angular no eixo seguidor (F) acima do qual o fator de eficiência é integralmente aplicado, abaixo desse valor, esse fator é incrementado seguindo uma função tangente hiperbólica, diminuindo as perdas para zero quando em repouso, veja **Figura 6.78**.

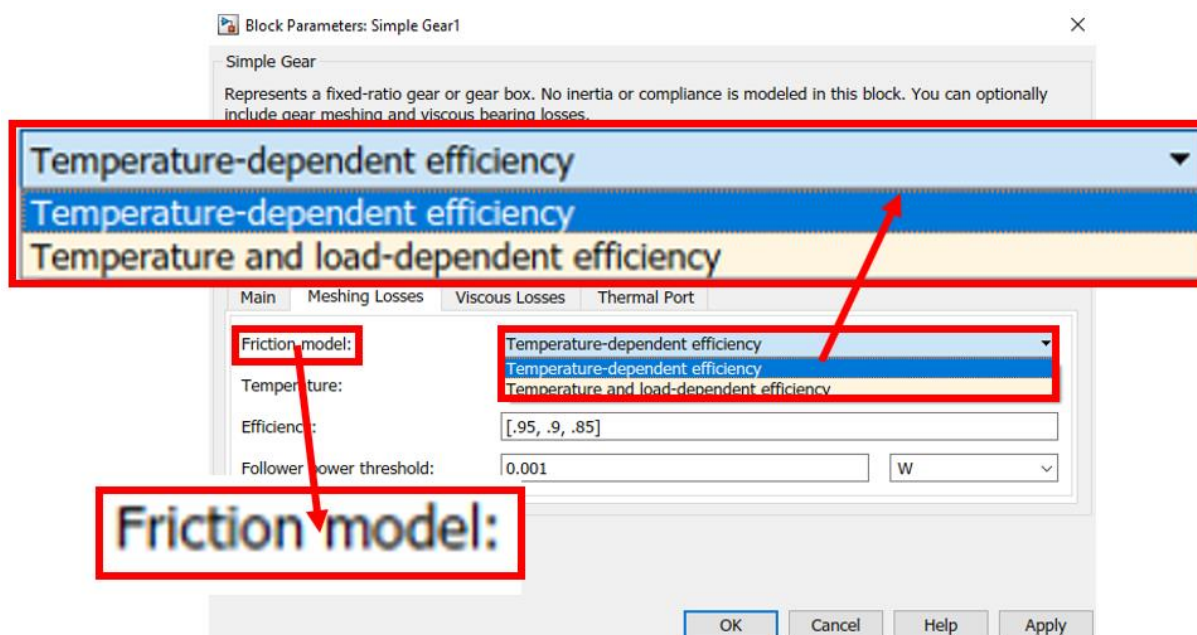
Figura 6.78: Parametrização de *Efficiency at nominal output torque* e *Follower angular velocity threshold*.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Se a porta (*H*) estiver habilitada, ainda existem outras duas opções de parametrização das perdas de malha, veja **Figura 6.79**.

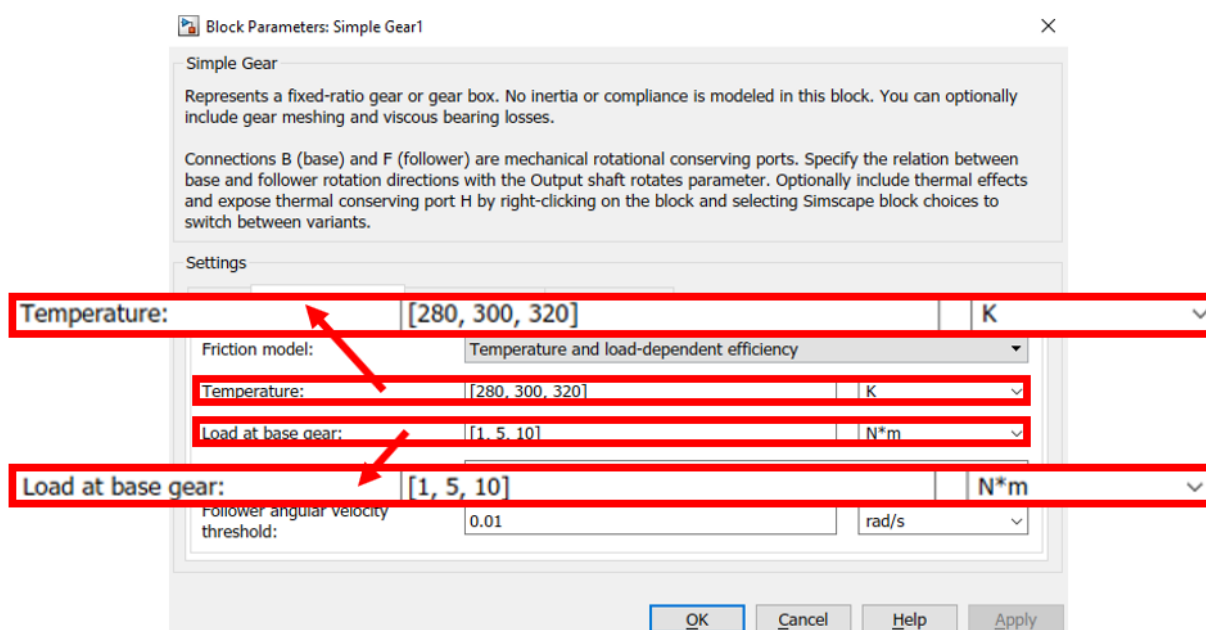
Figura 6.79: Opções de parametrização da perda da malha quando a porta (*H*) está habilitada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

No modelo *Temperature and load-dependent efficiency* (Eficiência dependente da temperatura e da carga). Neste modelo, o fator de eficiência varia com a temperatura e a carga. Os parâmetros são *Temperature* (Temperatura), um vetor com valores que aumentam da esquerda para da direita e representam a temperatura da malha, *Load at base gear* (Carga na engrenagem base), um vetor com valores que aumentam da esquerda para da direita e representam a carga na engrenagem base (*B*), veja **Figura 6.80**.

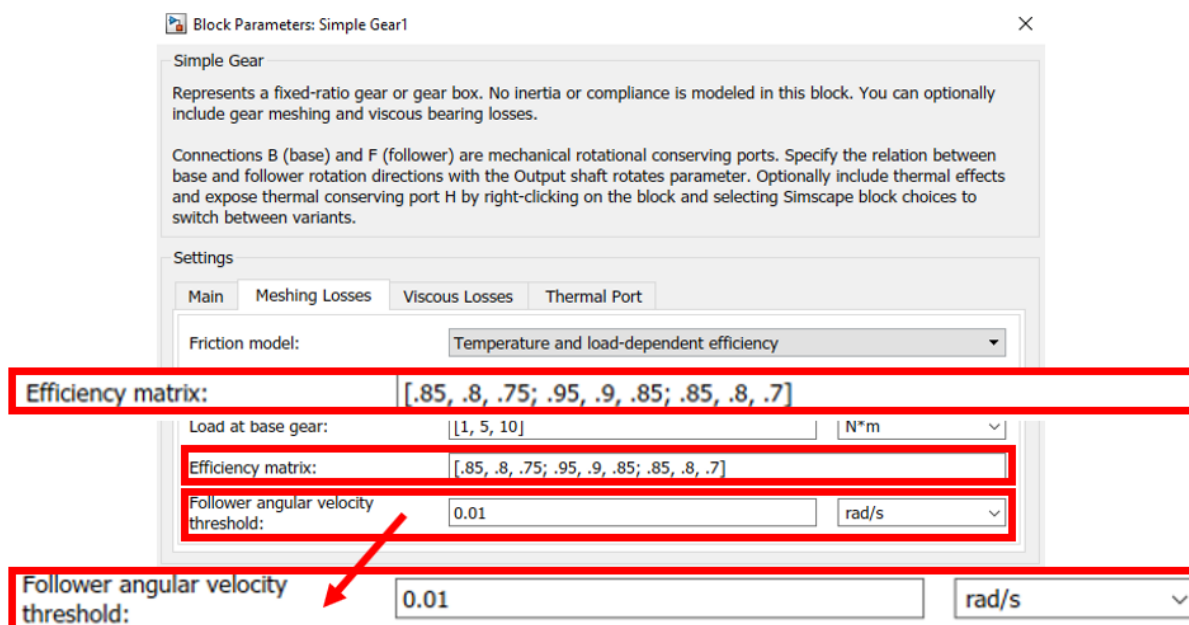
Figura 6.80: Parametrização da temperatura e da carga na engrenagem base.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Follower angular velocity threshold (Limiar de velocidade angular do seguidor) é o parâmetro que define o valor da velocidade angular do eixo seguidor acima do qual o fator de eficiência é integralmente aplicado, abaixo deste valor, o fator de eficiência é amortecido para um. Em *Efficiency matrix* (Matriz de eficiência) os valores de coeficiente de eficiência referentes a cada combinação de temperatura e carga são inseridos em forma de vetor, veja **Figura 6.81**.

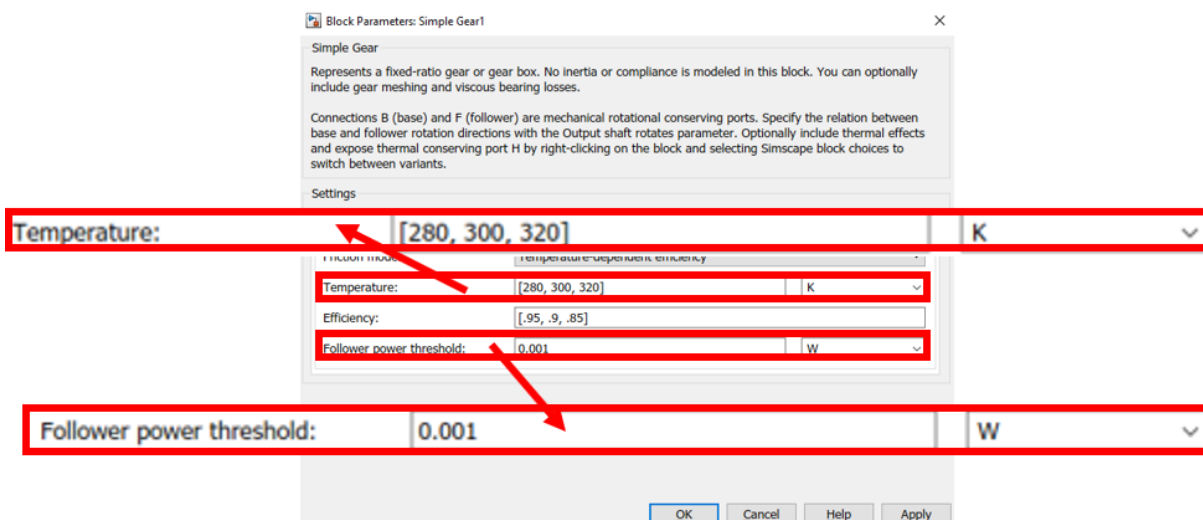
Figura 6.81: Parametrização do limiar de velocidade angular do seguidor e fatores de eficiência.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Outra maneira de parametrizar as perdas da malha é por *Temperature-dependent efficiency* (Eficiência dependente da temperatura), nesta opção a eficiência da malha varia em função da temperatura. Os parâmetros a serem configurados são *Temperature* (Temperatura), que funciona da mesma maneira que o parâmetro *Temperature* previamente abordado, *Follower power threshold* (Limiar de potência do seguidor), valor de potência no eixo seguidor (*F*) acima do qual o fator de eficiência é integralmente aplicado, abaixo desse valor o fator de eficiência é amortecido para um seguindo uma função tangente hiperbólica, veja **Figura 6.82**.

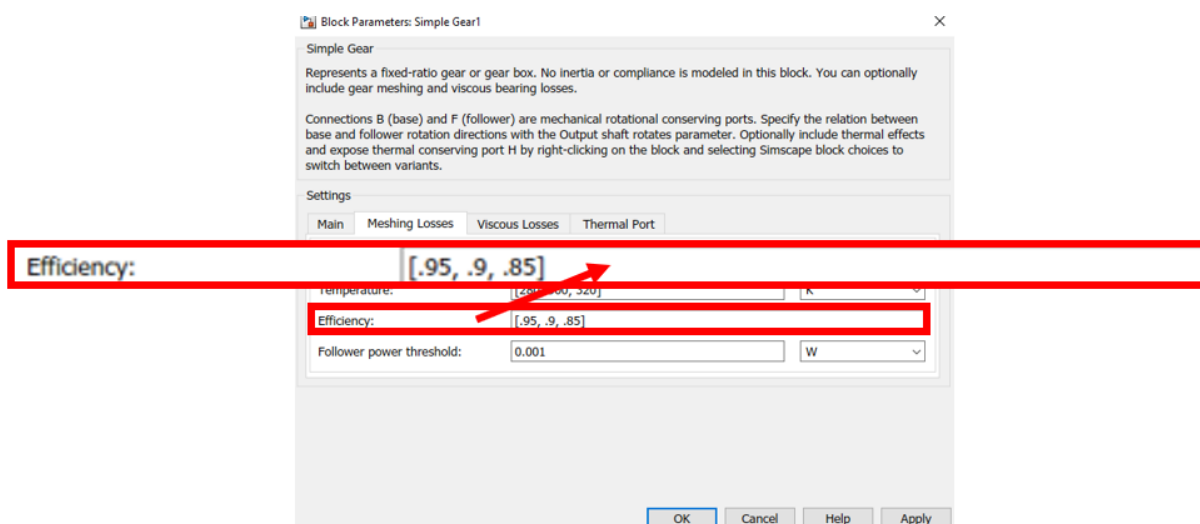
Figura 6.82: Parametrização da temperatura e do limiar de velocidade.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Outro parâmetro dessa opção é *Efficiency* (Eficiência) onde é introduzido um vetor de eficiências. A combinação do vetor eficiência com o vetor temperatura é usado para descrever o comportamento da eficiência em função da temperatura, veja **Figura 6.83**.

Figura 6.83: Parametrização do vetor de eficiências do modelo.



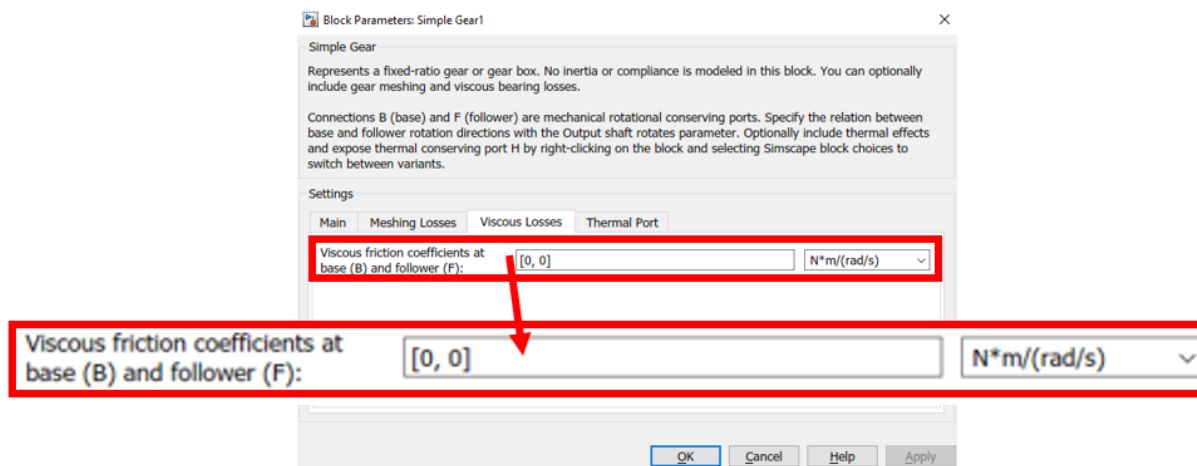
Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.8.2. Perdas por atrito viscoso

O único parâmetro encontrado na aba *Viscous Losses* (Perdas por viscosidade) é

Viscous friction coefficients at base (B) and follower (F) (Coeficiente de atrito na base (B) e no seguidor (F)) onde um vetor com dois elementos é introduzido. O primeiro elemento é o coeficiente de atrito da engrenagem base (B) e o segundo é o coeficiente de atrito da engrenagem seguidora (F), veja **Figura 6.84**.

Figura 6.84: Parametrização da perda por atrito viscoso.

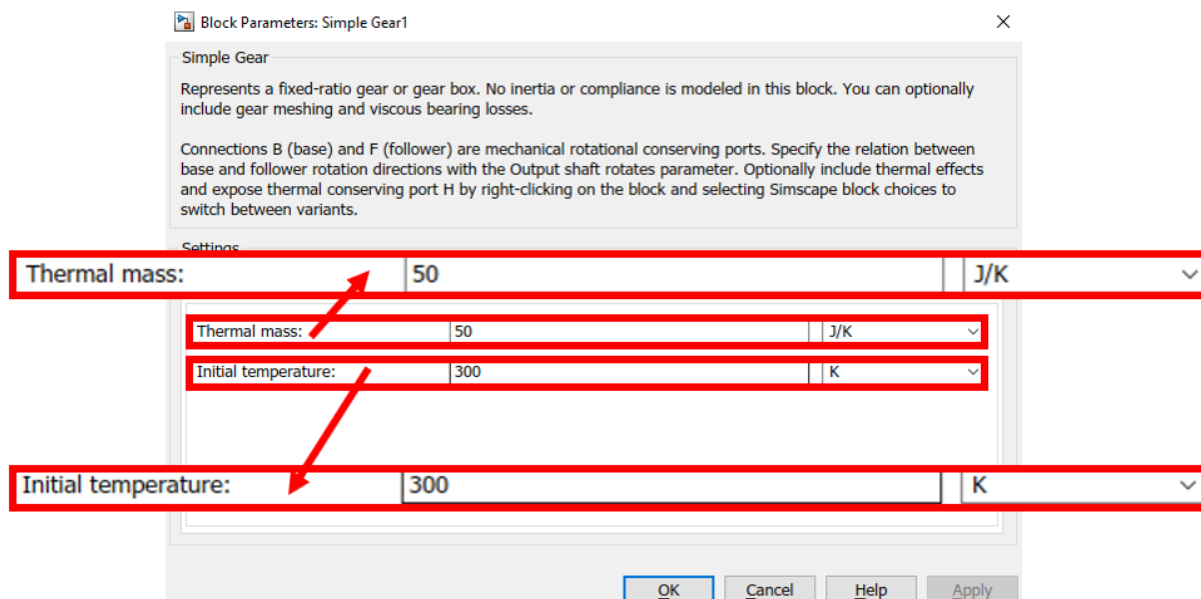


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.8.3. Porta Térmica

A aba *Thermal Port* (Porta térmica) apenas aparece quanto a opção *Show thermal port* (Mostre porta térmica) é habilitada. Os parâmetros dessa opção são *Thermal mass* (Massa térmica), energia térmica necessária para alterar a temperatura do corpo em um único grau, e *Initial temperature* (Temperatura inicial), temperatura do componente no início da simulação, veja **Figura 6.85**.

Figura 6.85: Parametrização da massa térmica e da temperatura inicial do modelo.

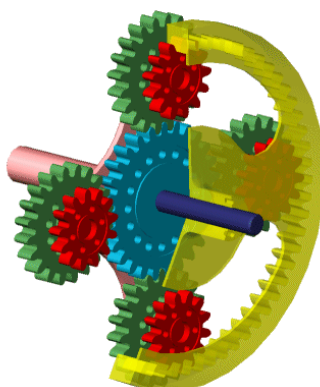


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.9. Engrenagem planetária composta

O bloco *Compound Planetary Gear* (Engrenagem planetária composta) representa uma cadeia de engrenagens planetárias. Cada engrenagem planetária composta é modelada como um par de engrenagens, de diferentes raios, rigidamente conectadas. Uma das engrenagens engata na engrenagem solar, enquanto a outra na coroa externa, veja **Figura 6.86**.

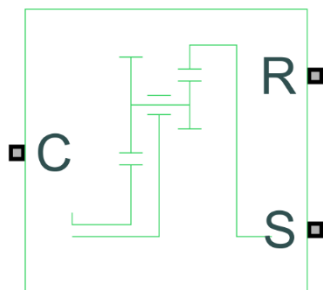
Figura 6.86: Modelo de engrenagem planetária composta.



Fonte: (MATLAB, 2010).

O bloco que contem tal modelo pode ser visto logo abaixo, veja **Figura 6.87**.

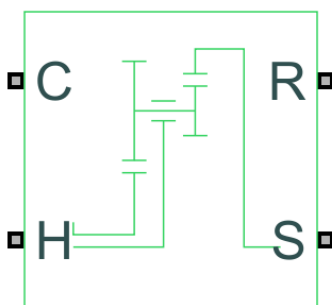
Figura 6.87: Bloco Compound Planetary Gear.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Semelhantemente ao bloco *Simple Gear*, é possível habilitar uma *Thermal Port* para que as considerações térmicas sejam incluídas no modelo, veja **Figura 6.88**.

Figura 6.88: Bloco Compound Planetary Gear com Thermal Port.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A porta (*C*) representa o suporte da engrenagem planetária, a porta (*R*) representa a conexão a coroa da engrenagem composta, a porta (*S*) representa a conexão a engrenagem solar e a porta (*H*) é a entrada para o modelo térmico. Todos os parâmetros desse bloco foram mantidos como padrão.

A relação de engrenagem anelar-orbital é dada pela equação (6.18).

$$g_{AP} = \frac{r_A}{r_{P2}} = \frac{N_A}{N_{P2}} \quad (6.18)$$

Onde,

- g_{AP} – Relação engrenagem anelar-orbital;
- r_A – Raio da engrenagem anelar;
- r_{P2} – Raio da engrenagem orbital;
- N_A – Número de dentes da engrenagem anelar;
- N_{P2} – Número de dentes da engrenagem orbital.

Analogamente, a relação de engrenagem orbital-solar é dada pela expressão (6.19).

$$g_{PS} = \frac{r_{P1}}{r_S} = \frac{N_S}{N_{P1}} \quad (6.19)$$

Onde,

- g_{PS} – Relação engrenagem orbital-solar;
- r_S – Raio da engrenagem solar;
- r_{P1} – Raio da engrenagem orbital;
- N_S – Número de dentes da engrenagem solar;
- N_{P1} – Número de dentes da engrenagem orbital.

Esse modelo de engrenagem composta impõe duas restrições cinemáticas e duas restrições geométricas nos três eixos conectados e na engrenagem orbital, veja (6.20).

$$\begin{cases} r_C \omega_C = r_S \omega_S + r_{P1} \omega_P; & \text{onde } r_C = r_S + r_{P1} \\ r_A \omega_A = r_C \omega_C + r_{P2} \omega_P; & \text{onde } r_A = r_C + r_{P2} \end{cases} \quad (6.20)$$

Onde,

- ω_S – Velocidade angular da engrenagem solar;
- ω_P – Velocidade angular da engrenagem orbital;
- ω_A – Velocidade angular da engrenagem anelar;
- ω_C – Velocidade angular da engrenagem composta;
- r_C – Raio da engrenagem composta.

Com essas restrições os quatro graus de liberdade se reduzem a dois graus de liberdade independentes.

A seguir, o modelo da engrenagem planetária é rearranjado em termos das entradas e saídas de cada porta para facilitar a visualização dos resultados.

Isolando r_{p1} na Equação (6.19) e substituindo no sistema de equações (6.20) obtemos:

$$\begin{cases} r_C \omega_C = r_S \omega_S + r_S g_{PS} \omega_P; & \text{onde } r_C = r_S \cdot (1 + g_{PS}) \\ r_A \omega_A = r_C \omega_C + r_{P2} \omega_P; & \text{onde } r_A = r_C + r_{P2} \end{cases} \quad (6.21)$$

Substituindo o valor de r_C na primeira equação do sistema acima obtemos que:

$$\begin{cases} (1 + g_{PS}) \omega_C = \omega_S + g_{PS} \omega_P; \\ r_A \omega_A = r_C \omega_C + r_{P2} \omega_P; & \text{onde } r_A = r_C + r_{P2} \end{cases} \quad (6.22)$$

Semelhantemente ao realizado com r_{p1} , r_{p2} é isolado na Equação (6.18) e substituído no sistema (6.22), desta maneira:

$$\begin{cases} (1 + g_{PS})\omega_C = \omega_S + g_{PS}\omega_P; \\ r_A\omega_A = r_C\omega_C + \frac{r_R}{g_{AP}}\omega_P; \text{ onde } r_C = r_R \cdot \left(1 - \frac{1}{g_{AP}}\right) \end{cases} \quad (6.23)$$

Note que por conveniência o termo r_C foi isolado para que agora possa ser substituído nas demais equações. O resultado pode ser visto abaixo.

$$\begin{cases} (1 + g_{PS})\omega_C = \omega_S + g_{PS}\omega_P \\ (1 - g_{AP})\omega_C = \omega_P - g_{AP}\omega_A \end{cases} \quad (6.24)$$

Com o sistema de equações obtidos, isolando ω_P em uma equação e substituindo na outra obtém-se:

$$(1 + g_{PS})\omega_C = \omega_S + g_{PS}[g_{AP}\omega_A - (g_{AP} - 1)\omega_C] \quad (6.25)$$

Isolando ω_C chega-se a uma expressão que relaciona diretamente as entradas e saídas do bloco, veja a Equação (6.26).

$$\omega_C = \frac{1}{g_{PS} \cdot g_{AP} + 1} \omega_S + \frac{g_{PS} \cdot g_{AP}}{g_{AP} \cdot g_{PS} + 1} \omega_R \quad (6.26)$$

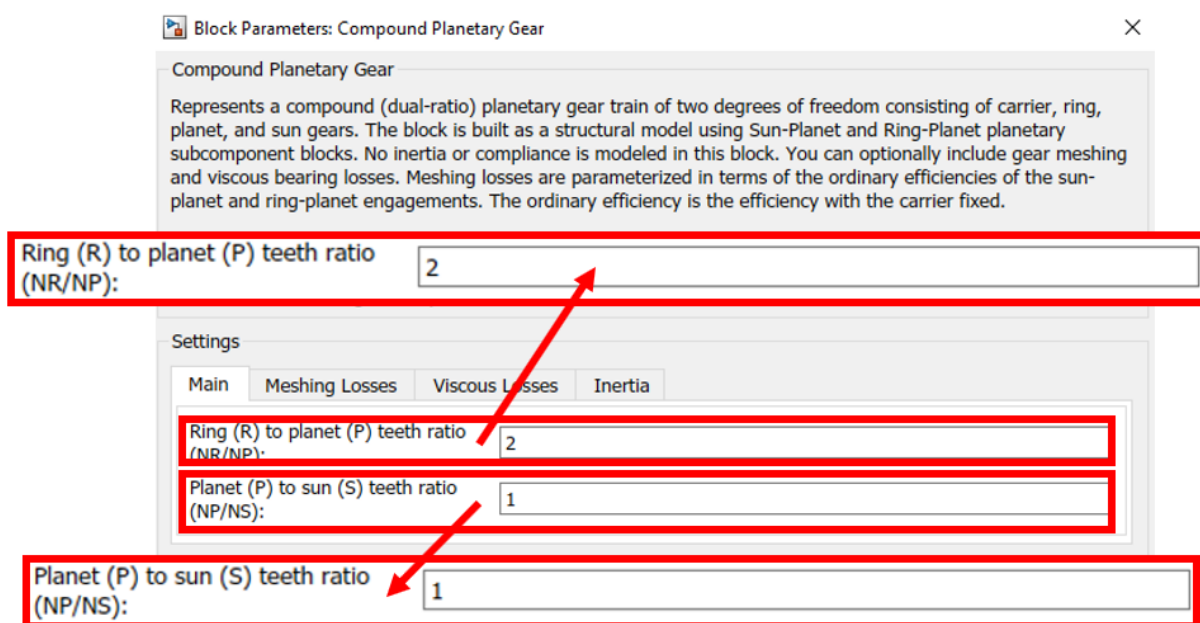
Comparando o Equação (5.3) com a Equação (6.26) é possível perceber que são equações análogas. Fazendo $\omega_C = \omega_{out}$, $\omega_S = \omega_{int1}$ e $\omega_R = \omega_{int2}$ as constantes do modelo ficam definidas como $k_1 = \frac{1}{g_{PS} \cdot g_{AP} + 1}$ e $k_2 = \frac{g_{PS} \cdot g_{AP}}{g_{AP} \cdot g_{PS} + 1}$.

Essa relação demonstra a aplicabilidade da engrenagem planetária como o elemento responsável pelo acoplamento entre diferentes fontes de propulsão.

6.9.1. Principal

A aba *Main* (Principal) é a primeira a aparecer na caixa de configurações do bloco. Os parâmetros a serem configurados são *Ring (R) planet (P) teeth ratio (NR/NP)* (Relação de dentes do anelar (R) para o orbital (P) (NR/NP)) onde a relação de transmissão g_{AP} é fixada. O outro parâmetro é *Planet (P) to sun (S) teeth ratio (NP/NS)* (Relação de dentes do orbital (S) para o solar (S) (NP/NS)) onde a relação de transmissão g_{PS} é fixada, veja **Figura 6.89**.

Figura 6.89: Configuração da relação de transmissão.

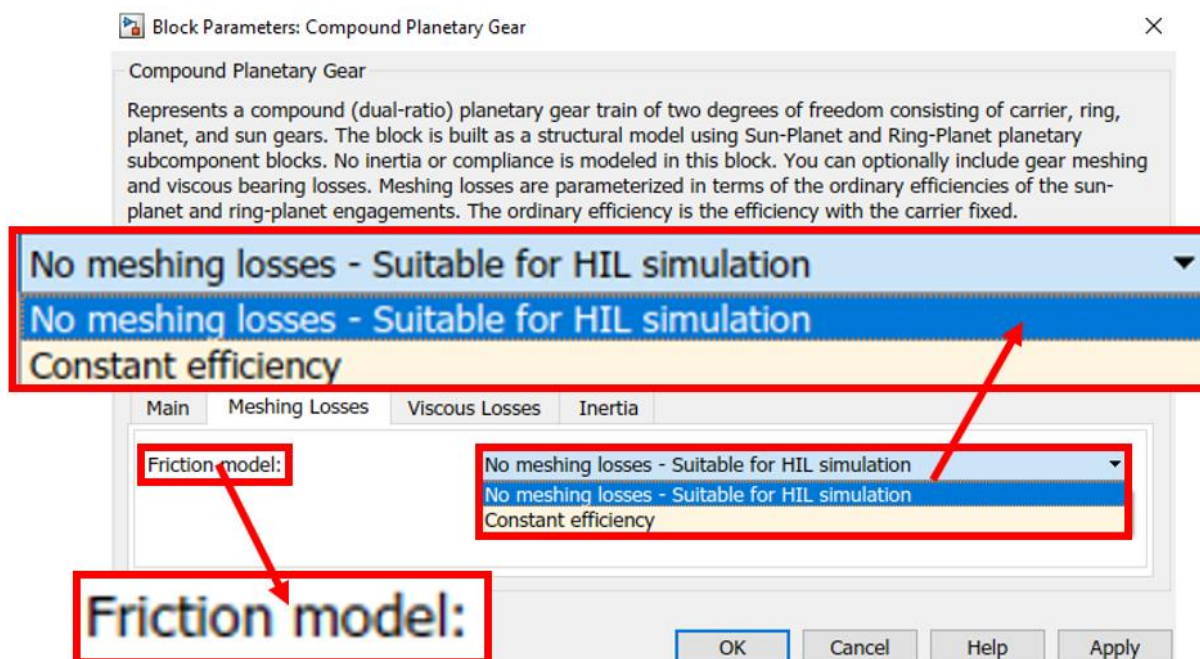


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.9.2. Perdas de malha

Quando a *Thermal Port* não está habilitada existem dois modelos de perda que podem ser escolhidos na opção *Fiction Model* (Modelo de fricção), veja **Figura 6.90**.

Figura 6.90: Modelos de perda por fricção com a Thermal Port desabilitada.

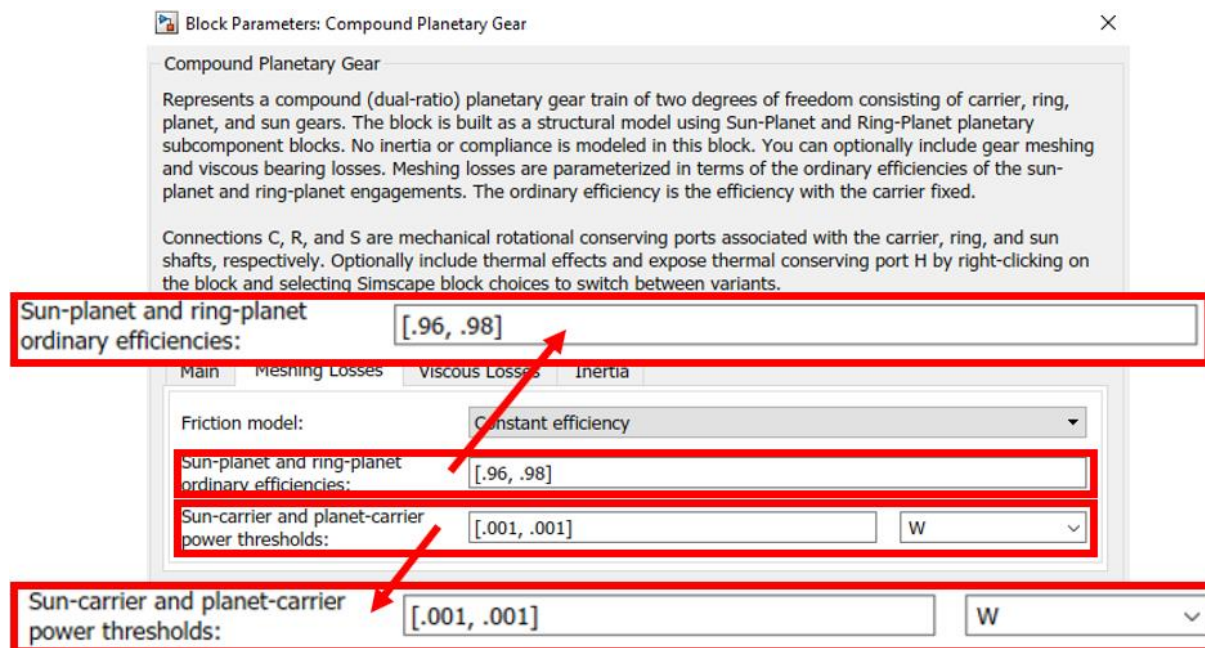


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Em *No meshing losses – Suitable for HIL simulation* (Sem perdas de malha – Adequado para simulações HIL) não são computadas perdas de malha e não há outros valores para serem parametrizados.

Em *Constant efficiency* (Eficiência constate) um vetor contendo a eficiência da transmissão solar-orbital e eficiência anelar-orbital deve ser inserido em *Sun-planet and ring-planet ordinary efficiencies* (Eficiência ordinária solar-orbital e anelar-orbital), outra configuração desse modelo é *Sun-carrier and planet-carrier power thresholds* (Limiar de potência do eixo engrenagem solar e eixo engrenagem orbital) onde um vetor com dois valores define à partir de qual potência a eficiência será integralmente aplicada. Abaixo desses limiares, as eficiências são amortecidas para o valor unitário, seguindo uma função tangente hiperbólico, veja **Figura 6.91**.

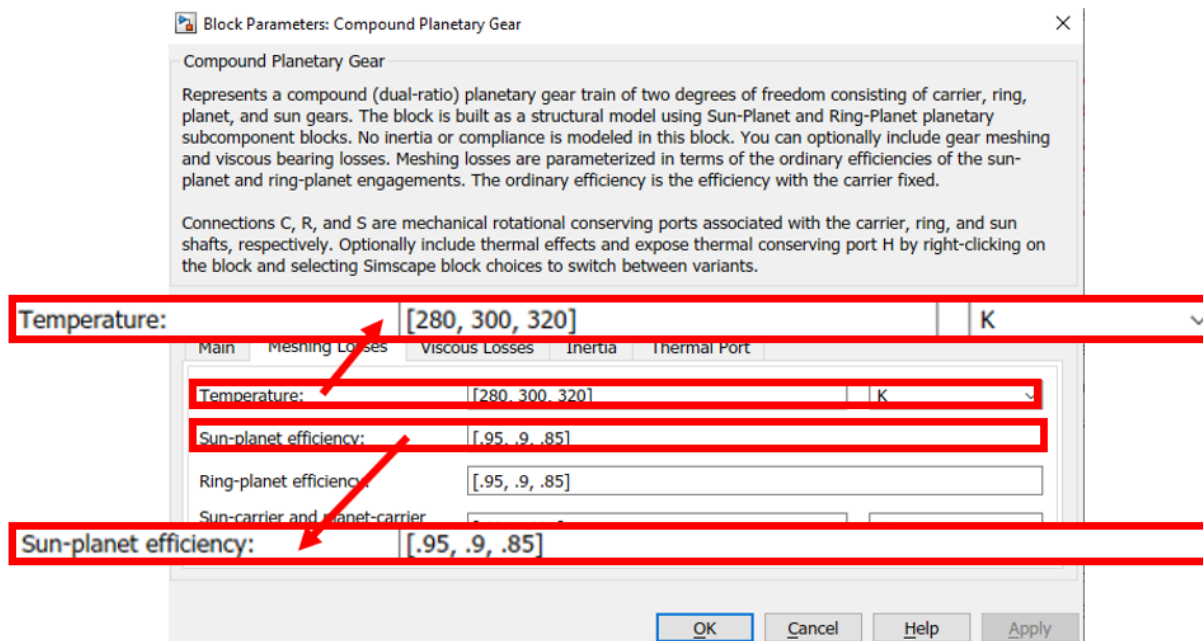
Figura 6.91: Parametrização das perdas de malha com perdas constantes.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Quando a *Thermal Port* está habilitada, não há modelos para escolher. Os parâmetros a serem configurados são *Temperature* (Temperatura), vetor de temperaturas crescentes de mesmo tamanho do vetor eficiência, *Sun-planet efficiency* (Eficiência solar-orbital), vetor de eficiências mecânicas com a energia fluindo da engrenagem solar para a engrenagens orbitais para cada temperatura, veja **Figura 6.92**.

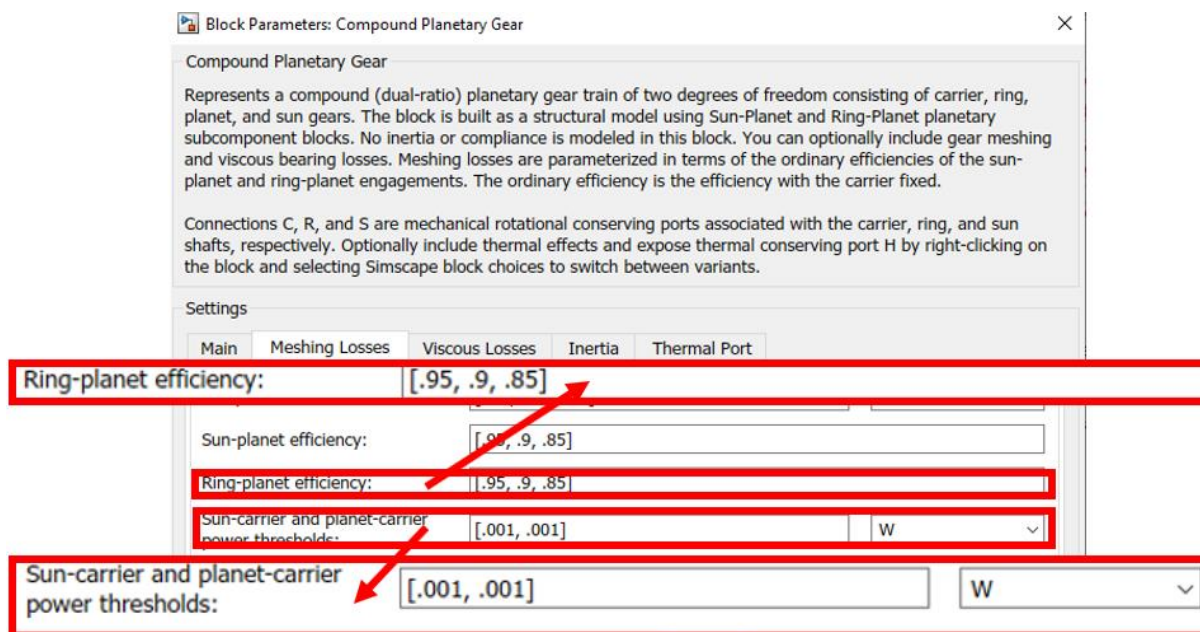
Figura 6.92: Configuração dos vetores de temperatura e eficiência solar-orbital.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ring-planet efficiency (Eficiência anelar-orbital), vetor de eficiências mecânicas com a energia fluindo da engrenagem anelar para as engrenagens orbitais para cada temperatura, *Sun-carrier and planet-carrier power threshold* (Limiar de potência do eixo da engrenagem solar e do eixo da engrenagem orbital) é um vetor com limiares acima dos quais os fatores de eficiência são aplicados integralmente, abaixo desses valores ao vetor eficiência é amortecido para o valor unitário, veja **Figura 6.93**.

Figura 6.93: Parametrização do vetor de eficiência anel-orbital e limiar de potência.

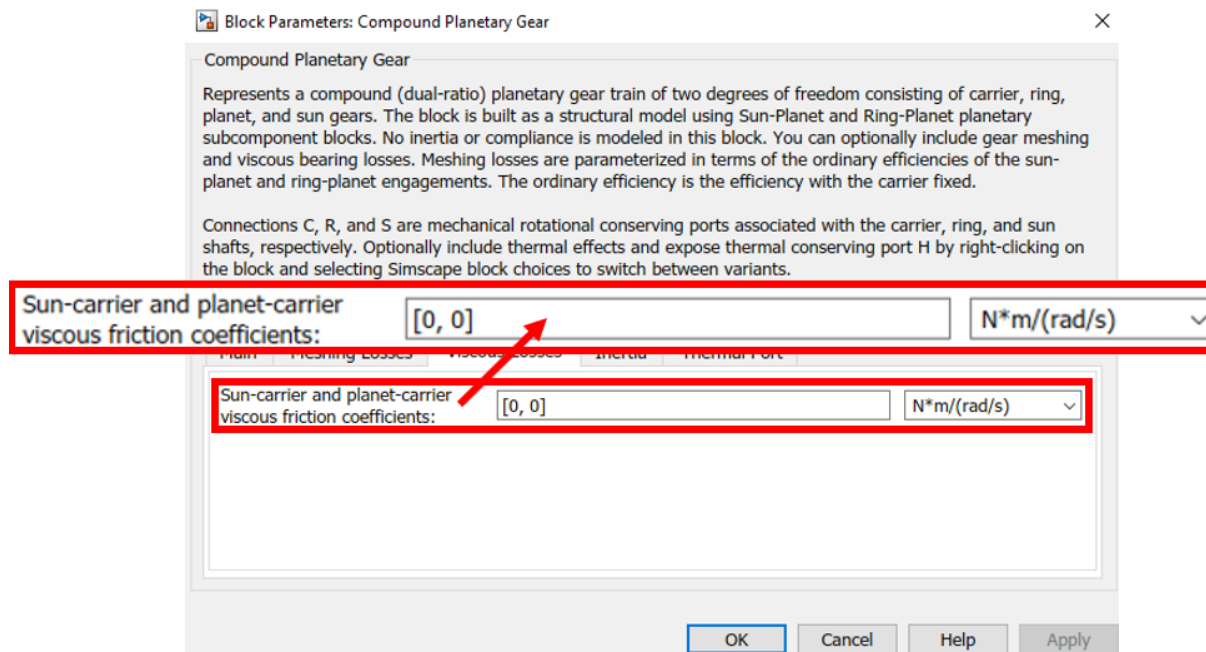


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.9.3. Perdas por viscosidade

Na aba *Viscous Losses* (Perdas por viscosidade) modela as perdas do atrito viscoso, o único parâmetro a ser configurado é *Sun-carrier and planet-carrier viscous friction coefficients* (Coeficientes de atrito viscoso eixo-solar e eixo-orbital) onde um vetor de duas dimensões com os coeficientes de atrito eixo-solar e eixo-orbital, respectivamente, são inseridos, veja **Figura 6.94**.

Figura 6.94: Parametrização das perdas por atrito viscoso.

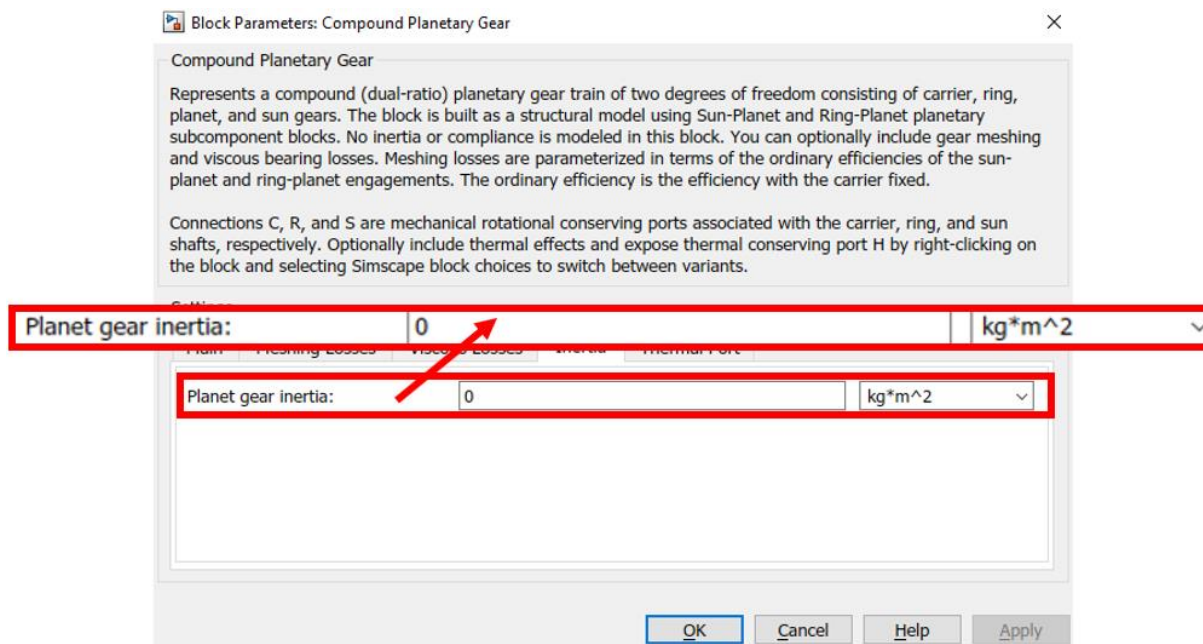


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.9.4. Inércia

Na aba *Inertia* (Inércia) o momento das engrenagens de inércia combinada das engrenagens orbitais é parametrizado. *Planet gear inertia* (Inércia da engrenagem orbital) é o único parâmetro dessa aba, veja **Figura 6.95**.

Figura 6.95: Parametrização da inércia das engrenagens orbitais.

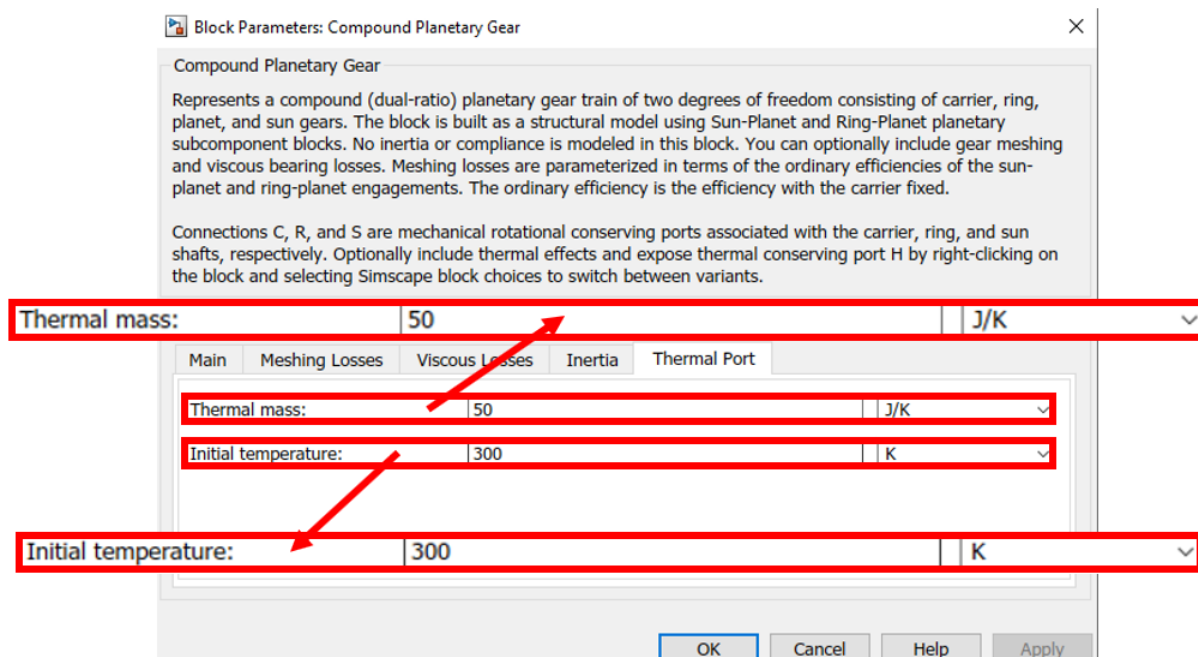


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.9.5. Porta térmica

Quando a *Thermal Port* está habilitada é necessário parametrizar a aba *Thermal Port*. O primeiro parâmetro a ser configurado é *Thermal mass* (Massa térmica) que é a energia térmica necessária para aumentar a temperatura do componente é único grau. O outro parâmetro é *Initial temperature* (Temperatura inicial) onde é inserida a temperatura do componente no início da simulação, veja **Figura 6.96**.

Figura 6.96: Parametrização da porta térmica.

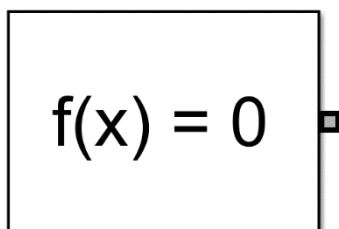


Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.10. Configurações de solucionador

Toda rede utilizando blocos *Simscape* conectados necessita de informação de configurações de solução para simulação. O bloco *Solver Configuration* (Configurações de solucionador) especifica os parâmetros de solução que o modelo precisa para que a simulação possa acontecer. Esse bloco possui uma única porta que pode ser conectada a qualquer parte de um sistema com blocos do *Simscape*, veja **Figura 6.97**.

Figura 6.97: Bloco Solver Configuration.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

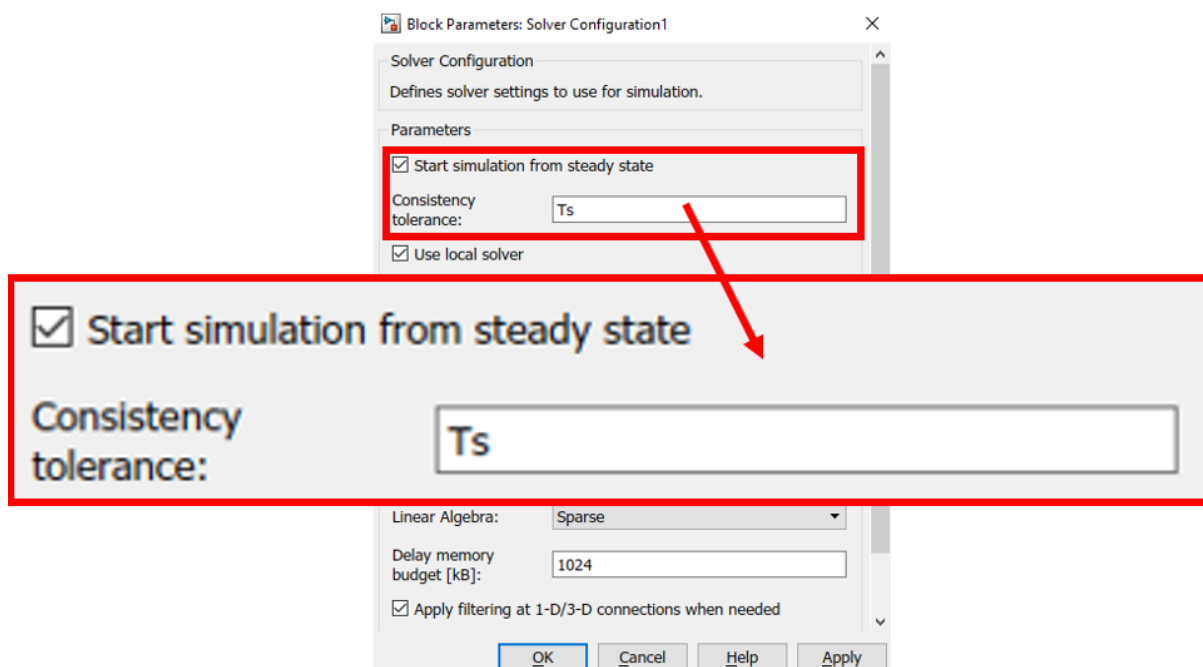
A caixa de configurações do bloco *Solver Configuration* possui uma única janela com todos os parâmetros configuráveis. Para adicionar um novo parâmetro de resolução basta

selecionar a caixa de solução ao lado do parâmetro desejado.

6.10.1. Parâmetros

O primeiro parâmetro é *Start simulation from steady state* (Começar a simulação a partir do estado estacionário). Quando selecionada o programa tenta encontrar o estado estacionário do sistema a partir do cálculo das condições iniciais para que a simulação possa ser iniciada a partir desse ponto, veja **Figura 6.98**.

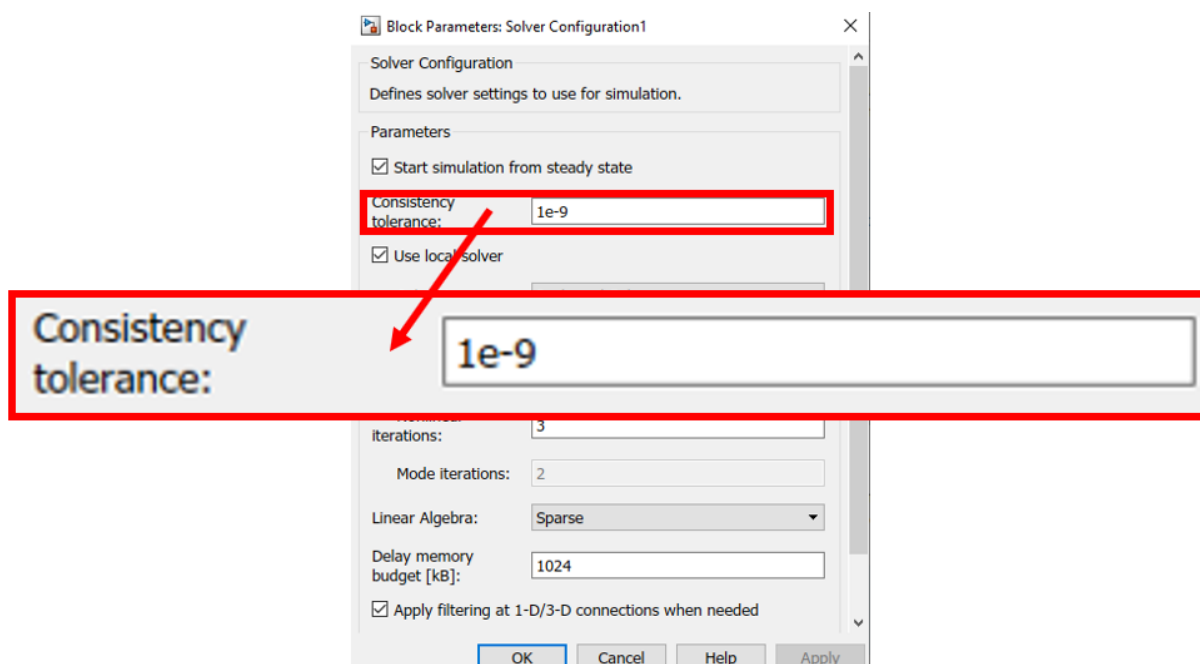
Figura 6.98: Parametrização do estado de início da simulação.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O parâmetro seguinte é *Consistency tolerance* (Tolerância de consistência) que determina com que precisão as restrições algébricas devem ser satisfeitas no início da simulação e após cada evento discreto. Baixa tolerância torna a simulação mais confiável, mas aumenta o esforço computacional e, em alguns casos, as condições iniciais podem não convergir, veja **Figura 6.99**.

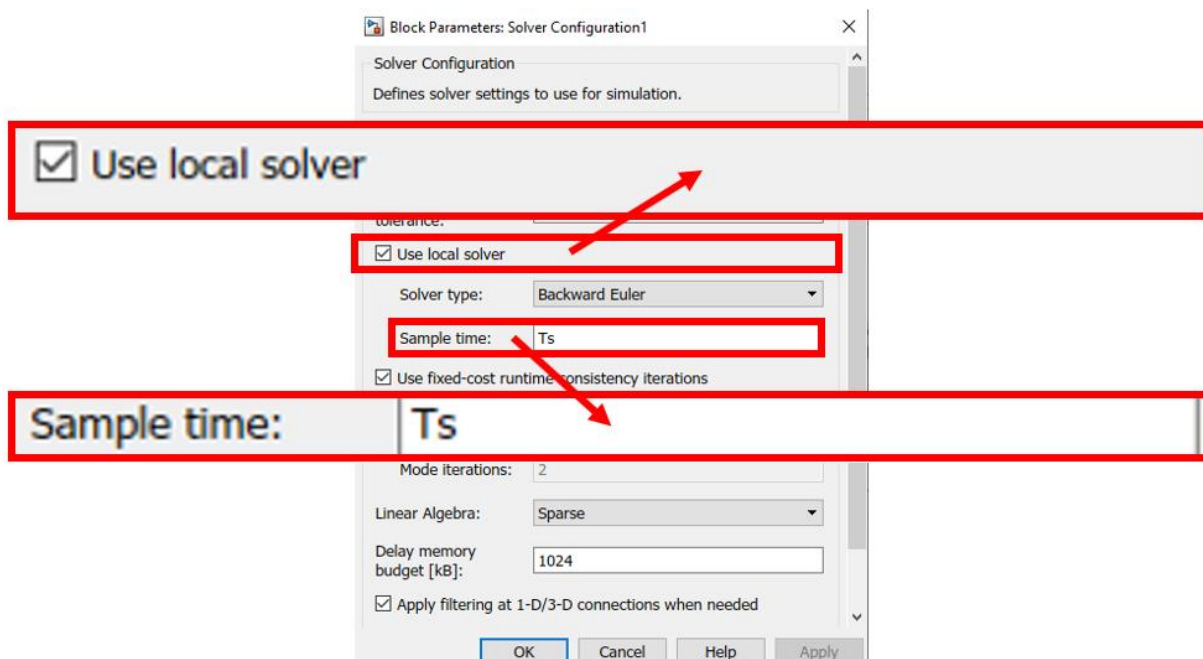
Figura 6.99: Parametrização da tolerância de consistência.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Posteriormente vem *Use local solver* (Use solucionador local) que permite conduzir a simulação utilizando o tempo de amostragem especificado no parâmetro *Sample Time* (Tempo de amostragem). Desta maneira todos os estados da rede *Simscape* são representados para o *Simulink* como estados discretos, veja **Figura 6.100**.

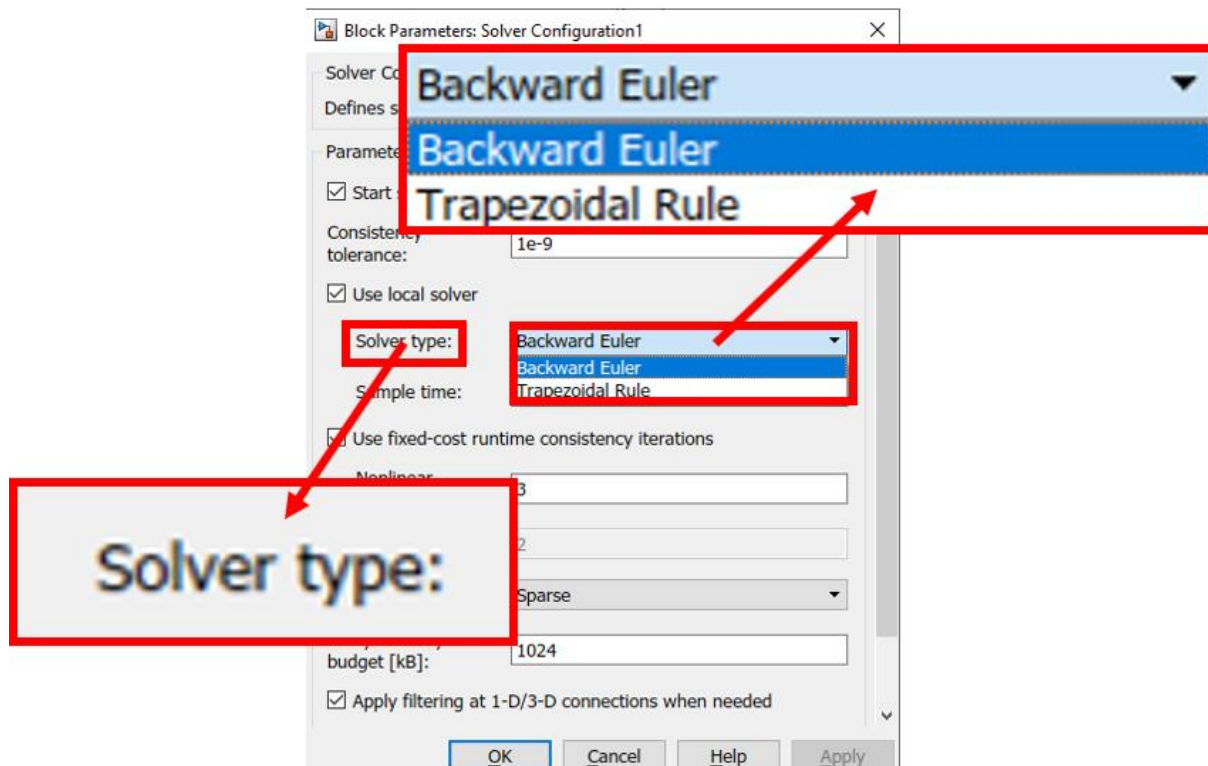
Figura 6.100: Parametrização do tempo de amostragem e do solucionador utilizado.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

No caso de uso de solucionador local, o tipo de solucionador usado para atualizar os estados pode ser selecionado em *Solver type* (Tipo de solucionador). Os solucionadores disponíveis são *Backward Euler* e *Trapezoidal Rule*, veja **Figura 6.101**.

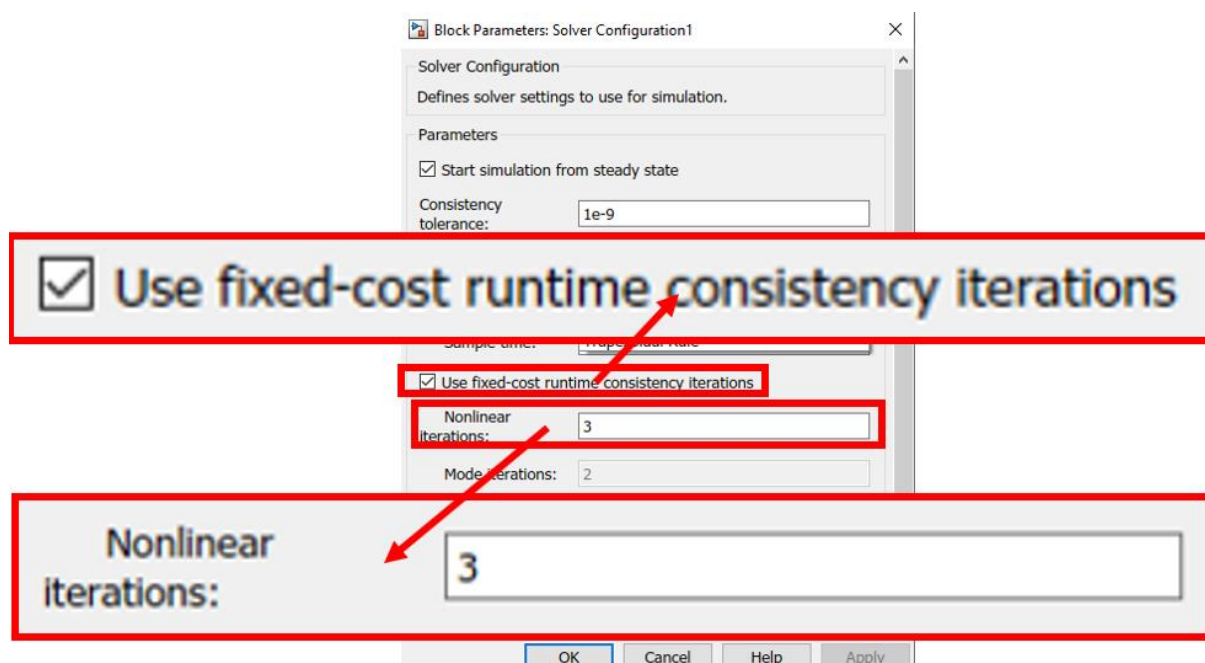
Figura 6.101: Parametrização do tipo de solucionador.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O próximo parâmetro é *Use fixed-cost consistency iterations* (Use interações de consistência de tempo de execução de custo fixo) que permite executar a inicialização transitória a um custo computacional fixo. Quando esta opção é selecionada é possível especificar o número máximo de interações não lineares para inicialização transitória em *Nonlinear iterations* (Interações não lineares). Caso esse número de interações seja atingido sem que o sistema convirja, a simulação passa para a próxima etapa. Caso *Use fixed-cost consistency iterations* não seja selecionada, o software usa um algoritmo mais robusto e computacionalmente mais caro. Nesse caso, se o sistema não convergir no momento da inicialização transitória um erro será apresentado, veja **Figura 6.102**.

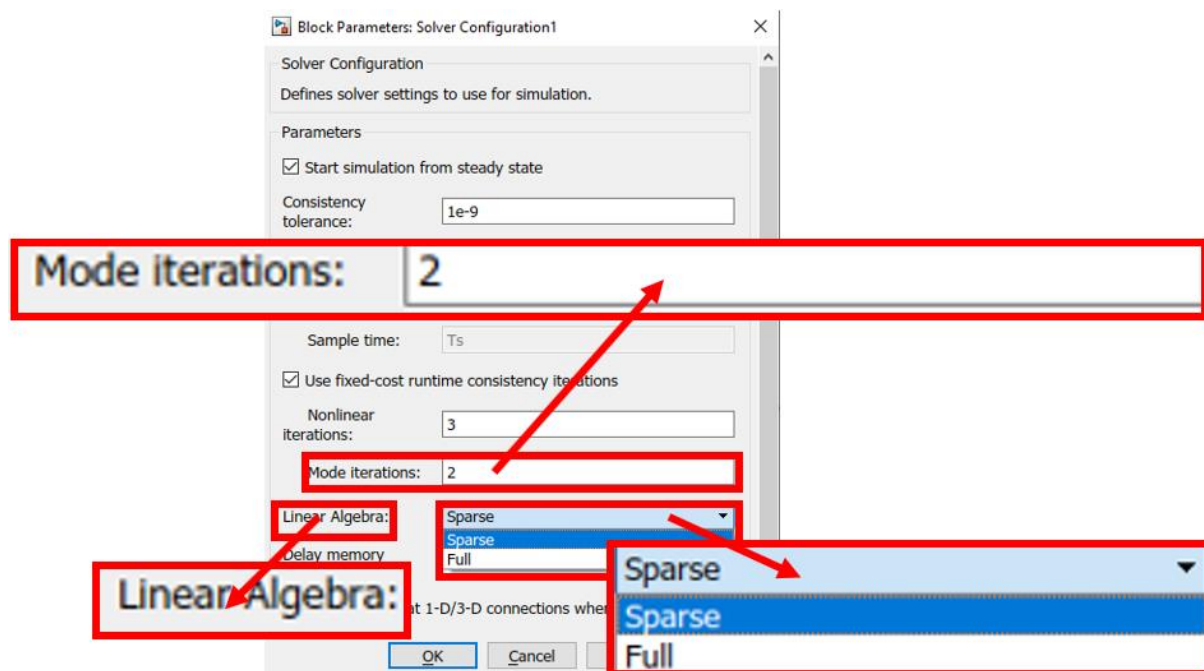
Figura 6.102: Parametrização da quantidade de interação não lineares e custo das interações.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Em seguida vem *Mode iterations* (Interações de modo) onde é especificada a quantidade máxima de interações de modo no momento da inicialização de transitório. Em *Linear Algebra* (Álgebra linear) define-se como as matrizes serão resolvidas na simulação, existem dois modelos, *Sparse* e *Full*, veja **Figura 6.103**.

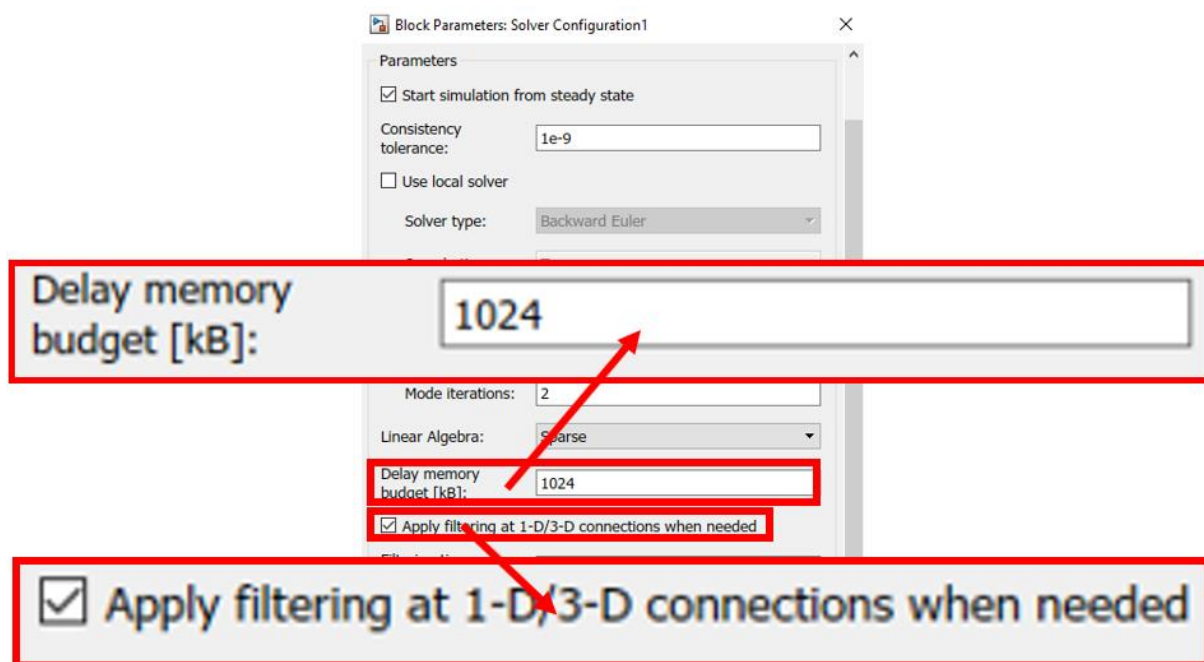
Figura 6.103: Parametrização da quantidade de interações de modulo e álgebra linear.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Também é possível parametrizar a quantidade de memória reservada para sinais com atraso em *Delay memory budget [kB]* (Montante de memória de atraso), a finalidade desse parâmetro é evitar uso excessivo de memória durante a simulação. É possível conectar blocos da biblioteca *Simscape Multibody* a blocos *Simscape* ou blocos de outros produtos complementares habilitando a opção *Apply filtering at 1D/3D connections when needed* (Aplique filtro a conexões 1D/3D quando necessário), veja **Figura 6.104**.

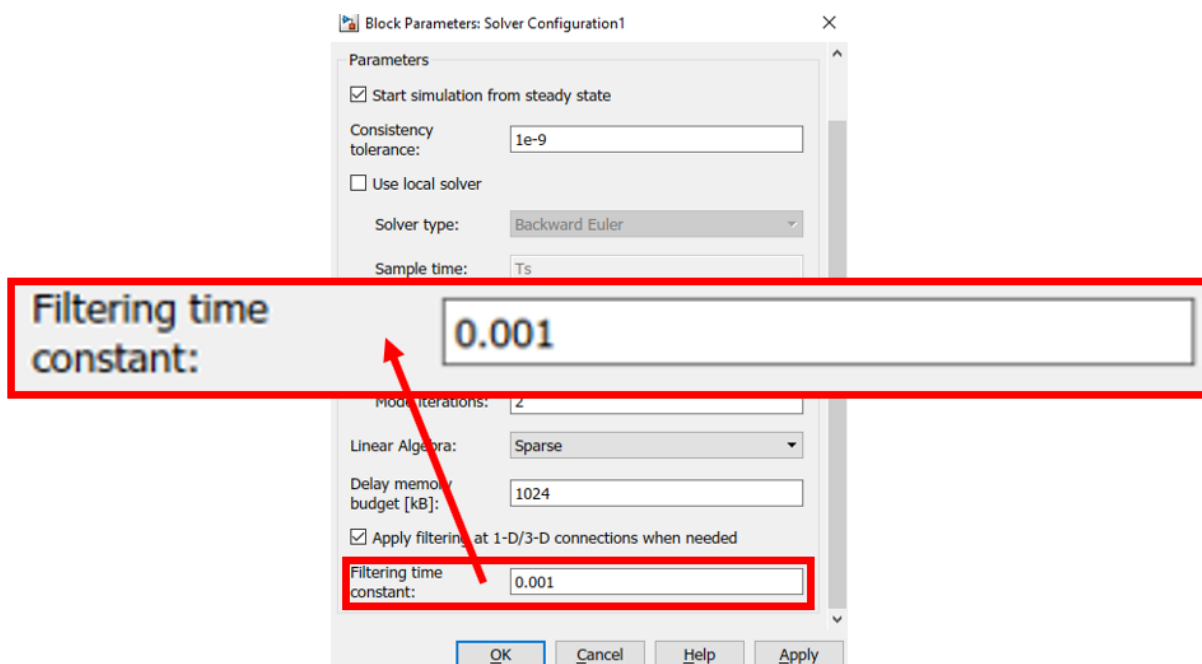
Figura 6.104: Parametrização da memória reservada para sinais em atraso e conexões 1D/3D entre



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Por fim, quando *Apply filtering at 1D/3D connections when needed* está habilitada uma constante de tempo de filtragem também deve ser parametrizada. Esse trabalho é realizado em *Filtering time constant* (Constante de tempo de filtragem), veja **Figura 6.105**.

Figura 6.105: Parametrização da constante de tempo do filtro 1D/3D.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

6.10.2. Variáveis da simulação

Ao longo da apresentação da configuração dos blocos utilizados no modelo é possível notar que muitos dos espaços destinados a valores numéricos foram preenchidos com variáveis. Este é um artifício facilita a redefinição dos parâmetros de interesse, pois todas as variáveis podem ser concentradas em um único arquivo. A **Tabela 6.2** apresenta os valores normalmente utilizados na simulação.

Tabela 6.2: Variáveis da simulação.

Variável	Valor	Unidade	Descrição
<i>rider_mass</i>	80	kg	Massa do condutor do veículo
<i>vehicle_mass</i>	237	kg	Massa do veículo
<i>CG_height</i>	254	mm	Altura do centro de massa do veículo
<i>drag_coeff</i>	1.2		Coefficiente de arraste
<i>front_axle</i>	1520	mm	Distância horizontal do eixo dianteiro ao centro de massa
<i>rear_axle</i>	1400	mm	Distância horizontal do eixo traseiro ao centro de massa
<i>front_area</i>	1.33	m ²	Área frontal do veículo
<i>tire_b</i>	10		Coefficiente b da fórmula mágica
<i>tire_c</i>	1.9		Coefficiente c da fórmula mágica
<i>tire_d</i>	1		Coefficiente d da fórmula mágica
<i>tire_e</i>	0.97		Coefficiente e da fórmula mágica
<i>tire_dia</i>	114.567	in	Diâmetro do pneu
<i>tire_inertia</i>	0.001	kg*m ²	Inércia do pneu
<i>roll_resist</i>	0.005		Resistência do pneu ao rolamento
<i>Ts</i>	0.00008	s	Período das amostras do sinal
<i>v0</i>	0	m/s	Velocidade inicial do veículo
<i>gear_ratio</i>	2.56		Relação

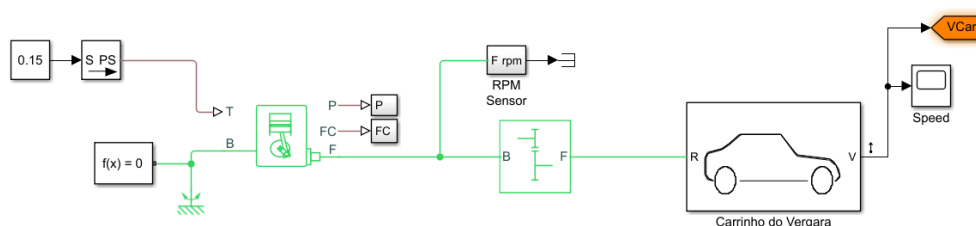
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Utilizou-se ponto como separador decimal na **Tabela 6.2** para evitar confusão, já que o separador decimal utilizado no *software* é o ponto. Sempre que o valor utilizado for diferente, a variável modificada será sinalizada. O *script* responsável por carregar os valores nas variáveis pode ser visto no **APÊNDICE D – SCRIPT** variáveis do modelo.

6.11. Resultados da Simulação

O sistema mecânico convencional acabou por ser modelado como pode ser visto logo a seguir, **Figura 6.106**.

Figura 6.106: Modelo transmissão convencional

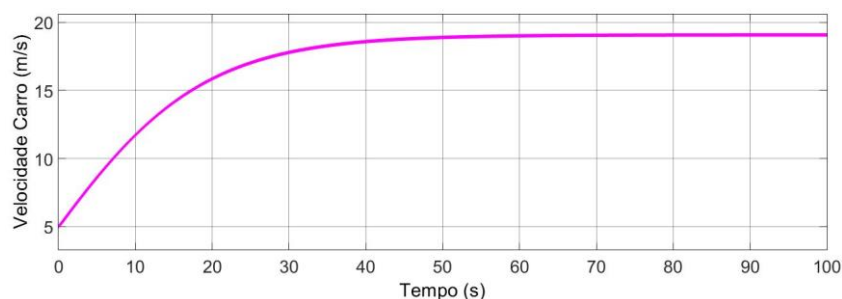


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Nota-se que o modelo de propulsão adotado utiliza apenas os blocos *Generic Engine* e *Simple Gear*. A carga é o subsistema *Modelo Carro* conforme o descrito no item 6.6 desse trabalho. Os blocos *Solver Configuration*, *Mechanical Rotational Reference* e *Constant* são necessários para simulação. Como o sinal do bloco *Constant* não é compatível com blocos *Simscape*, o bloco *Simulink PS Converter* realiza a adequação do sinal. Os demais blocos e subsistemas que podem ser vistos na **Figura 6.106** registram as variáveis de interesse.

Nesta configuração, a resposta de velocidade por tempo do veículo é dada por, veja **Figura 6.107**:

Figura 6.107: Partida do ICE para T de 0,20 e v_0 de 5 m/s.

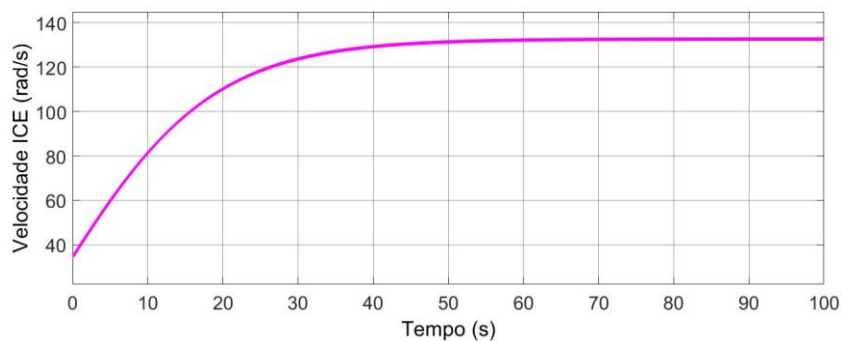


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A velocidade estabiliza por volta dos 40 s em 19,0 m/s, para uma entrada de aceleração normalizada de 0,20. Ao analisar a resposta em velocidade do sistema é possível visualizar que ela não possui atraso aparente, a velocidade não oscila no regime estacionário ou antes desse. Também é interessante notar que a velocidade máxima é alcançada no estado estacionário, não havendo picos de velocidade. O corpo do veículo é acelerado de maneira suave até um estado de velocidade constante.

A evolução da velocidade no eixo do ICE é muito parecida com o visto na **Figura 6.107**. A resposta demora 40 s para entrar no estado estacionário e a velocidade final é de 132,6 rad/s, veja **Figura 6.108**.

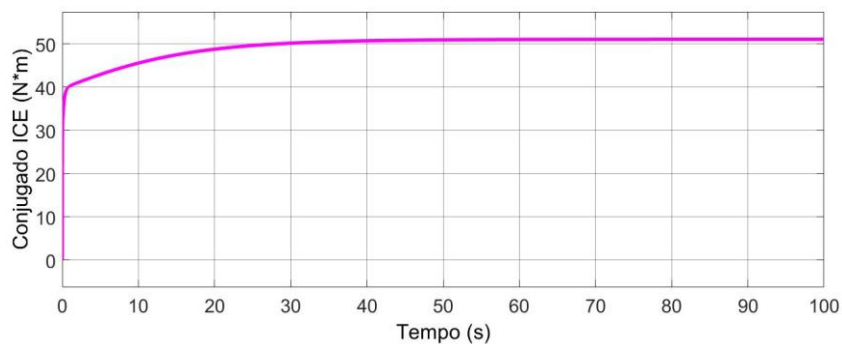
Figura 6.108: Velocidade angular ICE para T de 0,20 e v_0 de 5 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O conjugado do ICE nessas condições demora 30 s para obter estabilidade, o valor final fica 51,1 N·m como pode ser visto na **Figura 6.109** a seguir.

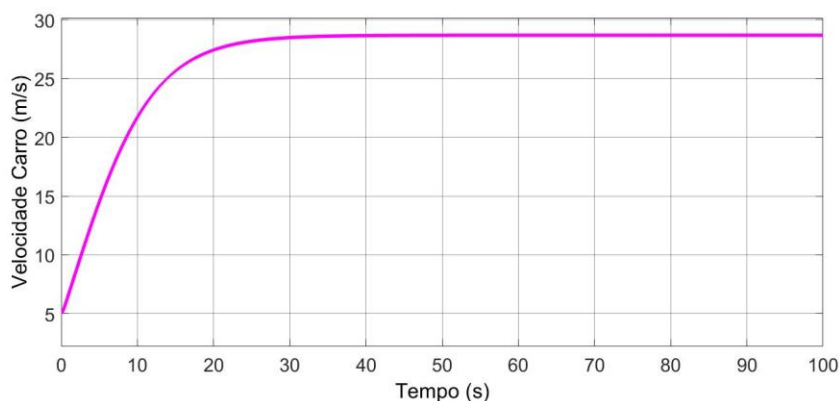
Figura 6.109: Conjugado ICE para T de 0,20.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Quando a aceleração normalizada é modificada, o formato da resposta de velocidade é mantido, mas a velocidade final aumenta enquanto o tempo necessário para alcançar a estabilidade diminui. Para uma aceleração normalizada de 0,50 a velocidade estável é 28,6 m/s por volta de 30 s, veja **Figura 6.110**.

Figura 6.110: Partida do ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.

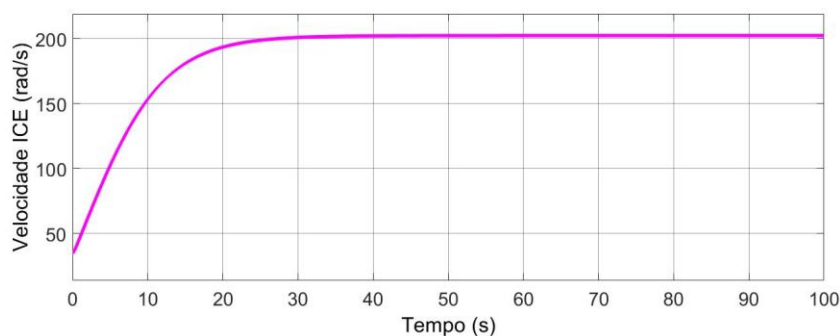


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Esse é o comportamento esperado para o modelo já que não foram introduzidas variações de relevo ou componentes mecânicos que justificassem oscilações na resposta.

Do ponto de vista da velocidade no eixo do ICE não existem muitas novidades. Com o aumento da aceleração normalizada, a velocidade angular evolui até ficar estável em 153,3 rad/s por volta de 30 s, veja **Figura 6.111**.

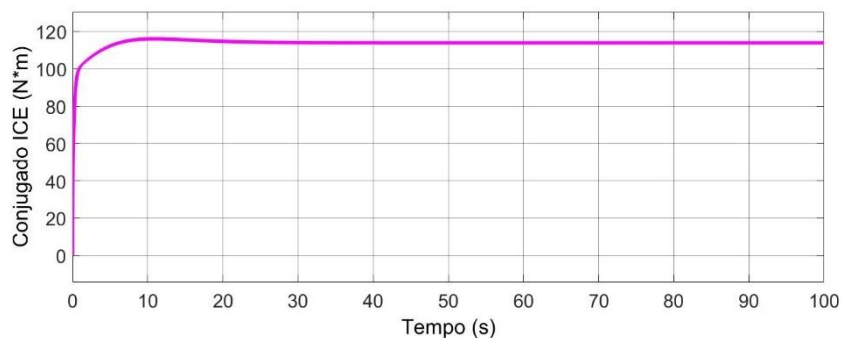
Figura 6.111: Velocidade angular ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Com o incremento da aceleração normalizada, o conjugado demandado do motor aumenta, dessa maneira a resposta em conjugado apresenta novo regime estável de 113,8 N·m demorando 20 s para alcançar esse estado. Também se nota um pico de 116,0 N·m nos primeiros 10 s da simulação, veja **Figura 6.112**.

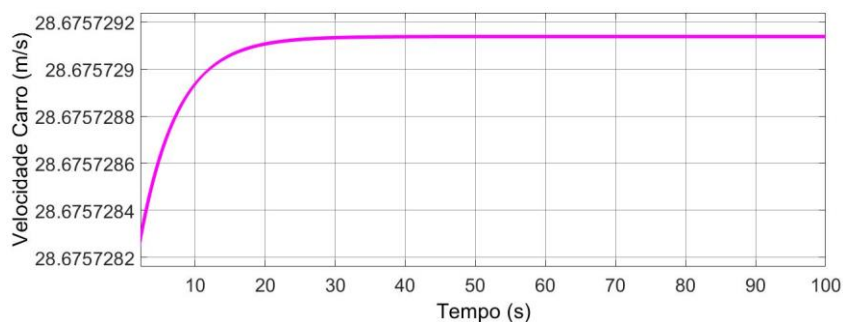
Figura 6.112: Conjugado ICE para T de 0,50.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Caso desejado, é possível iniciar a simulação com a velocidade no regime estacionário, esse assunto é abordado com mais detalhes em **6.10 Configurações de solucionador**, veja **Figura 6.113**.

Figura 6.113: Velocidade estacionária ICE para T de 0,50 e v_0 de 5m/s.

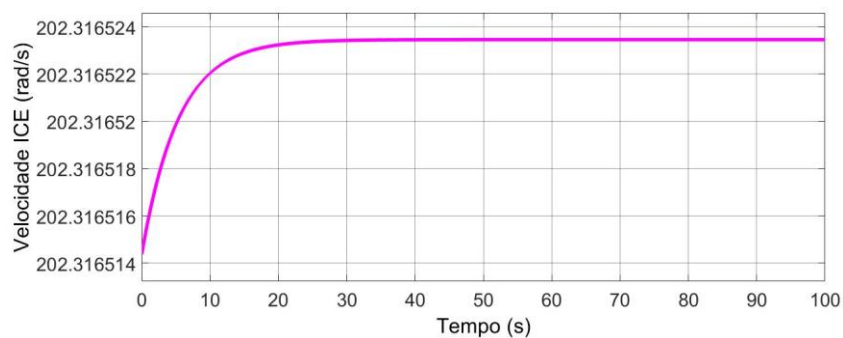


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ainda é possível observar um pequeno incremento de velocidade no regime estacionário de velocidade. Esse incremento se dá na sexta casa decimal, precisão considerada irrelevante para os fins desse trabalho.

O mesmo também acontece com a velocidade angular no eixo do motor, veja **Figura 6.114**.

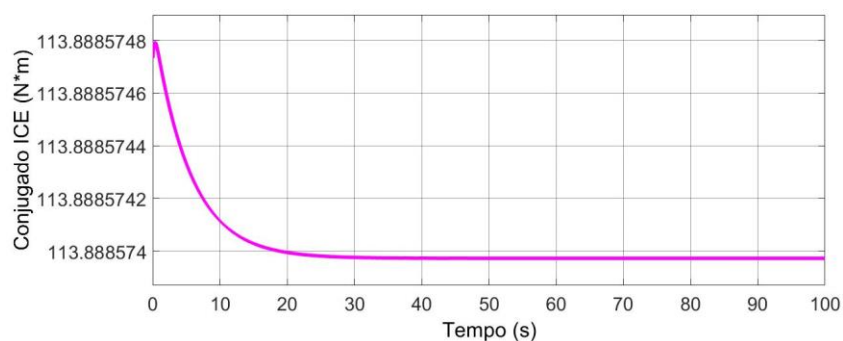
Figura 6.114: Velocidade angular estacionária ICE para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O conjugado também apresenta pequena variação como pode ser visto na **Figura 6.115**.

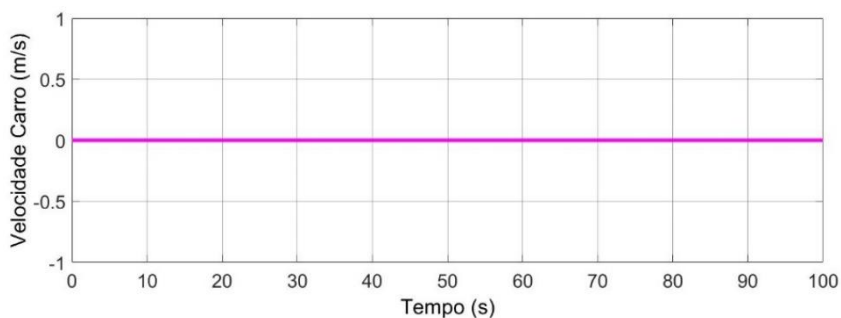
Figura 6.115: Conjugado estacionário ICE para T de 0,50.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como o ICE está acoplado as rodas, se o carro iniciar com velocidade zero, o ICE não produzirá conjugado, pois estará operando abaixo da velocidade mínima estipulada, como veremos na **Figura 6.116** a seguir.

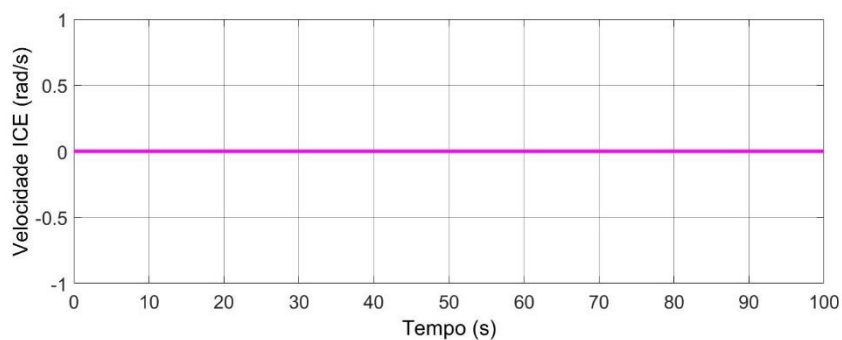
Figura 6.116: Partida do ICE para T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Assim como previsto o eixo do ICE não produz rotação, neste caso o motor atua como se estivesse travado, veja **Figura 6.117**.

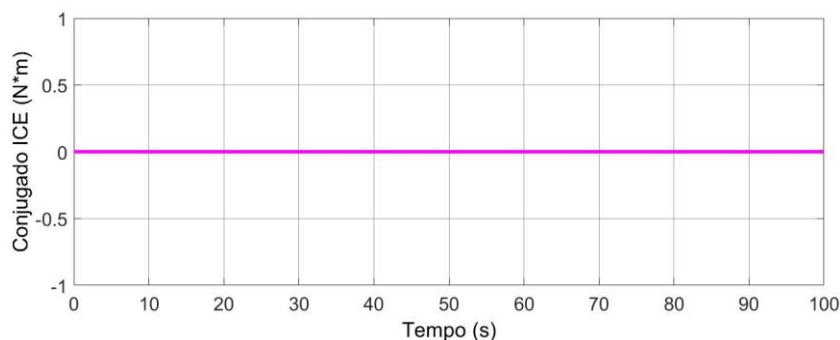
Figura 6.117: Velocidade angular ICE com T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Por fim, o ICE não produz conjugado, pois foi configurado para não o produzir quando a velocidade angular do motor estivesse abaixo de 500 rpm, veja **Figura 6.118**. É importante salientar que as velocidades angulares aqui apresentadas para o ICE são medidas após a caixa de engrenagens, sendo assim, para obter a velocidade angular diretamente no eixo do motor é necessária aplicar o valor a Equação (6.17).

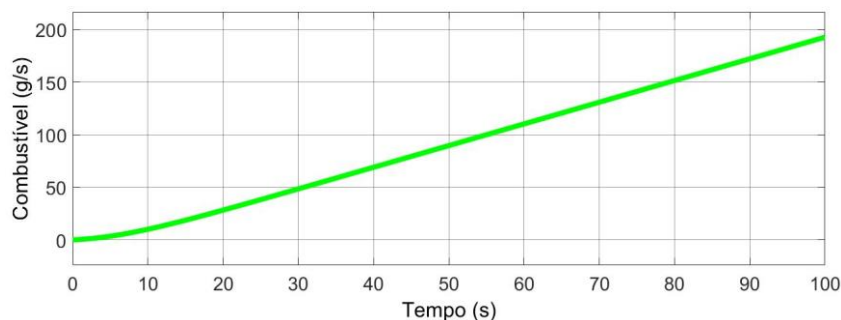
Figura 6.118: Conjugado ICE com T de 0,50 e v_0 de 0 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Agora vejamos o consumo de combustível. Neste caso o método para o cálculo do consumo de combustível é o padrão do bloco *Generic Engine*, em que uma constante, neste caso 25 mg/rev (miligramas por revolução), multiplica a quantidade de revoluções que o ICE em um dado período. Para o primeiro caso temos na **Figura 6.119** o seguinte.

Figura 6.119: Consumo de combustível para T de 0,50 e v_0 de 5 m/s



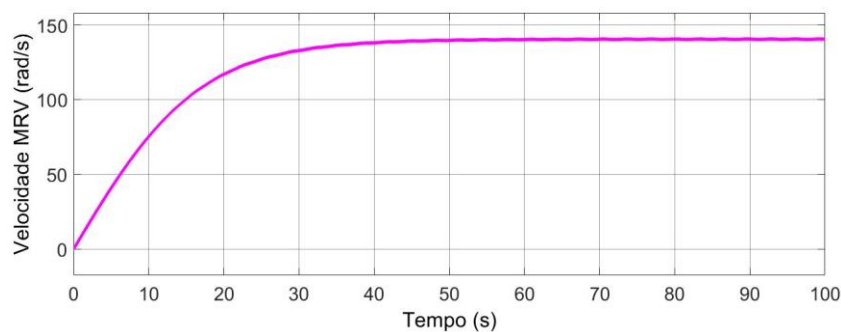
Fonte: (Elaborado pelo autor).

Sendo v_0 a velocidade inicial e T a aceleração normalizada. Observa-se que o consumo de combustível apresenta um comportamento hiperbólico no início da simulação, enquanto a velocidade aumenta, a partir de 30 s, quando a velocidade encontra o regime estacionário, o montante de combustível consumido passa a ter comportamento linear.

Como o modelo com fonte de propulsão tradicional aparenta um comportamento condizente com o esperado, o modelo de motor elétrico construído no Capítulo 4 foi acoplado a carga para que o comportamento pudesse ser observado.

Como a planta elétrica está ligada diretamente às rodas, a velocidade no eixo da MRV evolui de maneira muito parecida com a velocidade do veículo. Partido do repouso a máquina estabiliza em 140,1 rad/s por volta de 30 s, veja **Figura 6.122**.

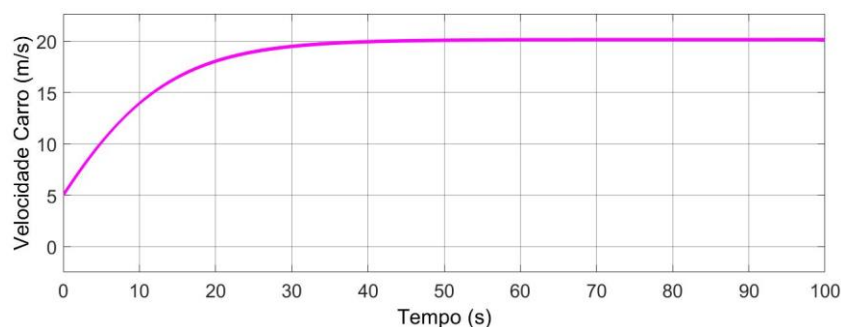
Figura 6.122: Velocidade angular MRV na topologia puramente elétrico com v_0 de 0 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Começando a simulação com velocidade inicial igual a 5 m/s é possível observar que diferentemente do que aconteceu com o ICE, não se observou alteração na velocidade final, que se manteve em 20,1 m/s, e o tempo necessário para atingir a velocidade estacionária diminuiu, mas ainda ficou próximo a 30 s, veja **Figura 6.123**.

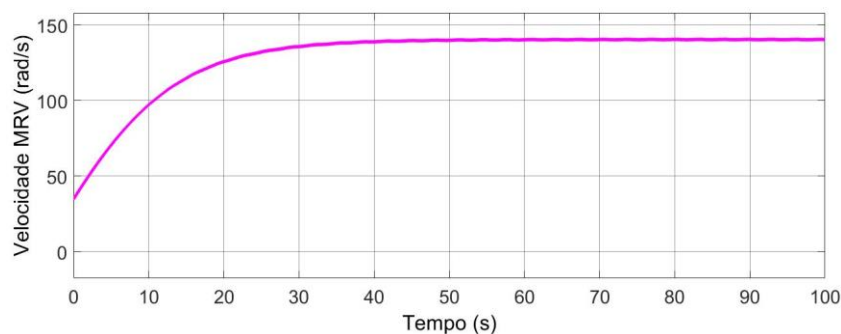
Figura 6.123: Partida da MRV com v_0 de 5 m/s



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Semelhantemente ao ocorrido no exemplo com velocidade inicial zerada, a evolução da velocidade na MRV tem comportamento semelhante à do veículo. A resta precisa de 30 s para chegar à estabilidade com velocidade de 140,1 rad/s, veja **Figura 6.124**.

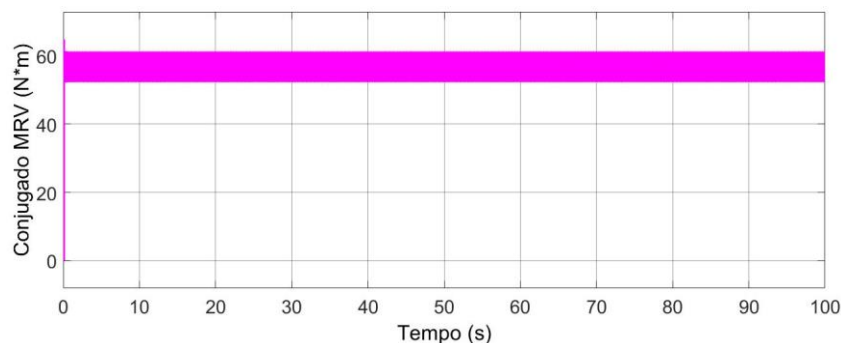
Figura 6.124: Velocidade angular MRV na topologia elétrica com v_0 de 5 m/s.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O comportamento da resposta em conjugado independe da velocidade inicial. O modelo inicia com o conjugado em zero e em seguida é possível observar um pico de 64,8 N·m por volta de 0,002 s. Em seguida, próximo a 0,015 s, a resposta entra no regime oscilatório com o conjugado variando entre 52,34 N·m e 61,29 N·m, veja **Figura 6.125**.

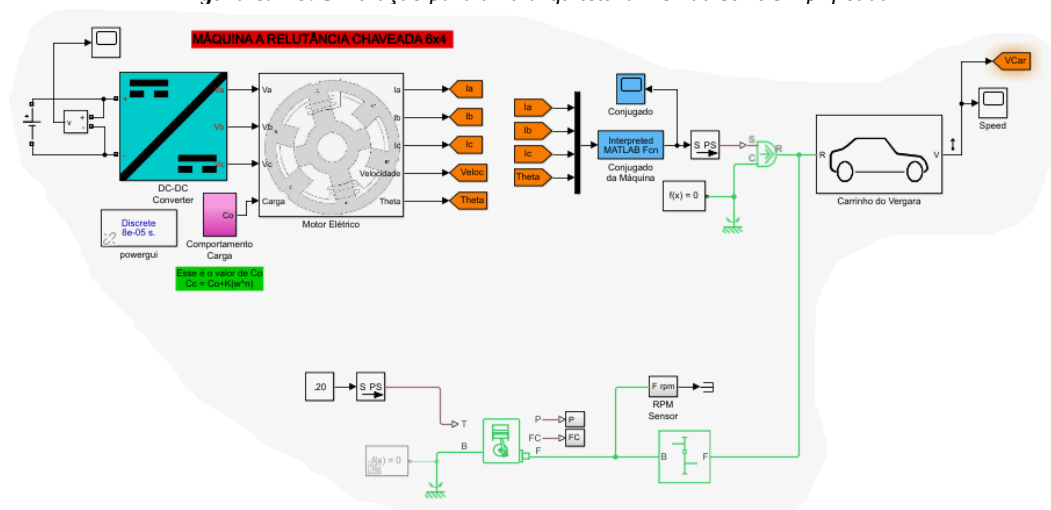
Figura 6.125: Conjugado MRV em uma configuração puramente elétrica.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Por fim, um sistema de propulsão híbrido, a interligação da MRV e do ICE ao corpo do veículo. Para a primeira simulação de uma topologia híbrida, as saídas, de cada fonte de propulsão, foram interligadas na entrada do subsistema carro. Como esse arranjo ocasiona a soma dos conjugados de cada fonte de propulsão, essa topologia aproxima-se de uma topologia paralela, podendo ser vista como um modelo simplificado já que o elemento que acopla a planta elétrica à planta mecânica é negligenciado. A simulação ficou da seguinte maneira, **Figura 6.126**:

Figura 6.126: Simulação para uma arquitetura híbrida serie simplificada

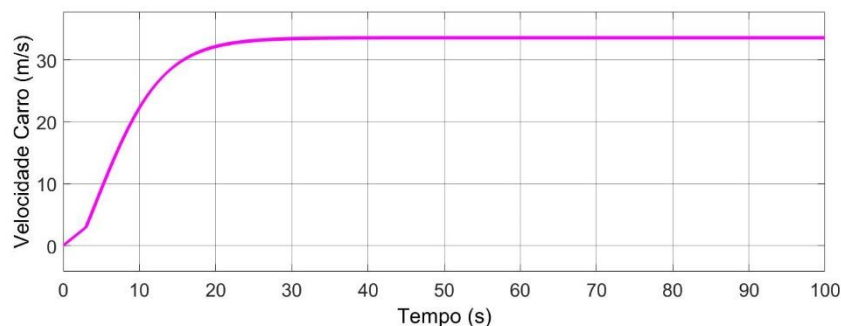


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Nesse caso, com velocidade inicial igual a zero, o auxílio da MRV como motor de partida é notável. Por volta do instante 3 s é possível notar uma abrupta mudança de direção na curva. Esse fato acontece porque o ICE apenas começa a contribuir com conjugado quando a veículo alcança determinada velocidade.

Após esse momento, o veículo alcança a velocidade estacionária de 33,5 m/s por volta de 20 s. Em outras palavras, com o mesmo consumo de combustível apresentado na **Figura 6.119** o veículo alcançou maior velocidade em menos tempo, veja **Figura 6.127**.

Figura 6.127: Comportamento da velocidade para uma configuração híbrida paralela simplificada, v_0 de 0 m/s

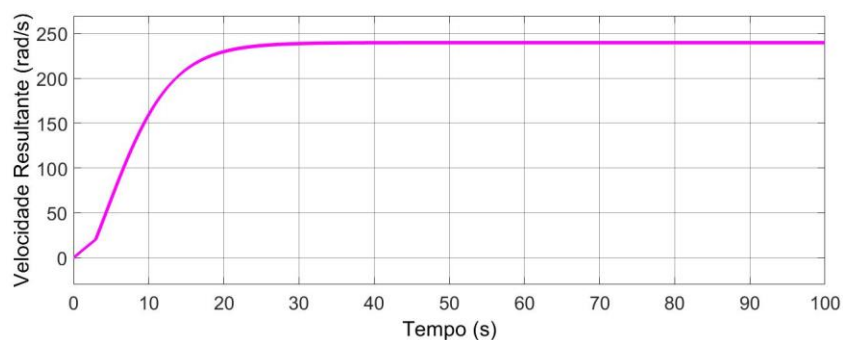


Fonte: (Elaborado pelo autor).

A velocidade resultante do acoplamento da planta mecânica a planta elétrica

evidencia com maior clareza o relacionamento obtido nessa topologia, veja **Figura 6.128**.

Figura 6.128: Velocidade angular resultante na topologia paralela simplificada.

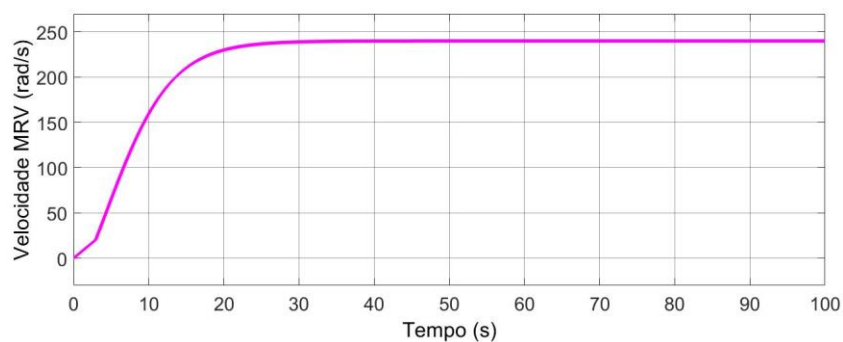


Fonte: (Elaborado pelo autor).

O comportamento da velocidade é semelhante ao visto anteriormente, em **Figura 6.127**, mas agora sem a influência do corpo do veículo e regime estacionário em 238,7 rad/s.

A resposta em velocidade da MRV tem o comportamento alterado, a maneira como a velocidade evolui é uma da resposta resultante, com velocidade final de 238,7 rad/s.

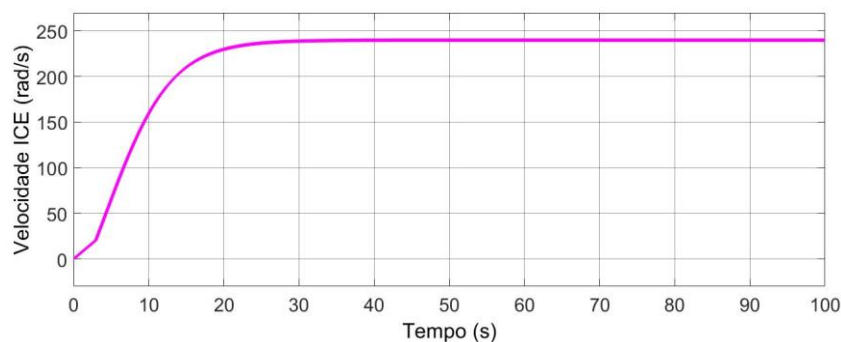
Figura 6.129: Velocidade simplificada da MRV na topologia paralela simplificada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O mesmo acontece com a resposta do ICE, veja **Figura 6.130**.

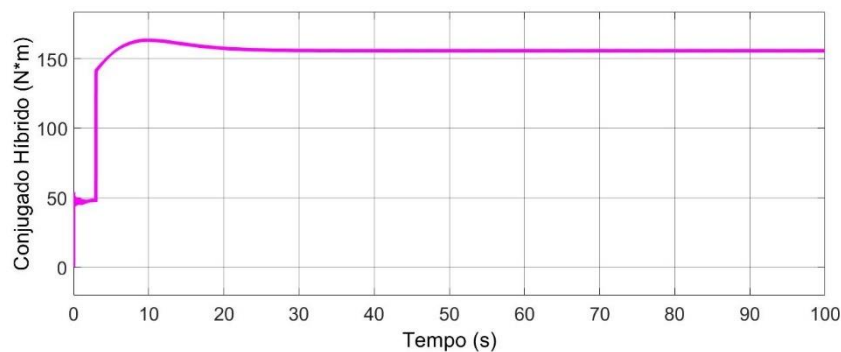
Figura 6.130: Velocidade angular do ICE na topologia paralela simplificada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ao observar os resultados em termos da variação do conjugado no tempo, é possível notar que o sinal na entrada do subsistema carro é a soma dos conjugados de cada máquina, veja **Figura 6.131**, o que se aproxima do comportamento esperado de uma topologia paralela com acoplamento de conjugado, onde as constantes $k_1 = k_2$ e $k_1 = 1$.

Figura 6.131: Conjugado híbrido da topologia paralela simplificada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

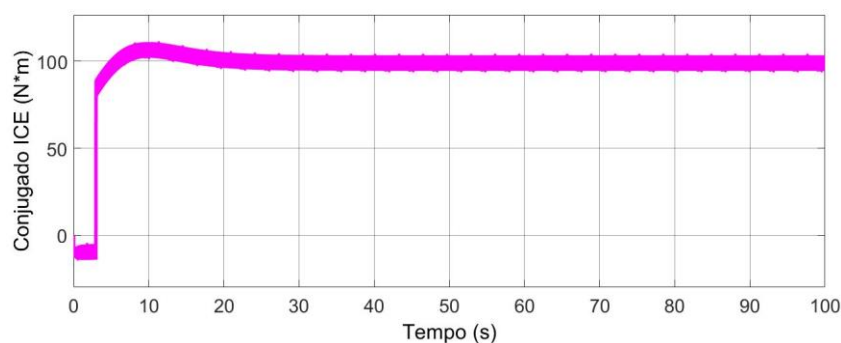
Na figura acima fica ainda mais claro que o ICE (*Internal Combustion Engine* - Motor a Combustão Interna) não contribui nos primeiros segundos da simulação, sendo o veículo partido pela MRV (Máquina a Relutância Variável). O comportamento ondulatório do início é creditado ao fato do conjugado da máquina elétrica ser dominante nesse período.

Quando determinado limiar de velocidade é alcançado por volta de 3 s, o ICE entra de maneira abrupta e, como resultado, um pico de conjugado seguido de um estado de conjugado constante pode ser percebido. O conjugado estabiliza por volta de 20 s como valor

de 155,9 N·m.

É interessante notar que, para essa ligação, as ondulações do conjugado da MRV influenciam o conjugado do ICE muito embora essas ondulações não fiquem tão evidenciadas na **Figura 6.131**, veja **Figura 6.132**.

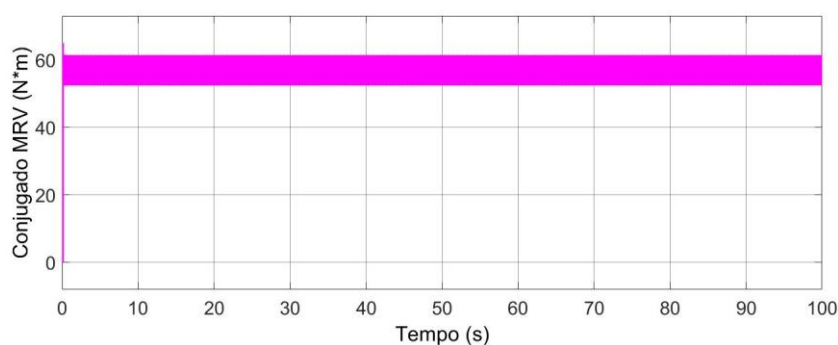
Figura 6.132: Conjugado do ICE na topologia paralela simplificada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A semelhança entre as respostas do conjugado resultante e o conjugado do ICE indica a dominância do ICE nessa simulação. Também é importante comentar que conjugado estável do motor elétrico nesse caso é de 95,2 N·m, enquanto a MRV mantém o conjugado por volta de 60,6 N·m, veja **Figura 6.133**.

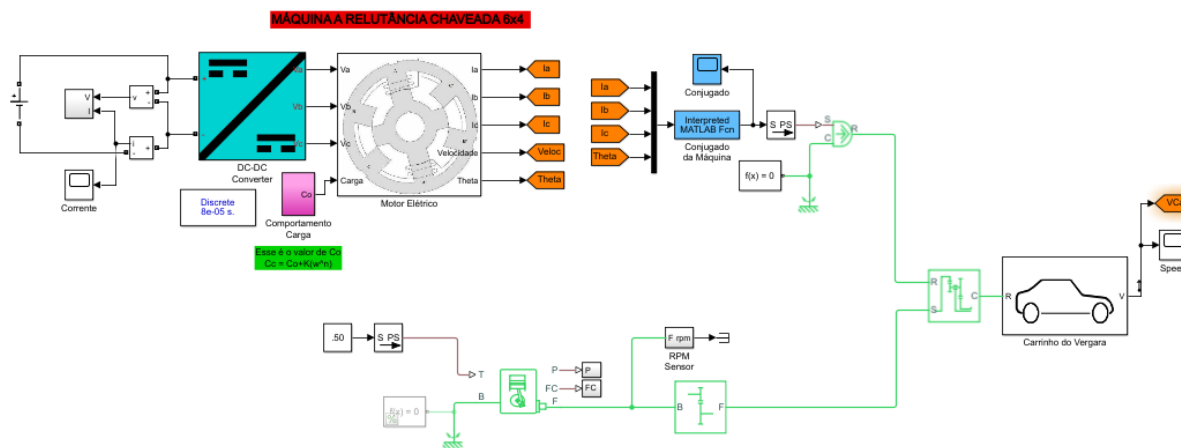
Figura 6.133: Conjugado do MRV na topologia paralela simplificada.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O bloco *Compound Planetary Gear* foi inserido ao modelo para nova simulação da topologia paralela, veja **Figura 6.134**.

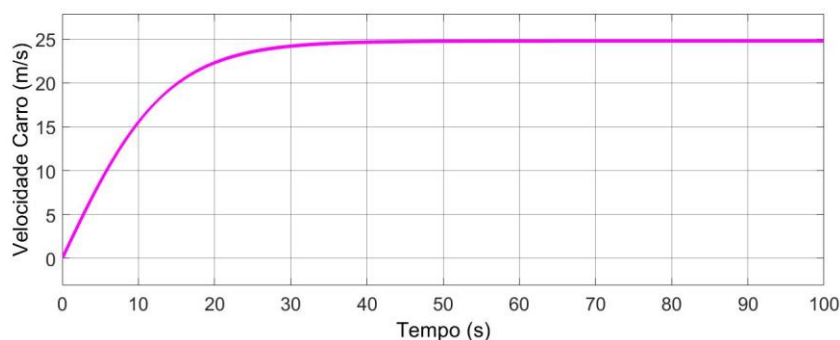
Figura 6.134: Simulação para uma arquitetura híbrida paralela.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Para $g_{AP} = 2$ e $g_{PS} = 1$, veja 6.9 Engrenagem planetária composta, obtém-se $k_1 = 1/3$ e $k_2 = 2/3$. Nesta topologia a planta mecânica está conectada a engrenagem solar e a planta elétrica está conectada a engrenagem orbital, desta maneira, a resposta em velocidade do carro fica da seguinte maneira, veja **Figura 6.135**.

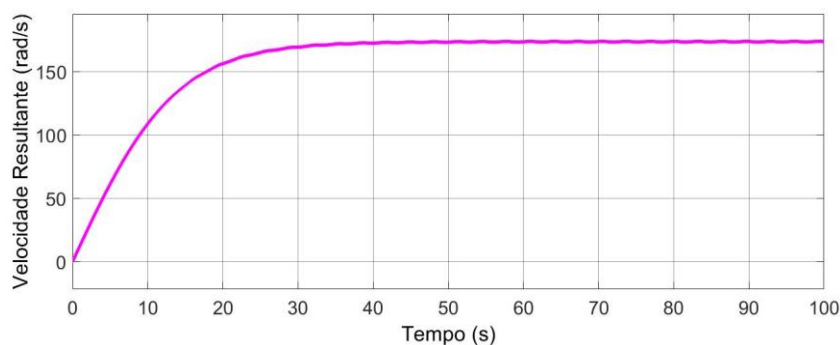
Figura 6.135: Comportamento da velocidade para uma configuração híbrida paralela de um único eixo, v_0 de 0 m/s



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Essa resposta entra no estado estacionário por volta de 30 s com velocidade de 24,8 m/s. Ao mesmo tempo a velocidade resultante do bloco *Compound Planetary* pode ser vista logo abaixo, veja **Figura 6.136**.

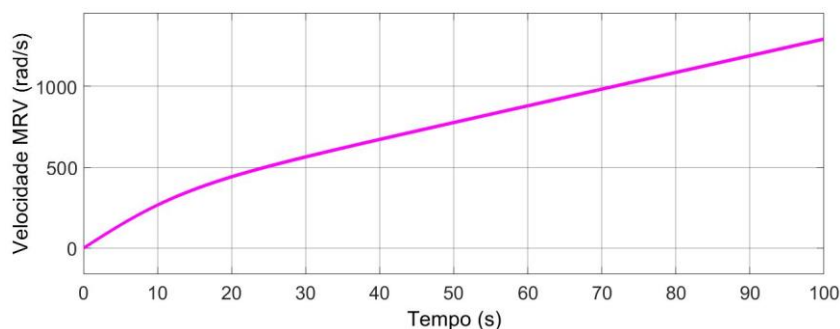
Figura 6.136: Velocidade angular resultante da engrenagem planetária.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A velocidade entra no estado estacionário por volta de 30 s com 169,3 rad/s enquanto a velocidade angular da MRV no mesmo instante é de 563,5 rad/s como pode ser visto na **Figura 6.137**.

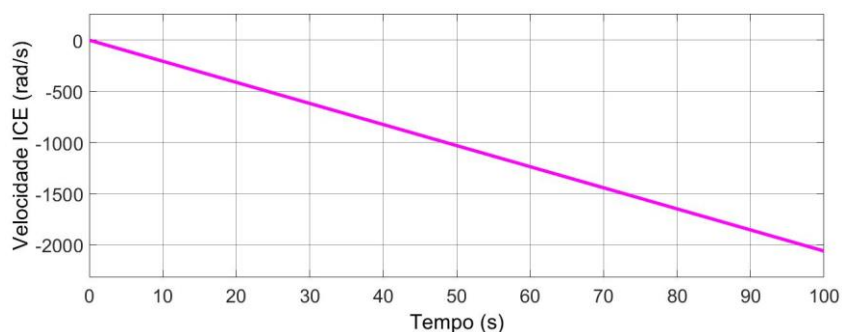
Figura 6.137: Velocidade angular MRV na topologia paralela com engrenagem planetária.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

O ICE está em -618,2 rad/s no segundo 30, veja **Figura 6.138**. Os valores obtidos estão em acordo com o previsto pela Equação (6.26), com não foram inseridas perdas no bloco *Compound Planetary*, o modelo de engrenagem planetária trabalha de maneira ideal o que justifica os resultados obtidos. Note que a velocidade angular do ICE tem orientação oposta a velocidade da MRV. Essa alteração é realizada automaticamente, no momento da compilação do modelo. Caso as duas plantas produzissem velocidade angular de mesmo sentido a engrenagem planetária travaria.

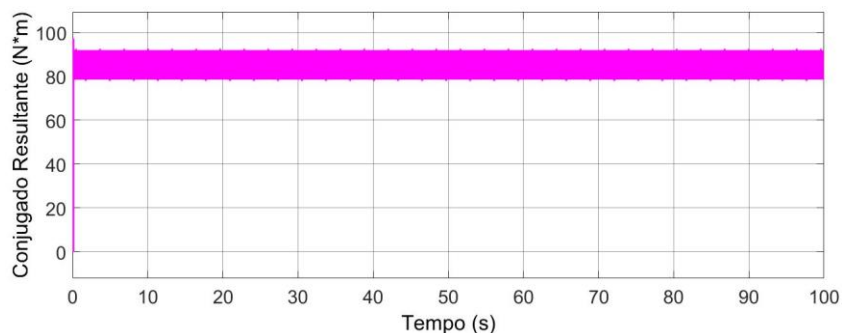
Figura 6.138: Velocidade angular ICE na topologia paralela com engrenagem planetária.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

Ao avaliar o conjugado resultante dessa configuração é possível perceber que a influência do conjugado da MRV é dominante, sendo que o comportamento observado no conjugado resultante, na saída do bloco *Compound Planetary*, é muito próximo do conjugado observado na planta elétrica até o momento, veja **Figura 6.139**.

Figura 6.139: Conjugado resultante topologia paralela com engrenagem planetária.



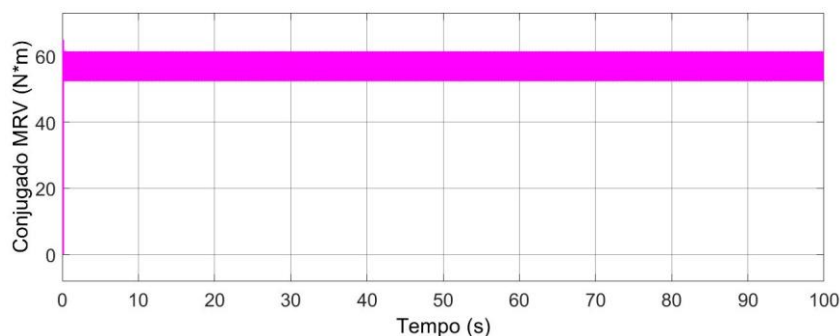
Fonte: (Elaborado pelo autor).

O conjugado resultante tem um pico de 97,3 N·m e entra em regime estacionário por volta de 0,01 s passando a oscilar entre 91,9 N·m e 78,5 N·m.

O comportamento do conjugado da MRV segue como o de costume, veja **Figura 6.140**, esse comportamento imutável, até esse ponto, pode ser creditado ao uso de uma fonte ideal de conjugado para realizar o acoplamento da planta elétrica aos outros elementos da simulação. Esse comportamento pode não ser fiel ao observado em uma possível experiência com elementos reais, no entanto, não deve ser desconsiderado o potencial que a MRV

apresentou de introduzir oscilações no sistema.

Figura 6.140: Conjugado MRV topologia paralela com engrenagem planetária.

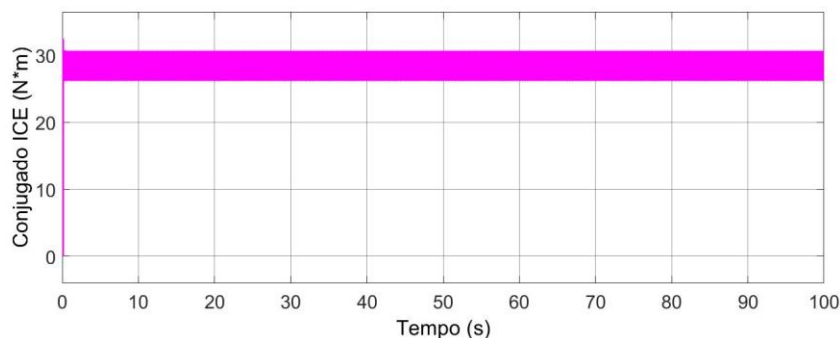


Fonte: (Elaborado pelo autor).

Como o visto anteriormente, o conjugado da MRV tem um pico de $64,8 \text{ N}\cdot\text{m}$ e entra em estado oscilatório por volta de $0,01 \text{ s}$ variando entre $61,2 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $37,0 \text{ N}\cdot\text{m}$.

O conjugado do ICE também toma a forma do conjugado da máquina elétrica, veja **Figura 6.141**, com um pico de $32,4 \text{ N}\cdot\text{m}$ no início da simulação e no regime estacionário oscila entre $35,71 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $35,72 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Figura 6.141: Conjugado ICE topologia paralela com engrenagem planetária.



Fonte: (Elaborado pelo autor).

A relação entre o conjugado da planta elétrica, mecânica e resultante segue o descrito na Equação (5.4), o que comprova a obtenção de uma topologia do tipo paralela com acoplamento de velocidade. Mais uma vez é importante elencar que o resultado obtido é muito próximo ao previsto pela equação pelo fato da não introdução de perdas no modelo da

engrenagem planetária.

6.12. Conclusão

O software *Simulink/MATLAB*[®] possui um grande acervo de componentes que facilitam a implementação de sistemas físicos. Esses componentes podem ser configurados para trabalhar com um modelo disponibilizado pela ferramenta, ou trabalhar conforme um conjunto de dados inseridos pelo usuário. Desta maneira um motor a relutância variável com características modeladas ao longo deste trabalho pode ser integrado a uma série de outros componentes para modelar o sistema de propulsão de um veículo híbrido. Mesmo que os resultados apresentados careçam de maior investigação, os modelos podem ser escalados pela possibilidade de reconfiguração que o *Simulink/MATLAB*[®] disponibiliza.

Dentro da simulação apresentada, é possível notar correspondência entre os parâmetros configurados e os resultados performados na simulação. Chama atenção da possibilidade de empregar a MRV no momento da partida do veículo tendo em vista que o ICE não desenvolve conjugado quando a rotação de seu eixo está abaixo de um limiar.

7. CONCLUSÃO

O motor a relutância variável possui características que o tornam competitivo em aplicações envolvendo a eletrificação de automóveis. Seja por sua robustez, seja pela manufatura simplificada. Questões relacionadas ao ganho promovido pelo esforço conjunto entre um motor a relutância variável e um motor a combustão ainda são patentes de investigação. Métodos de modelagem e simulação podem ser empregados como uma forma preliminar de avaliar o comportamento de um sistema como este e o software *Simulink/MATLAB*[®] mostra-se robusto neste tipo de investigação por prover ferramentas de desenvolvimento e simulação que facilitam a implementação de modelos concebidos por caminhos diversos.

Este trabalho modelou uma MRV de topologia 6x4, os resultados obtidos com este modelo puderam ser verificados por meio da comparação com resultados obtidos por trabalhos que modelaram máquinas parecidas. O modelo de MRV foi integrado a outros componentes do providos pelo *Simulink/MATLAB*[®] para que o sistema de propulsão de um carro híbrido pudesse ser simulado. O modelo também foi diversas vezes modificado para que os elementos de propulsão também pudessem ser testados de maneira independente.

Tanto o ICE quanto a MRV performaram conforme os seus respectivos modelos previram. Quando colocados para trabalhar em conjunto, na topologia de carro híbrido, não foi possível visualizar grande acréscimo de velocidade no veículo, por outro lado a MRV mostrou-se robusta na partida do veículo.

O comportamento dinâmico do motor elétrico foi avaliado sendo que por questões relacionadas a maneira com a qual a simulação foi concebida, a MRV pode ser avaliada apenas com uma fonte ideal de conjugado.

8. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros fica sugerido a simulação de HEVs com a MRV encarregada do conjugado elétrico em outras topologias, como a série com duas transmissões, topologias em paralelo e topologias série-paralelo. Fica como sugestão a implementação de mecanismos que tornem a variação de tração nos pneus transmissível para o eixo da MRV. Também fica como sugestão a implementação de controle de velocidade e controle de conjugado como maneira de inserir a simulação em senários diversos, como o carro em aclave, em alta velocidade ou com variações bruscas de velocidade ao longo de um percurso.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BILGIN, B.; JIANG, W. J.; EMADI, A. **Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications**. 1. Ed. Nova York: CRC Press LLC, 2019.

BECKERS, J. J. L. E. M. **MATLAB Simulink modeling of a hybrid vehicle**. Relatório DCT. TUE, Holanda, 2005.

CHANG, Y.-C.; LIAW, C.-M. “Establishment of a Switched Reluctance Generator-based Common DC Microgrid System,” **IEEE Trans. Power Electron**, pp. 2512–2526, set. 2011.

DIAS, R.; J.; REÁTEGUI, C.; DOS SANTOS, B.; R.; COSTA, C.; S.; FLEURY, A.; ANDRADE, D.; A. Innovations on Design of 6x4 and 6x6 Switched Reluctance Generators for Increasing the Efficiency. **IEEE Latin America Transaction**, vol. 15, no. 4, abr. 2017.

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.

EMADI, A. **Advanced Electric Drive Vehicles**. 1. ed. New York: CRC Press LLC, 2015.

FAN, B. **Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle Using MATLAB/Simulink and ADANS**. 2007. Tese (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Waterloo, Canadá, 2007.

HU, Y.; SONG, X.; CAO, W.; JI, B. New SR Drive with Integrated Charging Capacity for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs), **IEEE Trans. Ind. Electron**, vol. 61, no. 10, pp. 5722–5731, out. 2014.

JURCA, F.; MARTINS, C. **Theoretical and Experimental Analysis of a Three-Phase Permanent Magnet Claw-Pole Synchronous Generator**. IET Electric Power Application, vol. 6, 2012.

LEITMAN, S.; BRANT, B. **Bild Your Own Electric Vehicle**. 2. ed. Nova York: Mc Graw Hill, 2009.

MATLAB, versão 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2010.

MILLER, T. J. E. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines**. [S.l.]: Newness Power Engineering Series, 2001

NOBELS, Tiene; GHEYSEN, Th; VANHOVE, M.; STEVENS, S. Design considerations for a plug-in hybrid car electrical motor. **IEEE International Conference on Clean Electrical Power**, pp. 755-759, 2019.

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.

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.

PAULA, M. V. et al. Comparative Study of Torque Ripple Minimization Techniques for a Three-Phases Switched Reluctance Motor. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ-2018)**, Salamanca, v. 1, n. 16, p. 270-275, 2018.

PRAMOD, P.; NULI, P.; Mitra, R.; MEHTA, S.; Modeling and Simulation of Switched Reluctance Machines for Control and Estimation Tasks. **IEEE**, 2019.

PU, C.; HUI-MIN, L. The Improvement of Switched Reluctance Motor Control System in the Field of Electric Vehicles. **IEEE Fourth International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling**, 2011.

RUBA, M.; FODOREAN, D. Motor-drive Solution for Light Electrical Vehicles Based on a Switched Reluctance Machine. **IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)**, 2016.

SANTOS, F. L. M.; Anthonis, J.; Naclerio, F.; Gyselinck, J. J. C.; Der Auweraer, H. V.; Goes, L. C. S.; “Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle,” **IEEE Trans. Ind. Electron**, vol. 61, no. 1, pp. 469–476, jan. 2014

SIADATAN, A.; FATAHI, N.; AND SEDAGHAT, M. Optimum Designed Multilayer Switched Reluctance Motors for use in Electric Vehicles to Increase Efficiency. **IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM-2018)**, v. 1, p. 304-308, 2018.

SILVA, W, M. **Veículos Elétricos e Híbridos**. SAE, 2010

VRAZIC, M.; VULJAJ, D.; PAVASOVIC, A.; PALKIVIC, H. Study of Vehicle Conversion from internal Combustion Engine to Electric Drive. **IEEE International Energy Conference**, 2014.

YI, Z.; LI, X.; HEXU, S.; YAN, D. An Optimal Torque Controller Based on Iterative Learning Control for Switched Reluctance Motors for Electric Vehicles. **IEEE International Conference on Optoelectronics and Image Processing**, 2010.

ZHENG, Y.; ZHAO, D. Study of Operation of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles Based on FPGA. **IEEE International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering**, 2009.

ZHUPING C.; DELIANG L. Simulation of switched reluctance starter/generator system based on Simpler. **International Conference on Electrical Machines and Systems**. 2005

APÊNDICE A – SCRIPT MODELAGEM DA MRV 6X4

```
function [sys,x0] = simulink_nao_linear(t,x,u,flag,Ra,D,J)

if abs(flag) == 1,

    A = zeros(5,5);
    A(1,1) = Ra;
    A(2,2) = Ra;
    A(3,3) = Ra;
    A(4,4) = -D;
    A(5,4) = -1;

    B = zeros(5,5);
    B(4,4) = -J;
    B(5,5) = 1;

    %-----

    %calcula do angulo alpha para a fase A
    alpha = rem((x(5)*180/pi),90);
    [ indut , deriv ] = find_u( abs(x(1)), alpha);
    B(1,1) = indut;
    B(1,5) = x(1)*deriv/(pi/180);
    A(4,1) = 0.5*x(1)*deriv/(pi/180);

    %calcula do angulo alpha para a fase B
    alpha = rem(((x(5)*180/pi)+120),90);
    [ indut , deriv ] = find_u( abs(x(2)), alpha);
    B(2,2) = indut;
    B(2,5) = x(2)*deriv/(pi/180);
    A(4,2) = 0.5*x(2)*deriv/(pi/180);

    %calcula do angulo alpha para a fase C
    alpha = rem(((x(5)*180/pi)+60),90);
    [ indut , deriv ] = find_u( abs(x(3)), alpha);
    B(3,3) = indut;
    B(3,5) = x(3)*deriv/(pi/180);
    A(4,3) = 0.5*x(3)*deriv/(pi/180);
    sys = zeros(5,1);      % a column vector
    sys = inv(B)*u-inv(B)*A*x;

elseif abs(flag) == 3,
    sys = x;

elseif abs(flag) == 0,

    x0 = [0; 0; 0; 0; 0];
    sys = [5 0 5 5 0 0]';

else
    sys = [];
end
```

APÊNDICE B – SCRIPT ACIONAMENTO DAS CHAVES

```
function u = simulink_chaves(alpha, alpha_OFF)

u(1)=0; u(2)=0; u(3)=0; u(4)=0; u(5)=0; u(6)=0;

if ((alpha >= 45) && (alpha <=75))

    u(1)=1;
    u(2)=1;
else
    u(1)=0;
    u(2)=0;
end

if (alpha >= 15) && (alpha <=45)
    u(3)=1;
    u(4)=1;
else
    u(3)=0;
    u(4)=0;
end

if (((alpha >= 75)&&(alpha <= 90)) || ((alpha >=0)&&(alpha <=15)))

    u(5)=1;
    u(6)=1;
else
    u(5)=0;
    u(6)=0;
end
```

APÊNDICE C – SCRIPT CONJUGADO DA MRV

```
function [m] = simulink_conjugado(Ia,Ib,Ic, theta)

%calculo do angulo alpha para a fase A
alpha = rem((theta*180/pi),90);

[ indut , deriv ] = find_u( abs(Ia), alpha);
T1 = (0.5*Ia*Ia*deriv)/(pi/180);

%calculo do angulo alpha para a fase B
alpha = rem(((theta*180/pi)+120),90);

[ indut , deriv ] = find_u( abs(Ib), alpha);
T2 = (0.5*Ib*Ib*deriv)/(pi/180);

%calculo do angulo alpha para a fase C
alpha = rem(((theta*180/pi)+60),90);

[ indut , deriv ] = find_u( abs(Ic), alpha);
T3 = (0.5*Ic*Ic*deriv)/(pi/180);

m(1) = T1+T2+T3;
```

APÊNDICE D – SCRIPT VARIÁVEIS DO MODELO

```

%% Vehicle Parameters
%Standard Car
rider_mass    = 80;      %kg
vehicle_mass  = 237;     %kg
CG_height     = 254;     %mm
drag_coeff    = 1.2;
front_axle    = 1520;    %mm
rear_axle     = 1400;    %mm
front_area    = 1.33;    %m^2

%% Tire Parameters
tire_b        = 10;
tire_c        = 1.9;
tire_d        = 1;
tire_e        = 0.97;
tire_dia      = 11.4567; %in
tire_inertia  = 1e-3;    %kg*m^2
roll_resist   = 0.005;

%% Simulation Conditions
Ts            = 80e-8;    %s
v0=5;         %m/s
wheel_radius  = (tire_dia/2)*0.0254; %m
gear_ratio    = 2.56;

```

APÊNDICE E – FIND_U

```

function [m,derivada] = find_u(I_entrada,Theta_entrada)

Angulo = [0:45];
Corrente = [1:45];

C = [-3.53135755773562e-11   8.67394849187499e-09   -7.69113655861570e-07
3.18896748026331e-05   -0.000620738596655042   0.00378334575611895
0.0400685859249134
-3.31547593443340e-11   8.35015806274038e-09   -7.50406106880899e-07
3.13748463789025e-05   -0.000614181924941083   0.00375772498488195
0.0399657451985970
-2.03891725102355e-11   6.39168876271969e-09   -6.34071817892808e-07
2.80576737295826e-05   -0.000569699789526382   0.00355862229921144
0.0394691685563489
-2.73143383182287e-12   3.65705602975398e-09   -4.69780890761698e-07
2.33078216588343e-05   -0.000504897617279787   0.00326159055607808
0.0387144299351280
1.56439831589609e-11   7.73342493098081e-10   -2.93859966439821e-07
1.81309719356778e-05   -0.000432801685690134   0.00292249635914071
0.0378239505065833
2.97478321778620e-11   -1.49573320347070e-09   -1.51653793405532e-07
1.38230617383003e-05   -0.000370891543809000   0.00262115802269601
0.0369467883592521
3.85178326058640e-11   -2.97650092736918e-09   -5.42512185023698e-08
1.07254462413443e-05   -0.000324076857410511   0.00238057240584641
0.0361297051194481
4.55125890563334e-11   -4.20612692836334e-09   2.97478966252647e-08
7.95532995563073e-06   -0.000280640625349765   0.00214862623489306
0.0352560145452837
5.22207914918104e-11   -5.41170669018794e-09   1.13810462421567e-07
5.12703903512153e-06   -0.000235358186573160   0.00190190932282817
0.0342651496725970
5.75588980046134e-11   -6.40130162998271e-09   1.84786582689635e-07
2.67274579574182e-06   -0.000194937978969261   0.00167732074914532
0.0332060235263752
5.95335590937501e-11   -6.84438617000993e-09   2.21446443137602e-07
1.24693936633450e-06   -0.000168890044220848   0.00152315961228886
0.0321392642799372
5.73286448235529e-11   -6.62555855900754e-09   2.17637567690517e-07
1.00017147367418e-06   -0.000158784637568919   0.00144231749576329
0.0311095994112734
5.58293643469767e-11   -6.51592597962477e-09   2.20517423745832e-07
5.49679685251400e-07   -0.000145623712079103   0.00134640494622501
0.0299823578686141
5.57926972159402e-11   -6.62143609567089e-09   2.35618378791538e-07
-2.35351490968026e-07   -0.000128056346575206   0.00122939815924516
0.0287975638759888
5.62729009498651e-11   -6.77204705395147e-09   2.51070692599519e-07
-9.55653136733259e-07   -0.000112453190502866   0.00112760967595846
0.0275817466764580
5.45233825838328e-11   -6.56575219512846e-09   2.44300549651341e-07
-1.00940827768301e-06   -0.000106256581358169   0.00107056501013084
0.0264320268880950

```

5.20449785967870e-11 -6.25338041249355e-09 2.31617328725300e-07
 -9.07624002196405e-07 -0.000101913429632667 0.00101999913658525
 0.0252805664989200
 5.05654358567306e-11 -6.11960172552701e-09 2.31217915488463e-07
 -1.20797935694304e-06 -9.14392335212398e-05 0.000937535718531359
 0.0240723520746721
 5.00402148060572e-11 -6.13445733430968e-09 2.39818439782287e-07
 -1.77050300607404e-06 -7.73663217815252e-05 0.000837556235878099
 0.0228454708771842
 4.86213203425789e-11 -5.99569251794749e-09 2.38204716376952e-07
 -2.00686767985980e-06 -6.82352268625389e-05 0.000764773769015975
 0.0216315020512181
 4.45478789582688e-11 -5.45429327681541e-09 2.13080735115884e-07
 -1.58904080021539e-06 -6.76178663197552e-05 0.000730023291183565
 0.0204630977951398
 4.11518006098376e-11 -5.02716406296231e-09 1.95473787868788e-07
 -1.41107724083894e-06 -6.33512610521020e-05 0.000676045876327621
 0.0192618917895463
 3.90826603265732e-11 -4.81023835583420e-09 1.90809447908511e-07
 -1.61781893106654e-06 -5.36583873083831e-05 0.000595730271652011
 0.0180173291628025
 3.70918885630853e-11 -4.60266309011839e-09 1.86491274212992e-07
 -1.82625760930112e-06 -4.40970112650821e-05 0.000517134517820789
 0.0167660249050860
 3.37069686267945e-11 -4.17535839235573e-09 1.68701886353581e-07
 -1.63579439721573e-06 -4.01637213713243e-05 0.000467169645042610
 0.0155392896949517
 2.85608041625176e-11 -3.48973534491597e-09 1.36470472037453e-07
 -1.06611484322710e-06 -4.07868919065089e-05 0.000435462781008731
 0.0143412696521105
 2.42938655534630e-11 -2.95081791959696e-09 1.13759672338866e-07
 -7.94379917633243e-07 -3.70122204106930e-05 0.000382311354838647
 0.0130742068198446
 2.00551697744150e-11 -2.42403013166913e-09 9.22851489848708e-08
 -5.73796617853589e-07 -3.23370295881619e-05 0.000324275676024281
 0.0118092259715482
 1.63020255473730e-11 -1.95453338980752e-09 7.30611194171849e-08
 -3.80512395593927e-07 -2.78654196025659e-05 0.000271197983491922
 0.0105314284099617
 1.18946901610210e-11 -1.39434671730145e-09 4.90400355291348e-08
 -6.55771186275628e-08 -2.49005726884107e-05 0.000225161241613477
 0.00927705048244736
 6.83339646339106e-12 -7.50000134643031e-10 2.11150583544105e-08
 3.25708055886742e-07 -2.24843919339346e-05 0.000180789702486230
 0.00800422770275539
 2.40630328616777e-12 -2.10441937581029e-10 -1.16100955301169e-10
 5.12441652820417e-07 -1.71373835133036e-05 0.000121158750008351
 0.00675054113104813
 5.53452766681307e-13 -4.57866168327388e-11 -5.99485139205257e-10
 1.64831991770753e-07 -5.66876716681760e-06 4.04187578196151e-05
 0.00548748610704888
 2.39070605480778e-13 -3.85471661629887e-11 2.36294894523864e-09
 -6.26715780666552e-08 3.35366500456005e-07 4.01480267850005e-06
 0.00450696418487614
 5.63729105252394e-14 -8.69455178949945e-12 5.34010133441861e-10
 -1.58207537411119e-08 1.01843255141161e-07 2.49809775583884e-06
 0.00400632105975807
 6.04028502809982e-14 -8.83221836584156e-12 4.92259236279008e-10
 -1.27570738335769e-08 8.88010784442266e-08 1.92181357530781e-06
 0.00370824955823897

```

3.35750297923249e-14    -5.78047072877314e-12    3.75287964361085e-10
-1.12356183318393e-08    1.15631439742770e-07    1.11147096614569e-06
0.00349823886810624
6.33955511858335e-14    -9.35553739465359e-12    5.25042489608790e-10
-1.35904127793503e-08    1.26634160556146e-07    1.04301671695379e-06
0.00334493736987526
6.22166532841149e-14    -9.18657564063311e-12    5.17386540313934e-10
-1.35045700249696e-08    1.33721267775670e-07    8.01807259804042e-07
0.00322476333550351
6.13332477453667e-14    -9.00272869502244e-12    5.04594901600332e-10
-1.31228806127336e-08    1.31888102484649e-07    6.96116417488174e-07
0.00313441946667375
6.56583179964992e-14    -9.44241615212504e-12    5.17181345695543e-10
-1.30934492411581e-08    1.27722525414472e-07    6.84373955065253e-07
0.00306133470350335
5.52546833870842e-14    -8.19006876889501e-12    4.65234571749686e-10
-1.23424573436156e-08    1.31336889840041e-07    4.98286678375838e-07
0.00300985541710801
5.39581351155451e-14    -7.98845165066857e-12    4.53431280765663e-10
-1.20318625020725e-08    1.28825123642116e-07    4.63326003404677e-07
0.00297054174495911
5.26331081615622e-14    -7.80249611380240e-12    4.43769154840790e-10
-1.18142191186372e-08    1.27666619106410e-07    4.30794004900888e-07
0.00294297956673112
4.58635219930796e-14    -6.97978590674476e-12    4.09050437696432e-10
-1.12784179609904e-08    1.28261934721616e-07    3.46776597531175e-07
0.00292617470754148
5.48602670913598e-14    -8.03755074276314e-12    4.51378140619846e-10
-1.18517407954445e-08    1.25977299156901e-07    4.40099057024882e-07
0.00292101359949303];

```

```

% Parametros
Dl = length(Angulo);
DAngulo = (Angulo(Dl)-Angulo(1))/(Dl-1);
Angulo = [Angulo(1):DAngulo:Angulo(Dl)];
CorrenteLi = min(Corrente);
CorrenteLs = max(Corrente);

```

```

% Ajuste para Matrizes
[ k ce ] = size(Theta_entrada);
[ k le ] = size(I_entrada);

```

```

for linha = 1:le

```

```

    I = I_entrada(linha);

```

```

    if I > CorrenteLs
        I = CorrenteLs;
    end

```

```

    if I < CorrenteLi
        I = CorrenteLi;
    end

```

```

    Ia = I;

```

```

for coluna = 1:ce

    Theta = Theta_entrada(coluna);

    Theta = mod(Theta,2*Angulo(Dl));
    derivada = 1;

    if Theta > Angulo(Dl)
        Theta = Angulo(Dl)-(Theta-Angulo(Dl));
        derivada = -1;
    end

    indice = floor((Theta-(Angulo(1)))/DAngulo)+1;
    Theta1 = indice;

    if Theta ~= Angulo(Dl)
        Theta2 = indice+1;
        Ind1 = polyval(C(Theta1,:),I);
        Ind2 = polyval(C(Theta2,:),I);
        derivada = derivada*(Ind2-Ind1);
        m(linha,coluna) = ((Ind2-Ind1)/(Angulo(Theta2)-
Angulo(Theta1)))*(Theta-Angulo(Theta1))+Ind1;

    else
        m(linha,coluna) = polyval(C(Theta1,:),I);
        derivada = 0;
    end

end
end

```

