

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO**  
**APLICADA**

**THIAGO PROBST DE ABREU**

**ALGORITMOS DE CONTROLE PARA**  
**MELHORIA DA REGULAÇÃO DE**  
**TENSÃO DE ALTERNADORES DE**  
**ROTAÇÃO VARIADA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Curitiba PR  
Fevereiro 2017

THIAGO PROBST DE ABREU

**ALGORITMOS DE CONTROLE PARA  
MELHORIA DA REGULAÇÃO DE  
TENSÃO DE ALTERNADORES DE  
ROTAÇÃO VARIADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Área de concentração: *Engenharia de Sistemas Computacionais*

Orientador: João Alberto Fabro

Co-orientador: Carlos Raimundo Erig Lima

Curitiba PR

Fevereiro 2017

de Abreu, Thiago Probst.

Algoritmos de controle para melhoria da regulação de tensão de alternadores de rotação variada. Curitiba, 2017. 88p.

Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada.

1. Controle de tensão de alternador 2. Regulador de tensão automática 3. Modelo matemático de um alternador 4. Algoritmos de controle de tensão. I. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada II-t.

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 52

Aos 20 dias do mês de abril de 2017, realizou-se na sala C 301 a sessão pública de Defesa da Dissertação de Mestrado intitulada “**Algoritmos de Controle para melhoria da regulação de Tensão de Alternadores de Rotação Variada**”, apresentado pelo aluno **Thiago Probst de Abreu** como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada, na área de concentração “Engenharia de Sistemas Computacionais”, linha de pesquisa “Sistemas Embarcados”.

### Constituição da Banca Examinadora:

João Alberto Fabro, Dr. (Orientador e Presidente) – UTFPR \_\_\_\_\_

Rogers Demonti, Dr. – UFPR \_\_\_\_\_

Guilherme H. K. Martini, Ms. – Progress Rail Services \_\_\_\_\_

Paulo R. Brero de Campos, Dr. – UTFPR \_\_\_\_\_

Robson Ribeiro Linhares, Dr. – UTFPR \_\_\_\_\_

Em conformidade com os regulamentos do Programa de Pós-Graduação em Computação aplicada e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, o trabalho apresentado foi considerado \_\_\_\_\_ (aprovado/reprovado) pela banca examinadora. No caso de aprovação, a mesma está condicionada ao cumprimento integral das exigências da banca examinadora, registradas no verso desta ata, da entrega da versão final da dissertação em conformidade com as normas da UTFPR e da entrega da documentação necessária à elaboração do diploma, em até \_\_\_\_\_ dias desta data.

Ciente (assinatura do aluno): \_\_\_\_\_

(para uso da coordenação)

A Coordenação do PPGCA/UTFPR declara que foram cumpridos todos os requisitos exigidos pelo programa para a obtenção do título de Mestre.

Curitiba PR, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**"A Ata de Defesa original está arquivada na Secretaria do PPGCA".**

*Dedico este trabalho ao meu avô, Paulo, que apesar do tempo enfraquecê-lo lentamente, seus ensinamentos estarão sempre comigo.*

# Agradecimentos

Agradeço à minha família, por me dar força nos momentos de dificuldade e dúvida. Aos meus orientadores, João Fabro e Carlos Erig Lima, pelas valiosas conversas e conselhos. Aos meus amigos, pela paciência e pelos momentos de descontração.

# Resumo

Esta dissertação apresenta um estudo e avaliação de algoritmos de controle para a melhoria da regulação de tensão de alternadores de rotação variada. Muitos algoritmos de controle de tensão de geradores são apresentados pela literatura, porém poucos são os trabalhos que mostram resultados confiáveis o suficiente para garantir que sejam utilizados em qualquer aplicação deste tipo. Além disso, o problema de mudança de rotação do gerador não é abordado pela literatura, fato marcante em aplicações de geradores nas áreas navais e ferroviárias. Portanto, um estudo comparativo faz-se necessário, considerando algumas métricas pré-definidas, para que uma técnica seja escolhida e então aplicada e avaliada em um regulador automático de tensão, AVR (*Automatic Voltage Regulator*), digital controlado por um sistema embarcado em um gerador real. Este estudo é apresentado neste trabalho, que avalia dois algoritmos de otimização de controlador PID com ajuste *off-line*, o algoritmo de otimização por enxame de partículas ou PSO (*Particle Swarm Optimization*), e o algoritmo genético ou GA (*Genetic Algorithm*). O ajuste do controlador é realizado em um ambiente de simulação, onde o modelo matemático do alternador é obtido, através de ensaios, para que a sintonia do controlador seja a mais correta possível. Os algoritmos são comparados considerando o tempo de subida, tempo de estabilização, erro em regime, sobressinal e tempo de sintonia como métricas, obtendo uma melhor resposta do PSO comparando-a com o GA através de simulações, e validando-a, através de comparação com um algoritmo já utilizado, em um AVR digital em um gerador real.

**Palavras-chave:** Controle de tensão de alternador, Regulador de tensão automática, Modelo matemático de um alternador, Algoritmos de controle de tensão.

# Abstract

This work presents a study of control algorithms to improve the voltage regulation of varied rotation alternators. Many voltage control algorithms are presented in the literature, but most of them do not present enough results to guarantee their usage in locomotive applications. In addition, the generator speed change is not addressed on the mathematical models used in voltage regulation control algorithms in the literature. Therefore, a comparative study is necessary, following some pre-defined metrics, so that a technique could be proposed and then applied and evaluated in a digital Automatic Voltage Regulator (AVR) controlled by an embedded system in a real generator. This study evaluates two PID controller optimization algorithms with off-line tuning, PSO (Particle Swarm Optimization) and GA (Genetic Algorithm). The controller tuning is performed in a simulation environment, where the mathematical model of the alternator is obtained through tests. The algorithms are compared considering the rise time, settling time, steady-state error, overshoot and tuning time as comparison metrics. A better response from the PSO is obtained through simulations, and this response is validated in a digital AVR on a real generator.

**Keywords:** Alternator voltage controller, Automatic voltage regulator, Alternator mathematical model, Voltage control algorithms.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviações</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Trabalhos Correlatos . . . . .	5
1.2 Justificativa do Projeto . . . . .	8
1.3 Objetivos . . . . .	10
1.3.1 Geral . . . . .	10
1.3.2 Específicos . . . . .	10
1.4 Estrutura do Trabalho . . . . .	11
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>12</b>
2.1 Conceitos Introdutórios . . . . .	12
2.2 Gerador Elétrico . . . . .	15
2.2.1 Princípio de Funcionamento do Gerador Síncrono . . . . .	17
2.2.2 Modelo Matemático do Gerador Síncrono . . . . .	19
2.3 Algoritmos de Controle . . . . .	23
2.3.1 Algoritmo Genético (GA) . . . . .	23
2.3.2 Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas (PSO) . . . . .	26
2.3.3 Controlador PID . . . . .	27
2.3.4 Função de <i>Fitness</i> . . . . .	28
2.4 Conclusão . . . . .	29

<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>31</b>
3.1	Conclusão . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>35</b>
4.1	Algoritmos de Controle de Tensão de Alternadores . . . . .	35
4.2	Critérios de Avaliação dos Algoritmos . . . . .	38
4.2.1	Sobressinal . . . . .	38
4.2.2	Tempo de subida . . . . .	39
4.2.3	Tempo de estabilização . . . . .	39
4.2.4	Erro em regime . . . . .	40
4.2.5	Tempo de sintonia . . . . .	40
4.3	Avaliação dos Modelos Matemáticos Escolhidos . . . . .	42
4.4	Modelo Alternador Real x Modelo Simulado . . . . .	50
4.5	Ambiente de Simulação . . . . .	59
4.6	Definição do padrão de variação de rotação . . . . .	60
4.7	Conclusão . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>66</b>
5.1	Comparação entre algoritmos de otimização . . . . .	66
5.2	Implementação e testes com o alternador real . . . . .	72
5.3	Conclusão . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>78</b>
6.1	Discussões . . . . .	78
6.2	Conclusões . . . . .	80
6.3	Trabalhos Futuros . . . . .	82
<b>A</b>		<b>92</b>
A.1	Código do Arquivo <i>Gen_Ctrl_Tensao.m</i> . . . . .	92
A.2	Código do Arquivo <i>PSO_Gen_Ctrl.m</i> . . . . .	93
A.3	Pseudo-código com malha de controle PID implementado em linguagem C . . . . .	96
<b>B</b>		<b>98</b>
B.1	Tabela Dados Alternador Real . . . . .	98
B.2	Tabela Dados Alternador Simulado . . . . .	101

# Lista de Figuras

1.1	Exemplo de ligação do alternador auxiliar . . . . .	3
1.2	Diagrama em blocos do controlador . . . . .	9
2.1	Principais funções do AVR . . . . .	13
2.2	Exemplo de circuito de excitação com excitatriz . . . . .	14
2.3	Exemplo de um controlador simples PID analógico . . . . .	15
2.4	Gerador Síncrono [Daware, 2014] . . . . .	16
2.5	Funcionamento Gerador [Jackson, 2014] . . . . .	18
2.6	Circuito equivalente do gerador síncrono [Spoljaric et al., 2010] . . . . .	20
2.7	Modelos Geradores <i>SimPowerSystem</i> . . . . .	21
2.8	Modelo elétrico bloco standard/fundamental [Mathworks, 2016a] . . . . .	22
2.9	Sistema PID em malha-fechada [Matlab, 2016] . . . . .	27
3.1	Diagrama de blocos que representa o método de pesquisa utilizado para definir e executar o trabalho de mestrado . . . . .	32
4.1	Sobressinal . . . . .	39
4.2	Tempo de subida . . . . .	40
4.3	Tempo de estabilização . . . . .	41
4.4	Erro em regime . . . . .	41
4.5	Ambiente de simulação alternador de ordem 3 . . . . .	44
4.6	Ambiente de simulação alternador de ordem 7 . . . . .	44
4.7	Mudança velocidade de rotação do alternador . . . . .	45
4.8	Alternadores pré-definidos . . . . .	46
4.9	Alternador para teste em bancada . . . . .	47
4.10	Locomotiva PR7 [HD, 2016] . . . . .	47
4.11	Tensão de saída alternador de ordem 3 (0-20s) . . . . .	48
4.12	Tensão de saída alternador de ordem 3 (2-4s) . . . . .	48
4.13	Tensão de saída alternador de ordem 3 (12-14s) . . . . .	49
4.14	Tensão de saída alternador de ordem 7 (0-20s) . . . . .	49
4.15	Tensão de saída alternador de ordem 7 (2-4s) . . . . .	49

4.16	Tensão de saída alternador de ordem 7 (12-14s)	50
4.17	Esquema do Alternador [Corp., 2016a]	50
4.18	Montagem interna do alternador com dois estágios [Corp., 2016a]	51
4.19	Modelo com excitatriz (Power_SM_exciter)	51
4.20	Modelo implementado	52
4.21	Bancada de teste	53
4.22	Diagrama da bancada de testes do alternador	54
4.23	Comparação modelos - 600RPM	56
4.24	Comparação modelos - 900RPM	57
4.25	Comparação modelos - 1200RPM	57
4.26	Comparação modelos - 1500RPM	57
4.27	Comparação modelos - 1800RPM	58
4.28	Tempo de subida alternador real	58
4.29	Tempo de subida alternador simulado	59
4.30	PID implementado no <i>Simulink</i>	60
4.31	Cálculo ITSE	60
4.32	Cálculo Erro	61
4.33	Modelo do Alternador	61
4.34	Valores de referência utilizados pelo controlador	62
4.35	Variação de rotação do alternador em operação	62
4.36	Variação de tensão em operação	63
4.37	Variação de tensão em operação - rotação nominal	64
4.38	Variação de rotação do alternador - simulação	64
5.1	Tela GAtool - 1	67
5.2	Tela GAtool - 2	68
5.3	Resultado Tensão de Saída - GA	68
5.4	Resultado Tensão de Saída - PSO	70
5.5	Comparação tensão de saída algoritmos	70
5.6	Comparação tensão de saída algoritmos - início	71
5.7	Tensão de Saída do Alternador utilizando algoritmo de controle da empresa	73
5.8	Tensão de Saída do Alternador utilizando controlador PID implementado	74
5.9	Comparação entre os algoritmos no Alternador Real	74
5.10	Comparação entre os algoritmos no Alternador Real - Início	75

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros PID . . . . .	28
4.1	Dados pesquisa algoritmos utilizados . . . . .	36
4.2	Dados sobre os tipos de otimização de controladores PID . . . . .	37
4.3	Critérios de avaliação dos algoritmos . . . . .	43
4.4	Informações Alternador de testes . . . . .	46
4.5	Dados inseridos para saturação do modelo simulado . . . . .	56
5.1	Comparação algoritmos de controle . . . . .	71
5.2	Comparação tempos de processamento algoritmos . . . . .	72
5.3	Comparação algoritmos de controle - aplicação real . . . . .	76
B.1	Dados alternador real . . . . .	98
B.2	Dados alternador real . . . . .	101

## Lista de Símbolos

$p$	Número de pólos do gerador
$f$	Frequência em $Hz$ da saída do alternador
$\phi$	Fluxo magnético
$\varepsilon$	Força eletromotriz
$t$	Tempo
$B$	Intensidade do campo magnético
$A$	Área por onde flui o campo magnético
$\theta$	Orientação relativa entre a área e o campo magnético
$\omega$	Velocidade angular do alternador
$R_s$	Resistência do estator
$R_f$	Resistência do rotor
$L_{1s}$	Indutância do estator
$L_{1f}$	Indutância do rotor
$V_s$	Tensão de saída do alternador
$V_f$	Tensão de excitação do alternador
$I_s$	Corrente do estator do alternador
$I_f$	Corrente do campo do alternador
$R_m$	Resistência relativa às perdas do núcleo
$I_m$	Corrente de magnetização
$L_m$	Indutância de magnetização
$abc$	Sistema de referência com referencial no estator
$dq$	Sistema de referência com referencial no rotor
$T$	Transformação do sistema de referência $abc$ para $dq$
$T_{inv}$	Transformação do sistema de referência $dq$ para $abc$
$K_p$	Ganho proporcional
$K_i$	Ganho integrativo
$K_d$	Ganho derivativo
$\Omega$	Ohm - Unidade de resistência
$H$	Henry - Unidade de impedância

<i>RMS</i>	<i>Root mean square</i> - Raiz do valor quadrático médio
<i>V<sub>rms</sub></i>	Tensão <i>RMS</i> de saída do alternador
<i>A</i>	Ampère - Unidade de corrente elétrica
<i>W</i>	Watt - Unidade de potência
<i>Hz</i>	Hertz - Unidade de frequência
<i>VA</i>	Volt-Ampère - Unidade de potência aparente
<i>V</i>	Volts - Unidade de tensão elétrica

## Lista de Abreviações

EUA	Estados Unidos da América
PPGCA	Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
GE	General Electric
PID	Proporcional Integral Derivativo
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> - Resposta Finita ao Impulso
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> - Regulador Automático de Tensão
ICA	<i>Imperialist Competitive Algorithm</i> - Algoritmo Competitivo Imperialista
IAE	<i>Integrated Absolute Error</i> - Integral do Erro Absoluto
ISE	<i>Integrated Square-Error</i> - Integral do Erro Quadrático
ITSE	<i>Integral of Time-Weighted-Squared-Error</i> - Integral do Erro Quadrático multiplicado pelo Tempo
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> - Otimização por Enxame de Partículas
SFL	<i>Shuffled Frog Leaping</i> - Pulo do Sapo Embaralhado
GA	<i>Genetic Algorithm</i> - Algoritmo Genético
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação em Largura de Pulso
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> - Transistor de Efeito de Campo Metal - Óxido - Semicondutor
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar com Portas Isoladas
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
RPM	Rotações por minuto
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto dos Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
ACM	<i>Association for Computing Machinery</i> - Associação para Maquinaria da Computação

RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i> - Computador com Conjunto Reduzido de Instruções
BELBIC	<i>Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller</i> - Controlador Inteligente baseado no Aprendizado Emocional do Cérebro
GSA	<i>Gravitational Search Algorithm</i> - Algoritmo de Procura Gravitacional
SI	<i>Swarm Intelligence</i> - Inteligência de Enxame
RLC	Resistor (R), Indutor (L) e Capacitor (C)
<i>hp</i>	<i>Horse Power</i> - Cavalo de Força

# Capítulo 1

## Introdução

O aumento das demandas energéticas, aliado ao crescimento da produção mundial, vêm gerando uma grande preocupação quanto à sustentabilidade. Com isso, a eficiência energética, e a preocupação com o meio ambiente, têm sido a grande preocupação da maioria das nações, principalmente das grandes potências mundiais, como, por exemplo, países da Europa, Ásia, os Estados Unidos, entre outros [Council, 2007].

Dentro deste tema, o transporte dos bens de consumo e matérias-primas está sendo repensado para que sejam realizados de forma mais eficiente e sustentável. Portanto, o mercado ferroviário é novamente fontes de investimentos, pois é um dos principais meios de transporte destes materiais.

Nos EUA, por exemplo, onde existem 224.792km de linhas férreas [CIA, 2015], foram transportadas 1.8 bilhões de toneladas de materiais em 2012 [AAR, 2015]. Ou seja, 30 milhões de vagões, que representam 47% do total das cargas transportadas em todo este país durante aquele ano [AAR, 2015]. As responsáveis pelo transporte de toda essa carga são as 24.700 locomotivas existentes nos EUA.

Grande parte das locomotivas utilizadas no transporte nos EUA utilizam alternadores movidos a motores à diesel, os quais são utilizados desde o final do século XVIII em aplicações ferroviárias. Porém, a utilização de alternadores em tal aplicação só ganhou força a partir da década de 1930, quando o sistema de controle patenteado por Hermann Lemp foi aplicado a motores diesel de 300 a 600HP, gerando assim locomotivas perfeitas para serem utilizadas como “*switchers*”, ou máquinas de manobra, responsáveis principalmente em montar e desmontar trens [Marre, 1996]. A partir daí, com o aprimoramento dos motores diesel e dos circuitos elétricos de tração, estes tipos de locomotivas tomaram conta das ferrovias, sendo hoje os principais tipos utilizados.

Este sucesso das locomotivas Diesel-Elétricas se deve ao fato desta configuração ter o melhor custo benefício, e não necessitar de uma infraestrutura das vias muito elaborada, como por exemplo, as locomotivas elétrico-elétricas, que necessitam das linhas

de alta tensão instaladas em todo o percurso da via para poder operar, tornando assim o investimento muito alto [Marre, 1996].

O mercado ferroviário é muito fechado, principalmente o de locomotivas para transporte de carga. Existem apenas algumas empresas que brigam pela liderança na venda de locomotivas deste tipo, entre elas, pode-se citar Caterpillar e GE (General Electric). Isto torna o acesso à informação e desenvolvimento tecnológico muito restrito a essas empresas, sendo que os avanços nestas áreas se tornam uma arma para a conquista do mercado. Por isso, poucos estudos são divulgados sobre inovações tecnológicas em locomotivas de carga.

Sendo assim, o fato do autor ser funcionário de uma destas empresas gera oportunidade de estudar e desenvolver novas tecnologias nesta área, ainda mais no Brasil, onde pouco se tem incentivo para tais atividades, principalmente em mercados fechados como o ferroviário. Tal oportunidade torna-se um grande elemento desafiador para a pesquisa nesta área.

Um exemplo de sucesso de estudo na área ferroviária foi o trabalho apresentado por Martini [Martini and Fabro, 2013], também funcionário da empresa Progress Rail (Caterpillar), que apresentou um filtro híbrido para a redução de ruídos em inversores de potência.

Outro fator motivador para este trabalho é a deficiência do Brasil nesta área. Um vagão pode levar o equivalente à carga de duas carretas, ou seja, um trem de 100 vagões leva o equivalente a 200 caminhões cheios de uma carreta [Manzano, 2013]. Algo que, se fosse melhor explorado, diminuiria os movimentos nas estradas, diminuindo as mortes, riscos e custos que o transporte rodoviário traz [Ricardo, 2016]. Portanto, o interesse no estudo de novas tecnologias e desenvolvimentos na área ferroviária traz grande benefício para o país.

Grande parte das locomotivas Diesel-Elétricas é composta por dois circuitos. Um circuito de alta potência, em que o alternador principal da locomotiva gera energia para os motores de tração, responsáveis pelo movimento e torque da máquina, e um circuito auxiliar responsável por gerar a tensão para carregar a bateria e para o acionamento dos faróis, relés, válvulas, contadores, ventiladores, compressor e para os circuitos de controle, como por exemplo, sistemas microcontrolados nas máquinas mais modernas [Marre, 1996]. Essa grande quantidade e variedade de cargas, aliadas às constantes variações de rotação do motor diesel, que alteram o comportamento do sistema, dificultam a sintonia do controlador do alternador auxiliar. Um esquema simplificado de ligação do alternador com as cargas é apresentada pela figura 1.1. Nela, é possível verificar como o motor diesel é acoplado mecanicamente aos alternadores principal e auxiliar. Ainda, é possível verificar como o controlador de tensão é conectado ao alternador auxiliar para

realizar sua excitação e controlar sua saída, utilizando a tensão da bateria para isso. Além disso, o sistema de controle da locomotiva se comunica com o controlador de tensão para determinar quais as referências de tensão que o controlador deve utilizar para controlar a saída do alternador auxiliar.

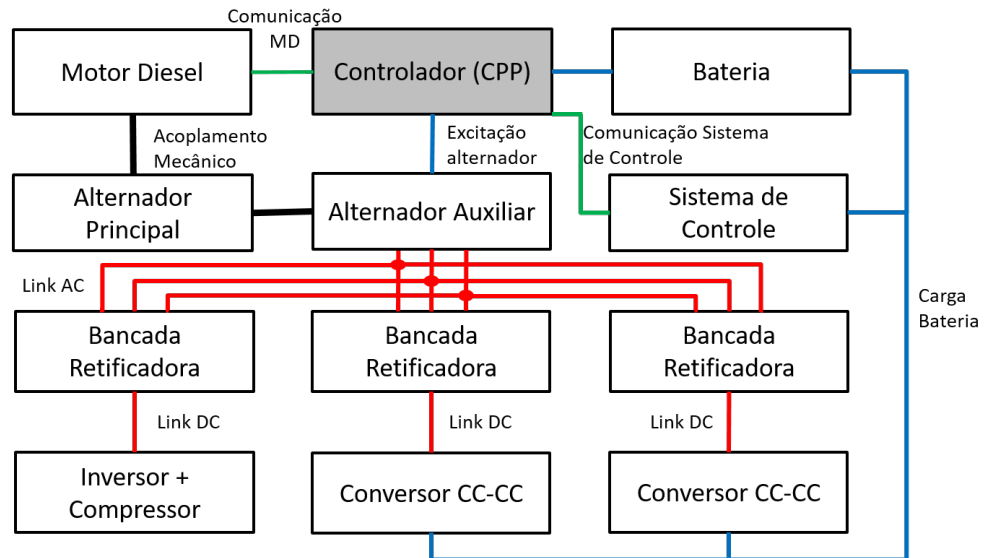


Figura 1.1: Exemplo de ligação do alternador auxiliar

AVRs (*Automatic Voltage Regulators*), ou reguladores automáticos de tensão, são amplamente estudados pela academia, porém com pouca ênfase na área ferroviária, onde alguns aspectos importantes a diferencia de outras aplicações como a variação da rotação do alternador, e a grande variedade de cargas no circuito.

O grande responsável pela durabilidade dos equipamentos elétricos em uma locomotiva é o alternador auxiliar. É ele o responsável por carregar as baterias e, em locomotivas mais novas, acionar os ventiladores e compressor de ar. Sem estes equipamentos auxiliares, a locomotiva perde sua capacidade de tração, de refrigeração do motor diesel e também fica sem bateria, a qual é responsável por acionar os contadores e relés da máquina.

Sendo assim, para que todos estes componentes funcionem corretamente e tenham um ciclo de vida duradouro, é essencial ter um bom controle de tensão deste alternador. O controle evita sobretensões e sobrecorrentes, além de proteger o alternador contra curtos-circuitos e sobrecargas. Todas estas falhas podem causar danos não somente aos equipamentos ligados ao alternador, como baterias, ventiladores, compressor, como também ao alternador e ao sistema de controle. Um descontrole muito grande de tensão do alternador pode, por exemplo, danificar o sistema de controle da locomotiva, fazendo com que todo o controle de tração ou até mesmo do motor diesel pare de funcionar. Sendo

assim, pode-se dizer que este controle é crítico para o bom funcionamento e manutenção de qualquer locomotiva.

Os reguladores de tensão dos alternadores auxiliares utilizados na maioria das locomotivas atualmente são analógicos, ou seja, o controle é feito através de um circuito eletrônico, não havendo nenhum processamento atrelado a ele. Esta abordagem é muito eficiente para sistemas em que não há diferença entre os tipos dos alternadores, por exemplo, em locomotivas fabricadas em grande escala. Contudo, caso haja uma troca de alternador da locomotiva, ou se este tenha que ser reparado, as pequenas diferenças advindas dessas situações podem tornar estes reguladores pouco eficientes. Além disso, esta abordagem é pouco flexível, já que qualquer alteração não prevista no sistema resultará na troca de todo o regulador [Park et al., 2009]. Sendo assim, estudos são necessários para avaliar quais mudanças serão realizadas no regulador, o que gera alto custo de tempo e dinheiro. Outro ponto importante é a durabilidade destes reguladores. Com o tempo, os componentes eletrônicos dos reguladores acabam por alterar suas características, causando erros nas medidas e na regulação da saída [Park et al., 2009].

Por tais fatos, a utilização de reguladores digitais vem crescendo. Além de grande flexibilidade em relação ao sistema, este também pode ser alterado com mais facilidade para atender as demandas dos clientes [Park et al., 2009]. Além disso, são mais baratos, pois demandam menos componentes eletrônicos para serem fabricados.

Para este trabalho, tem-se como objetivo identificar e avaliar algoritmos de controle de regulação de tensão de alternadores com rotação variada para melhorar as condições de funcionamento de um regulador de tensão de alternador específico que já possui sua estrutura de hardware desenvolvida. Tal equipamento já está integrado ao funcionamento de 13 locomotivas diesel-elétricas que operam no Brasil e Estados Unidos, os quais são utilizados para controlar tanto alternadores menores, de 50kW, utilizados como alternadores auxiliares, até maiores de 2700kW, utilizados como alternadores principais. O alternador utilizado para a avaliação destes algoritmos será o de menor potência, por ser mais enxuto e permitir que seja utilizado em uma bancada de teste mais simples.

Assim, é sugerido um estudo sobre algoritmos de controle capazes de lidar com as modificações de comportamento do sistema devido à variação de velocidade de rotação do alternador, as quais serão melhor explicitadas no decorrer deste trabalho, a fim de identificar quais algoritmos podem ser utilizados em tal aplicação. Posteriormente, as técnicas levantadas poderão ser avaliadas entre si, através de um ambiente de simulação que represente o ambiente real no qual o melhor algoritmo será testado. A seguir, segue um estudo sobre as várias técnicas de controle utilizados atualmente em reguladores de tensão que são referências para o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.1 Trabalhos Correlatos

Muitos algoritmos de controle diferentes tem sido implementados para diferentes tipos de aplicações de AVR's digitais, dentre eles podem ser citados os controladores adaptativos [Algreer et al., 2011], [Azzouz and Elshafei, 2010] e [Li et al., 2010], controladores *Fuzzy* [Azzouz and Elshafei, 2010] e [McArdle et al., 2001], controladores híbridos [McArdle et al., 2001] e [Sreekumar and Agarwal, 2008] e controladores que utilizam métodos inteligentes para otimização de controladores PID como em [Farouk and Bingqi, 2012], [Madinehi et al., 2011], [Sahu et al., 2012a], [Coelho and Herrera, 2008], [Devaraj and Selvabala, 2009], [Gaing, 2004] e [Gozde et al., 2014]. Percebe-se que a maioria dos controladores citados utilizam controladores PID para compor sua malha de controle, como [Algreer et al., 2011], [Farouk and Bingqi, 2012], [Madinehi et al., 2011], [McArdle et al., 2001], [Sahu et al., 2012a], [Dadvandipour et al., 2015], [Devaraj and Selvabala, 2009], [Gaing, 2004] e [Gozde et al., 2014]. Tal fato deve-se a simplicidade e flexibilidade deste tipo de controlador, sendo ele ainda o mais utilizado atualmente [Lee et al., 2008].

O controlador PID é um sistema de controle clássico que, além de possuir uma grande facilidade e simplicidade de formulação, utiliza pouca memória e pouco processamento para ser executado [Ang et al., 2005]. Porém, sendo utilizado sozinho, carece de ferramentas para facilitar sua sintonia com o sistema e é pouco eficiente no controle de oscilações e ruídos em sistemas mais complexos, onde seu comportamento pode mudar com o tempo [Ang et al., 2005].

Tal fato abre um leque de oportunidades de desenvolvimento de algoritmos que aliem a simplicidade dos controladores PID, com técnicas de otimização que melhorem a sintonia destes controladores PID para que então respondam da melhor forma possível.

Algoritmos adaptativos vêm sendo bastante utilizados em controladores PID para que os parâmetros do controlador se adaptem ao comportamento do sistema ao qual são implementados. Esta característica melhora o desempenho do controlador para as mudanças inesperadas dos sistemas, contudo estes algoritmos de adaptação podem demandar alto processamento, limitando sua utilização em algumas aplicações. Algumas alternativas para solucionar tal desvantagem vêm sendo estudadas, como a técnica adotada por [Algreer et al., 2011], onde um filtro FIR (*Finite Impulse Response* - Resposta Finita ao Impulso) é utilizado para ajudar na adaptação do controlador.

Esta abordagem é uma alternativa interessante para solucionar alguns problemas dos controladores clássicos PID, porém, ainda possui uma grande diferença quanto ao tempo de processamento destes tipos de algoritmos por ser executado a cada laço do controlador PID [Feng, 2006].

Para que, então, sejam solucionados os problemas da aplicação de controladores PID em sistemas não-lineares, alguns métodos inteligentes para sintonia de controladores PID vêm sendo bastante utilizados em AVR's digitais [Madinehi et al., 2011], [Sahu et al., 2012a], [Rahimian and Raahemifar, 2011], [Gaing, 2004], [Nirmal and Auxillia, 2013], [Schaefer and Kim, 2014], [Mohammed et al., 2014] e [Ramya et al., 2013].

Um método inteligente para a otimização de controladores PID abordado pela literatura é o sistema *Fuzzy*. Estes são reconhecidos pela sua boa resposta a sistemas não-lineares, e se baseiam em um conjunto de regras que regem como o sistema deve se comportar a partir das entradas definidas [Drainkov et al., 1993] [Güven and Passino, 2001]. Os sistemas *Fuzzy* puros podem também ser utilizados como controladores para a regulação de tensão de alternadores, como apresentado em [McArdle et al., 2001]. Entretanto a utilização de controladores puramente *Fuzzy* torna difícil garantir a estabilidade do sistema. Portanto, esta abordagem tem sido mesclada com alguma outra, criando assim algoritmos híbridos, capazes de aproveitar o melhor das diferentes técnicas de controle [Feng, 2006].

Em [Dadvandipour et al., 2015], os autores utilizam lógica *Fuzzy* em um algoritmo de competição imperialista, ou em inglês, *Imperialist Competitive Algorithm (ICA)*, para melhorar o desempenho de um controlador PID aplicado a um AVR. A lógica *Fuzzy* é aqui introduzida para solucionar os problemas de baixa velocidade de convergência e pontos ótimos locais que o ICA possui. Tal técnica se mostrou eficiente nos testes realizados pelos autores, os quais foram realizados através de simulações utilizando Matlab e considerando o sistema linear. Nas simulações, portanto, não há mudanças na velocidade de rotação do alternador, a qual altera bastante suas características.

Em [Madinehi et al., 2011], são comparadas duas técnicas de medição de desempenho de algoritmos de controle e dois algoritmos diferentes de otimização dos ganhos de um controlador PID. As duas técnicas comparadas foram a Integral do Erro Quadrático Multiplicado pelo Tempo, ou ITSE (*Integral of Time-Weighted-Squared-Error*), e o Método de Sobressinal, que mede não somente o erro em regime, mas também o tempo de estabilização e de subida, e o sobressinal. Já o primeiro, por ser no domínio da frequência, leva um tempo maior para que seja calculado quando comparado com o último. Porém, o ITSE mostrou-se um método com melhor solução para sistemas não lineares. Já os algoritmos de otimização comparados foram dois, o método de Otimização por Enxame de Partículas, ou PSO (*Particle Swarm Optimization*), o qual, através de um método iterativo, tenta melhorar uma solução candidata através de uma medida de qualidade, neste caso, as medidas de qualidade foram tiradas utilizando o ITSE e o Método do Sobressinal. O outro algoritmo de otimização comparado foi o SFL (*Shuffled*

*Frog Leaping*). Ainda, em [Madinehi et al., 2011], foi utilizado um bloco de saturação na simulação para que fosse possível representar o sistema utilizado em condições não-lineares, tornando os resultados mais próximos da realidade.

Ambos os algoritmos obtiveram bons resultados nas simulações, mostrando que a utilização de algoritmos inteligentes para a otimização de controladores PID aumentam a robustez da estabilidade e melhoram a eficiência em desempenho deste tipo de controlador, tanto em condições lineares quanto em não-lineares. Porém, [Madinehi et al., 2011] não apresenta resultados da implementação destes algoritmos em um sistema real, com cargas variadas e alternador com rotação variável, o que aumentaria o nível de complexidade do sistema, pondo a prova os algoritmos apresentados.

Os algoritmos de otimização por enxame de partículas vêm sendo muito utilizados na literatura para otimização de controladores PID, como por exemplo [Rahimian and Raahemifar, 2011] [Gaing, 2004] [Nirmal and Auxillia, 2013] [Schaefer and Kim, 2014]. Em [Gaing, 2004], o autor aplica o PSO como algoritmo de otimização do controlador PID e compara este com um algoritmo genético. Os resultados do PSO foram melhores do que do GA quando aplicados a uma resposta ao degrau. Além disso, os autores comparam o desempenho e a eficiência computacional dos dois algoritmos, mostrando que devido ao maior número de operações realizadas pelo GA, o PSO exige menos processamento para ser executado. Outro aspecto comparado por [Gaing, 2004] é a convergência dos algoritmos, onde o PSO também mostrou resultado melhores.

Resultados semelhantes a [Gaing, 2004] foram obtidos por [Rahimian and Raahemifar, 2011], onde os autores também compararam o PSO com um algoritmo genético, tendo o PSO melhores resultados. Já em [Nirmal and Auxillia, 2013] e [Schaefer and Kim, 2014], variações do algoritmo PSO foram utilizados, [Nirmal and Auxillia, 2013] apresentou uma abordagem adaptativa do algoritmo, enquanto [Schaefer and Kim, 2014] utilizaram o PSO para ajustar um controlador PID com ajuste em tempo real.

Além do PSO, outro algoritmo de otimização muito utilizado pela literatura é o algoritmo genético. Isto pode ser verificado pelos trabalhos de [Mohammed et al., 2014] e [Ramya et al., 2013]. Em [Mohammed et al., 2014] é apresentado um modelo detalhado do algoritmo genético aplicado a um controlador PID. Os resultados deste trabalho mostram que tal aplicação se sobressai perante ao um controlador PID clássico. Já em [Ramya et al., 2013] os resultados do GA-PID são comparados com dois outros métodos, Ziegler-Nichols e *Fuzzy*. A abordagem com algoritmo genético implementada neste trabalho resultou em um melhor desempenho dinâmico do regulador de tensão além de ter um menor tempo de convergência.

## 1.2 Justificativa do Projeto

Como citado nas seções anteriores, um dos grandes responsáveis pela durabilidade da maioria dos equipamentos elétricos de uma locomotiva é o alternador auxiliar. Sendo assim, o descontrole na geração da energia pelo alternador auxiliar pode causar danos a estes componentes, ou reduzir seu tempo de vida. Portanto, o controle da tensão de saída deste alternador torna-se um dos principais elementos da locomotiva, sendo diretamente responsável pelo seu desempenho e durabilidade.

Primeiramente, é então necessário definir o que é considerado um bom controle do alternador auxiliar. Grande parte dos equipamentos atrelados ao alternador auxiliar possuem uma curva de tensão por frequência que precisa ser respeitada (ex.: ventiladores e compressores) ou limites máximos de tensão (ex.: sistemas eletrônicos). Além destes equipamentos, o próprio alternador possui uma curva de tensão por frequência ótima, onde, quando opera fora desta faixa, perde eficiência, diminuindo tanto a vida útil dos equipamentos atrelados a ele, quanto do próprio alternador.

Estes limites possuem normalmente uma tolerância, que em geral, gira em torno de 10% das suas curvas ou tensões nominais de operação. Ainda, essas variações de tensão, ou sobretensões, não devem acontecer por muito tempo, sendo que quanto mais tempo suas tensões de operação não são respeitadas, maiores as chances de falha destes equipamentos. O tempo que cada equipamento pode se manter fora da sua faixa normal de operação também pode mudar, sendo que, para este trabalho, será utilizado o tempo de 1s, o qual já é utilizado atualmente como limitante no algoritmo de controle de tensão utilizado pela empresa e que foi obtido através de experimentos realizados anteriormente pela própria empresa. Estes limites de tempo e tensão tornam-se então, o primeiro requisito deste projeto, para que os algoritmos aqui avaliados se tornem realmente possíveis candidatos a serem utilizados em operações reais.

Além da qualidade da resposta do algoritmo, como o tempo de resposta e a atenuação das perturbações, o tempo de sintonia também pode ser considerado um elemento importante quando se escolhe um algoritmo para este tipo de aplicação. Por vezes há a necessidade de que a sintonia do controlador do regulador seja feita na locomotiva à qual será aplicada, isto gera gastos tanto para a empresa que fabrica o equipamento, quanto para o cliente, pois necessita que a locomotiva fique parada para a realização dos testes.

O tempo de processamento também é uma informação importante para este tipo de algoritmo. Diversas arquiteturas de microcontroladores podem ser utilizadas em reguladores digitais, portanto, devem ser levadas em conta tais características para a escolha correta de tal algoritmo. O equipamento atual que controla o alternador, em que serão avaliados os algoritmos, possui um tempo limitado para a execução do controlador. O algoritmo deve possuir um tempo de execução compatível com esta mesma aplicação, em

que o laço de controle ocorre a cada 1 milissegundo (ms). Durante este tempo, o processador ainda deve lidar com outras etapas como aquisição e filtragem dos sinais, tais como a tensão e corrente de excitação, e tensão e corrente de saída do alternador. A figura 1.2 apresenta um diagrama em blocos das funções do equipamento (em cinza claro) com suas principais conexões externas, evidenciando a malha de controle (em cinza escuro), objeto de estudo deste trabalho. Tais dados são essenciais para manter a malha de controle ativa (leitura da tensão de saída do alternador) e proteger o alternador, o controlador e os sistemas atrelados ao alternador contra sobrecorrentes, ou possíveis curto-circuitos. Ainda, o equipamento deve realizar a atualização dos atuadores e gerenciar a comunicação com outros equipamentos, como o motor diesel e o controlador da locomotiva. Todas essas tarefas diminuem o tempo disponível para a execução do algoritmo de controle, sendo este limitado a  $250\mu\text{s}$ . Vale ressaltar que o equipamento possui um microcontrolador RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), operando à 88 MHz, para efetuar os cálculos necessários sem unidade de ponto flutuante. Portanto, devido à esta restrições de tempo, algoritmos com abordagens *on-line* complexas se tornam inviáveis.

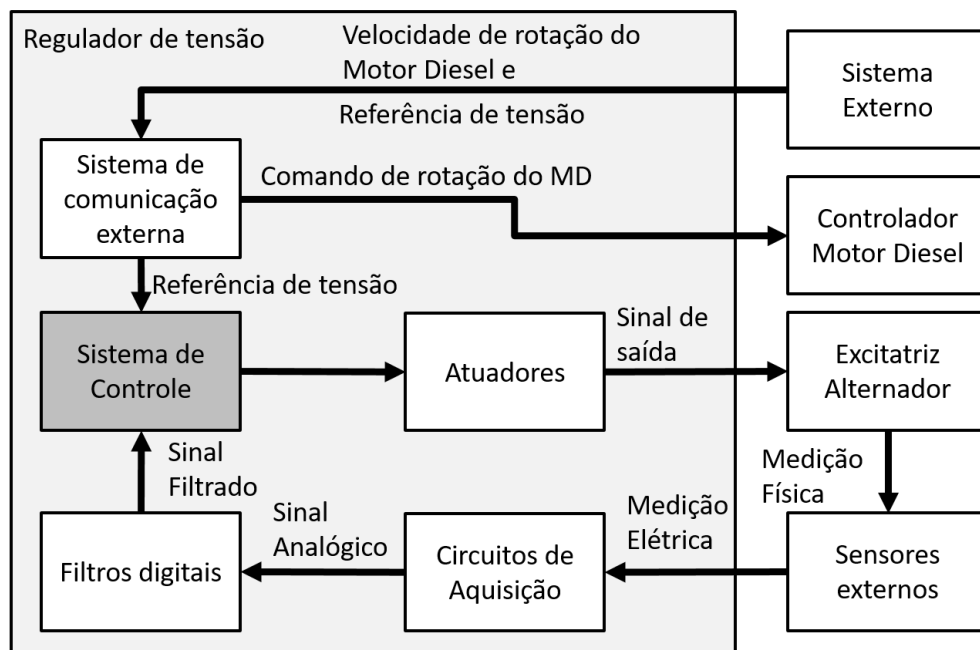


Figura 1.2: Diagrama em blocos do controlador

Em algoritmos utilizados para o controle de tensão de alternadores aplicados à locomotivas, devem ser avaliadas as respostas dos controladores em relação ao sobressinal, tempo de estabilização, tempo de subida, erro em regime e, como já citado, tempo de sintonia. Tais critérios visam auxiliar a avaliação de algoritmos para este tipo de aplicação, além disso, o tempo de execução também é importante, para que sejam respeitadas as restrições do sistema utilizado neste trabalho.

Além dessas características, o algoritmo deve lidar com as mudanças de rotação do alternador, as quais mudam bruscamente o comportamento do sistema, e repentinas alterações nas cargas do alternador, peculiares às locomotivas, como, por exemplo, carga da bateria, acionamento dos ventiladores e compressores, acionamento de luzes, válvulas e contadores, entre outros. Portanto, os algoritmos devem se adaptar a este tipo de situação, além de manter a simplicidade para que sejam implementados em plataformas de hardware distintas, e flexíveis o bastante para serem utilizados em alternadores de construção e tamanhos diferentes.

Como já citado anteriormente, não foram encontrados, no estudo bibliográfico realizado, trabalhos que utilizem modelos matemáticos de alternadores que consideram a velocidade de rotação do alternador como parâmetro para o ajuste de algoritmos de controle. Apenas modelos simples, que consideram velocidades de rotação nominais, foram utilizados nestes trabalhos.

Um levantamento bibliográfico mostrou que vários são os algoritmos utilizados no controle de tensão de alternadores, porém, nenhum trabalho foi encontrado com aplicação em locomotivas e que considerem a variação da velocidade de rotação do alternador. Portanto, para a solução do problema, é proposto um estudo dos algoritmos mais utilizados pela literatura, os quais serão comparados com a abordagem escolhida segundo uma métrica especificada no capítulo de metodologia. Deste modo, será possível avaliar e verificar o desempenho de um algoritmo e avaliar sua capacidade em melhorar a resposta atual do sistema, levantando possíveis restrições em sua aplicabilidade.

## **1.3 Objetivos**

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### **1.3.1 Geral**

O objetivo geral deste trabalho é identificar e avaliar algoritmos de controle de regulação de tensão de alternadores com rotação variada, comparando-os através de métricas pré-definidas em simulações e em uma aplicação real, propondo uma solução com melhor custo benefício que vise atender aos pré-requisitos do sistema (sobressinal máximo da resposta, tempo de processamento curto, abaixo de 250  $\mu$ s).

### **1.3.2 Específicos**

Os objetivos específicos são apresentados a seguir.

- Propor, analisar e validar um modelo matemático de um alternador que considere alterações na rotação (alternador de rotação variada) para ser utilizado nas simulações dos algoritmos de controle.
- Definir métricas de comparação entre algoritmos de controle.
- Comparar as duas técnicas de controle mais citadas na literatura através de simulações e tomando como base as métricas previamente definidas.
- Desenvolver e implementar um algoritmo baseado na técnica que obteve melhor resultado nas comparações feitas utilizando as simulações.
- Testar o algoritmo no equipamento já utilizado pela empresa, respeitando as limitações de tempo de processamento ( $250\mu s$ ) impostas por esse equipamento, utilizando um alternador real com diferentes tipos de cargas.
- Analisar os resultados do algoritmo testado, comparando-os com os algoritmos já utilizados atualmente pelo sistema de controle de tensão da empresa, considerando tanto as métricas de comparação já definidas, como também seu tempo de sintonia.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

No restante deste trabalho, serão apresentados, no capítulo 2, alguns conceitos introdutórios para auxiliar no melhor entendimento do tema proposto neste projeto. Em seguida, a metodologia utilizada na pesquisa do tema e no decorrer do trabalho serão vistas no capítulo 3. Já, no capítulo 4, o desenvolvimento do projeto é apresentado, onde o levantamento dos algoritmos mais utilizados na literatura é realizado, a análise e validação do modelo do alternador são demonstrados e os critérios de comparação dos algoritmos são descritos. Os resultados obtidos através da comparação entre os algoritmos estudados e o controlador já utilizado pela empresa são apresentados no capítulo 5. O capítulo 6 expõe as discussões e conclusões do trabalho, e alguns comentários sobre trabalhos futuros são realizados. Por fim, os apêndices A e B apresentam, respectivamente, os códigos desenvolvidos na ferramenta Matlab para a simulação dos algoritmos de controle e as tabelas dos dados do levantamento da resposta dos alternadores real e simulado.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo os conceitos requeridos para o entendimento do trabalho serão apresentados. Estes conceitos serão divididos em subíndices para facilitar sua compreensão. Primeiramente, serão apresentados alguns conceitos introdutórios sobre reguladores de tensão, seguido dos conceitos básicos de alternadores. Em sequência, serão expostos os conceitos básicos sobre os algoritmos e controladores estudados no trabalho. Estes conceitos possuem relação direta com o projeto de dissertação, auxiliando o leitor no melhor entendimento dos assuntos aqui explorados.

### 2.1 Conceitos Introdutórios

Reguladores automáticos de tensão, ou em inglês, *Automatic Voltage Regulator* (AVR), são dispositivos responsáveis pelo controle de tensão de um sistema. Eles são amplamente utilizados, tanto para o controle de tensão de geradores síncronos, quanto assíncronos, podendo também ser utilizados em conjunto com outros dispositivos para garantir ainda mais a estabilidade de tensão no sistema.

Os AVRs consistem basicamente de três funções principais, como se pode ver na figura 2.1:

- Medição da tensão de saída do gerador;
- Cálculo da malha de controle;
- Excitação, ou atuação, sobre o gerador;

A primeira estrutura, o “cérebro”, é responsável pela medição, pelo cálculo através da malha de controle, e pela geração do sinal PWM (*Pulse-Width Modulation*), o qual é responsável por chavear algum tipo de dispositivo, seja um MOSFET, ou IGBT (*Insulated-gate Bipolar Transistor*) [Khanna, 2003], ou Tiristor [Barbi, 2006].

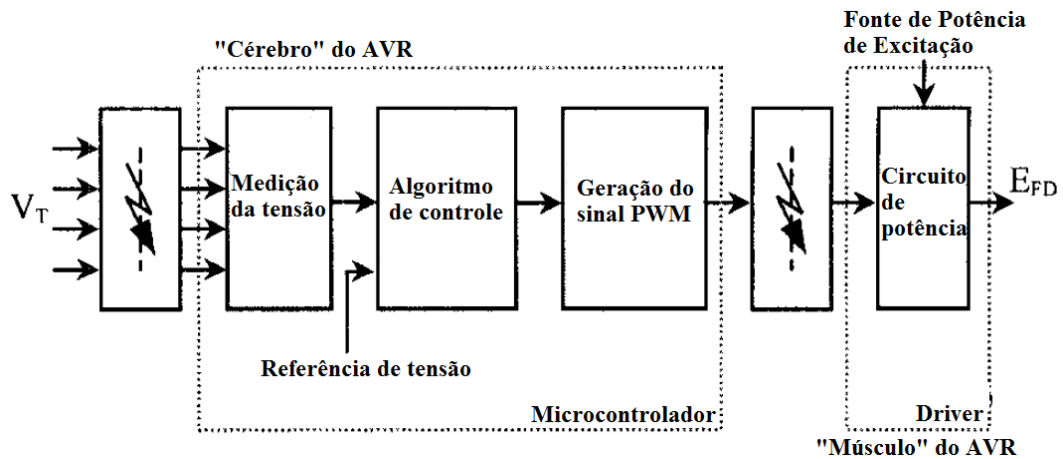


Figura 2.1: Principais funções do AVR

Estes dispositivos, também conhecidos como o “músculo”, ou fonte de excitação do AVR, são responsáveis por gerar o sinal que excita o campo do alternador, que, por sua vez, controla a tensão, potência e corrente da saída do alternador.

Quando o alternador, que se deseja controlar a tensão, possui grande potência de saída, normalmente, outro alternador menor é utilizado para que seja possível excitá-lo. Um exemplo desta estrutura pode ser visto na figura 2.2. Isto causa um atraso grande na resposta do sistema o qual deseja-se controlar, pois é necessário esperar a resposta dos dois alternadores para que uma alteração na entrada seja reproduzida na saída.

Os primeiros AVRs eram todos analógicos, onde uma variedade de tipos de circuitos podia ser encontrada, desde resistores e indutores, até circuitos acionados via relés. Com o passar dos anos, com o avanço da eletrônica e dos circuitos de potência, cada vez mais circuitos a base de tiristores foram utilizados. Este último sendo utilizado até hoje. Estes primeiros AVRs, também conhecidos como AVRs analógicos, implementavam, em sua maioria, circuitos que se comportavam como controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) [McArdle et al., 2001], como visto na figura 2.3.

Este tipo de AVR é muito eficiente para sistemas em que não há diferença entre os tipos dos alternadores, por exemplo, em locomotivas fabricadas em grande escala. Contudo, caso haja uma troca de alternador da locomotiva, ou se este tenha que ser reparado, as pequenas diferenças advindas dessas situações podem tornar estes reguladores pouco eficientes. Além disso, esta abordagem é pouco flexível, já que qualquer alteração não prevista no sistema resultará na troca de todo o regulador [Park et al., 2009]. Sendo por vezes necessário realizar estudos para estimar quais mudanças serão realizadas no regulador, o que gera alto custo de tempo e financeiro. Outro ponto importante é a durabilidade destes reguladores. Com o tempo, os componentes eletrônicos dos reguladores

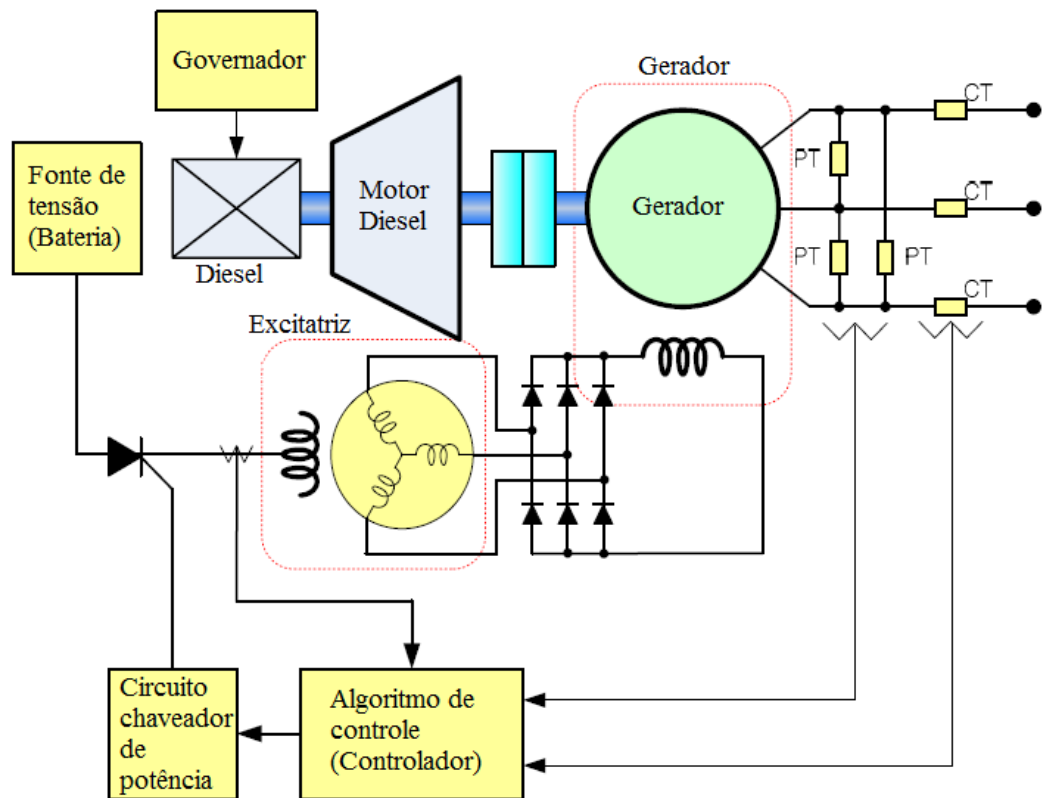


Figura 2.2: Exemplo de circuito de excitação com excitatriz

acabam por alterar suas características, causando erros nas medidas e na regulação da saída [Park et al., 2009].

Com o avanço da tecnologia e principalmente, com o desenvolvimento dos microcontroladores, os AVR's digitais ganharam força. A possibilidade de programar as funções dos AVR's não somente aumentou sua flexibilidade em relação ao sistema, como também possibilitou a implementação de diferentes tipos de controladores, não somente os PID's utilizados anteriormente [Park et al., 2009]. Isto aumentou a robustez do controle dos alternadores, a qual foi necessária devido ao aumento da utilização e da diversidade das cargas atreladas a eles. Hoje, há equipamentos elétricos que, anteriormente, eram puramente mecânicos. A troca por equipamentos elétricos aumenta não só a eficiência como também a vida útil de certos equipamentos. Entre eles podemos citar os ventiladores automotivos, compressores em locomotivas, e etc. Além disso, AVR's digitais são mais baratos, pois demandam menos componentes eletrônicos para serem fabricados, tornando-os cada vez mais vantajosos.

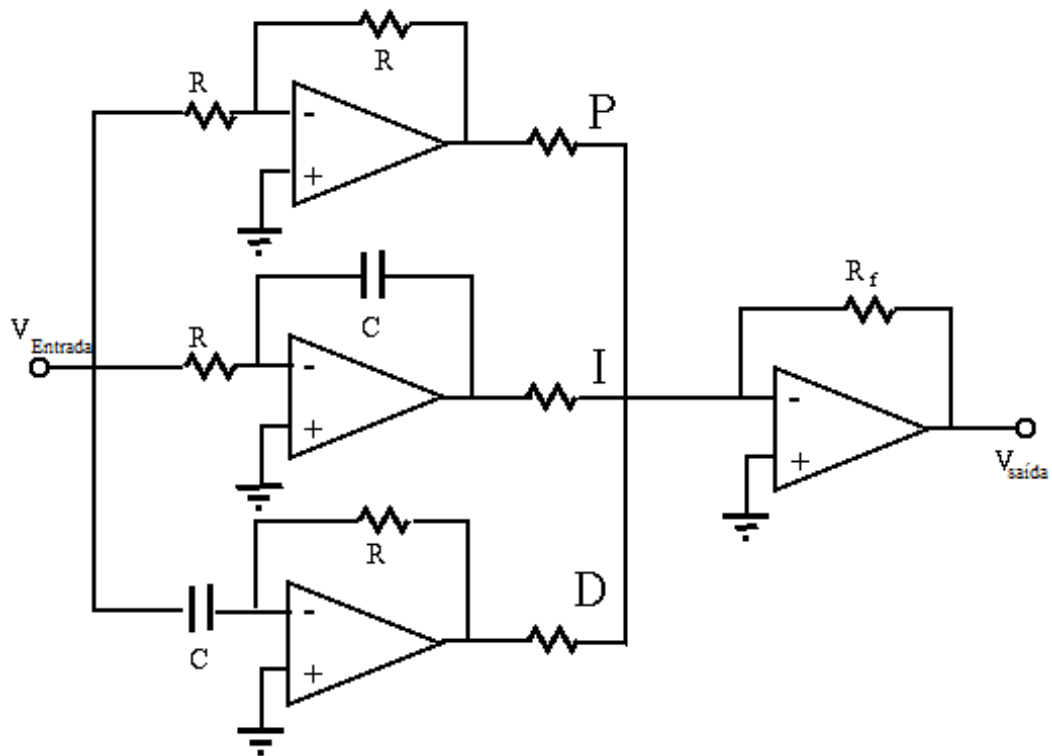


Figura 2.3: Exemplo de um controlador simples PID analógico

## 2.2 Gerador Elétrico

Para que se possa avaliar um possível modelo de gerador o qual será utilizado para testar e validar os algoritmos que se pretende avaliar, primeiramente é necessário realizar uma pequena introdução de como este mecanismo funciona, suas características físicas e diferenças.

Um gerador elétrico é o equipamento que é capaz de transformar energia mecânica em elétrica. A fonte da energia mecânica pode variar desde uma manivela até um motor a combustão [Boldea, 2016]. Existem vários tipos e modelos de geradores, dos quais pode-se destacar os geradores síncronos, os quais possuem grande utilização em usinas termoelétricas, hidrelétricas, locomotivas, entre outras aplicações.

Os geradores síncronos são chamados dessa forma devido a sua velocidade de rotação constante sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada aplicada em seus terminais, ou seja, devido ao movimento de rotação síncrono entre o campo girante e o rotor (sincronismo entre campo do estator e rotor). Os geradores síncronos são divididos em duas grandes partes, o Rotor (campo), e o estator (armadura), como pode-se verificar na figura 2.4.

O rotor é a parte girante do gerador, que pode ser constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto em um enrolamento constituído de con-



da sua circunferência e posicionados em ranhuras [Boldea, 2016]. Os enrolamentos do estator geram um sistema de tensões alternadas trifásicas.

Pelo estator circula toda a energia elétrica gerada, sendo que tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam são bastante elevadas em relação ao campo (rotor), que tem como função apenas produzir um campo magnético para "excitar" a máquina de forma que seja possível a indução de tensões nos terminais dos enrolamentos do estator [Boldea, 2016].

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento do Gerador Síncrono

O primeiro passo para que o gerador possa transformar a energia mecânica em elétrica é ter uma aplicação de torque e rotação do eixo o qual está acoplado o rotor do gerador. A velocidade de rotação, juntamente com o número de polos do gerador dirá qual a frequência da tensão trifásica gerada através dos terminais do gerador. A frequência pode ser calculada através da seguinte fórmula [Electricians, 2007].

$$f = \frac{(RPM * p)}{120} \quad (2.1)$$

Onde ( $p$ ) é o número de polos do gerador, ( $RPM$ ) é a rotação do gerador em rotações por minuto, e ( $f$ ) é a frequência em Hz. Em geradores síncronos acoplados à rede elétrica, a frequência da rede deve ser respeitada para que possa haver a sincronia entre o gerador e a rede. Caso pouco comum quando se trata de aplicações em locomotivas, pois normalmente há apenas uma fonte geradora de tensão em uma mesma saída [Jackson, 2014].

Além da rotação do eixo do gerador, é necessário que seja aplicada uma corrente no enrolamento do campo localizado no rotor do gerador. Esta corrente gera um campo magnético nos polos do rotor que através do movimento relativo com os condutores dos enrolamentos do estator, induzem neles um campo magnético que varia no tempo, criando assim, uma variação de tensão em seus terminais [Jackson, 2014].

A figura 2.5 explica como a variação de tensão ocorre ao longo do tempo. Verifica-se que a tensão é máxima quando o campo magnético gerado pelo enrolamento do rotor está alinhado com o enrolamento do estator [Jackson, 2014].

Devido a esse movimento relativo entre o campo magnético dos polos do rotor, a intensidade do campo magnético que atravessa os enrolamentos do estator irá variar no tempo, e assim teremos pela lei de *Faraday* uma indução de tensões aos terminais dos enrolamentos do estator. Devido à distribuição e disposição espacial do conjunto de enrolamentos do estator, as tensões induzidas aos seus terminais serão alternadas trifásicas [Jackson, 2014].

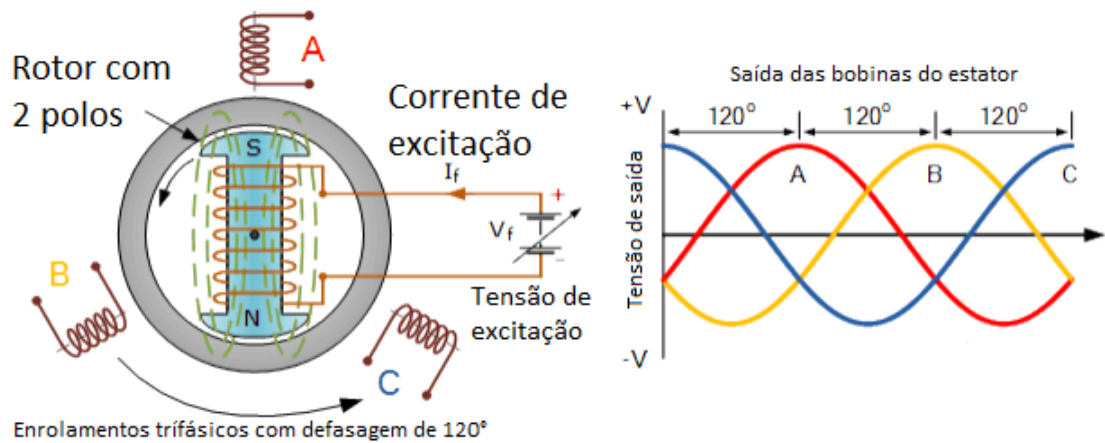


Figura 2.5: Funcionamento Gerador [Jackson, 2014]

A corrente elétrica utilizada para alimentar o campo (enrolamento do rotor) é denominada corrente de excitação. Quando o gerador está funcionando de forma isolada de um sistema elétrico (ou seja, o sistema estará sendo alimentado exclusivamente pelo gerador síncrono) a forma de onda e a frequência da tensão deste sistema "ilhado" serão ditados pelo gerador e a excitação do campo irá controlar diretamente a tensão elétrica gerada. Quando o gerador está conectado a um sistema/rede elétrica que possui diversos geradores interligados, a excitação do campo irá controlar a potência reativa que a máquina vai entregar ao sistema podendo eventualmente controlar indiretamente a tensão local [Jackson, 2014].

A lei de *Faraday* explica como é gerada a tensão nos enrolamentos do estator pelo campo magnético [Nussenzveig, 2006]. A força eletromotriz, dada em (V), que é gerada através da variação do campo magnético uniforme passando por uma bobina fina pode ser escrito como:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Onde ( $\phi$ ) é o fluxo magnético, o qual pode ser representado pela seguinte equação:

$$\phi = p \cdot B \cdot A \cdot \cos\theta \quad (2.3)$$

Onde ( $p$ ) é o número de polos do gerador, ( $B$ ) é a intensidade do campo magnético, ( $A$ ) é a área por onde passa o fluxo magnético e ( $\theta$ ) é a orientação relativa entre a área e o campo [Nussenzveig, 2006]. No caso dos geradores, como a bobina está em constante movimento giratório:

$$\theta = \omega t \quad (2.4)$$

Onde ( $\omega$ ) é a velocidade angular da bobina do campo, ou seja, a velocidade de rotação do gerador [Nussenzveig, 2006]. Portanto de (2.2), (2.3) e (2.4), tem-se:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}N.B.A.\cos(\omega t) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = \omega.N.B.A.\sin(\omega t) \quad (2.6)$$

De ( 2.6 ) pode-se verificar que a tensão produzida pelo gerador depende não somente do número de polos, ou do tamanho dos seus enrolamentos, mas também da sua velocidade de rotação [Nussenzveig, 2006].

## 2.2.2 Modelo Matemático do Gerador Síncrono

O modelo matemático de um gerador síncrono pode ser representado por modelos de segunda, terceira, quinta e sétima ordem. Sendo este último o mais complexo deles e que descreve o gerador de forma mais precisa [Spoljaric et al., 2010].

O modelo de sétima ordem é utilizado para analisar o comportamento dinâmico do gerador quando em condições normais e em condições de falha. Já o modelo de quinta ordem negligencia as componentes de corrente contínua do estator e as componentes de corrente alternada dos enrolamentos do rotor. Este modelo é utilizado principalmente para o estudo dos transientes de estabilidade do gerador [Spoljaric et al., 2010].

O modelo de terceira ordem é de maior interesse para o estudo dos sistemas de controle do gerador. Tal modelo não considera possíveis desvios de frequência, grandes harmônicas e os amortecimentos dos enrolamentos. Este modelo de terceira ordem é muito utilizado para análise e síntese de sistemas de controle devido a boa descrição dinâmica do gerador [Spoljaric et al., 2010].

O modelo de segunda ordem é o mais simples dos modelos de gerador, o qual descreve apenas a dinâmica do rotor se movendo.

Para que possa se entender melhor como os modelos matemáticos são obtidos, é necessário que se tenha em mente qual o circuito equivalente de um gerador síncrono [Spoljaric et al., 2010]. A figura 2.6 mostra como este circuito pode ser representado.

O circuito apresentado pela figura 2.6 representa o circuito equivalente por fase do gerador síncrono. Este liga o estator com os enrolamentos do rotor. Os principais elementos do circuito são as resistências do estator e do rotor ( $R_s$ ,  $R_f$ ), indutâncias do estator e rotor ( $L_{1s}$ ,  $L_{1f}$ ), tensão (estator) de saída ( $V_s$ ), tensão de excitação ( $V_f$ ), correntes

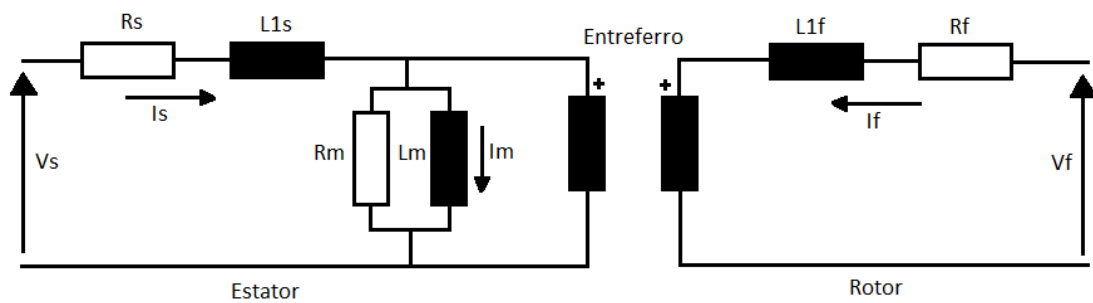


Figura 2.6: Circuito equivalente do gerador síncrono [Spoljaric et al., 2010]

do estator e campo (rotor) ( $I_s$ ,  $I_f$ ), resistência relativa às perdas do núcleo ( $R_m$ ), corrente de magnetização ( $I_m$ ) e indutância de magnetização ( $L_m$ ) [Spoljaric et al., 2010].

A biblioteca *SimPowerSystem* implementada na ferramenta *Simulink*, possui dois dos modelos citados anteriormente. O modelo padrão ou *standard/fundamental*, que representa o gerador com um modelo de sétima ordem, e o simplificado (*simplified*), de terceira ordem [Spoljaric et al., 2010]. Ambos possuem tanto o modelo elétrico quanto mecânico do gerador, sendo diferenciados pelas simplificações que são consideradas no modelo de terceira ordem.

Ambos os modelos possuem duas entradas, uma mecânica, a qual pode ser através de uma velocidade de rotação ou de uma entrada de potência mecânica, e a outra entrada a tensão de excitação do campo do gerador. Além destas entradas, os modelos ainda possuem uma saída de tensão trifásica, e uma saída de medição que permite analisar vários sinais do gerador, como, por exemplo, a corrente de excitação do gerador, a tensão de saída do gerador, etc. As figuras representativas dos modelos são apresentadas na figura 2.7.

A fim de melhor entender o comportamento de cada um dos modelos, foi feita uma pesquisa na própria ferramenta de busca do software.

Em [Mathworks, 2016b], é apresentado o modelo matemático utilizado pelo modelo padrão (*standard/fundamental*) da biblioteca *SimPowerSystem*. Segundo [Mathworks, 2016b], o modelo mecânico utilizado em ambos os blocos (de terceira e sétima ordem) é idêntico, o que os diferencia é o modelo elétrico.

As equações do modelo elétrico são obtidas aplicando a lei de *Kirchoff* para todos os enrolamentos. A fim de calcular corretamente as quedas de tensão indutivas nos enrolamentos, o fluxo magnético total dos enrolamentos precisa ser avaliado. Isso pode ser realizado através de uma matriz de indutâncias, que relaciona todos os fluxos dos enrolamentos com todas as correntes dos enrolamentos. A partir disso, pode-se obter uma matriz de indutâncias que depende da posição atual do rotor. Essa dependência deve-se



Figura 2.7: Modelos Geradores *SimPowerSystem*

à forma com que o gerador é construído, ou seja, há sempre uma direção onde o fluxo magnético é mais importante. Essa direção coincide com a direção do fluxo produzido pelos enrolamentos do campo, e essa direção é definido como eixo d. O eixo q é então posicionado à 90 graus do eixo d (na direção anti-horária). Sendo assim, a posição do rotor pode ser expressada pelo ângulo formado pela posição do eixo magnético da armadura e o eixo q do rotor [Jadric, 1998].

A dependência da matriz de indutâncias pela posição do rotor é a principal dificuldade da modelização de um gerador. Uma solução para isso é trocar o sistema de referência onde as variáveis do gerador são apresentadas. Até então, o sistema de referência que intuitivamente se utiliza é o estacionário, ou também conhecido como abc. Dessa forma, as variáveis são apresentadas como elas realmente são medidas no gerador, porém essas variáveis variam com o tempo (sendo que  $\theta$  é uma função no tempo, já que o gerador está em constante movimento). Sendo assim, o único sistema de referência que torna os parâmetros do gerador constantes é o do rotor, ou também chamado de *dq*. Neste sistema, todas as variáveis são expressas na forma como se um observador que estivesse posicionado no rotor as medisse. A transformação do sistema de referência abc para o *dq* é dado pela seguinte matriz de transformação:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \text{sen}\theta & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{cos}\theta & \text{cos}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{cos}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A transformação inversa (de *dq* para abc) é dado por:

$$T_{inv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

No bloco *standard/fundamental* o referencial utilizado no modelo elétrico é o  $dq$  (o qual foi apresentado acima) e o modelo utilizado pode ser visto pela figura 2.8.

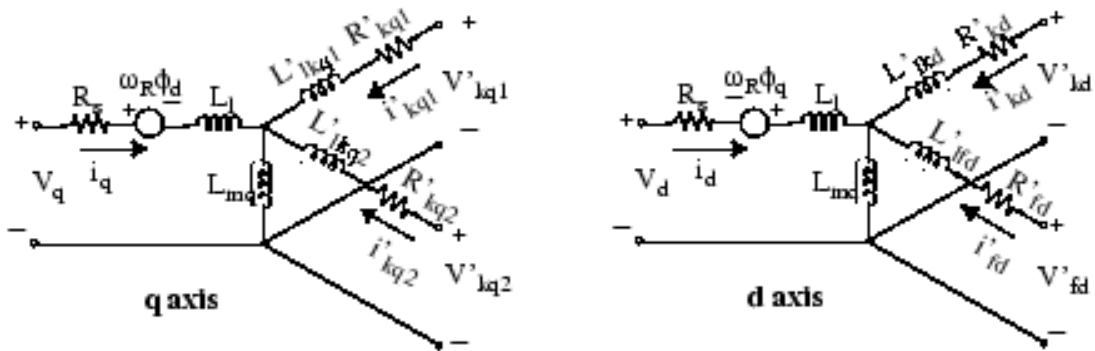


Figura 2.8: Modelo elétrico bloco standard/fundamental [Mathworks, 2016a]

As equações que definem esse modelo são as seguintes:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}(\phi_d - \omega_R \phi_q) \quad (2.9)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}(\phi_q - \omega_R \phi_d) \quad (2.10)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt}(\phi'_{fd}) \quad (2.11)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt}(\phi'_{kd}) \quad (2.12)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt}(\phi'_{kq1}) \quad (2.13)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt}(\phi'_{kq2}) \quad (2.14)$$

$$\phi_d = L_d i_d + L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd}) \quad (2.15)$$

$$\phi_q = L_q i_q + L_{mq}(i'_{kd}) \quad (2.16)$$

$$\phi'_{fd} = L'_{fd}i'_{fd} + L_{md}(i_d + i'_{kd}) \quad (2.17)$$

$$\phi'_{kd} = L'_{kd}i'_{kd} + L_{md}(i_d + i'_{fd}) \quad (2.18)$$

$$\phi'_{kq1} = L'_{kq1}i'_{kq1} + L_{mq}i_q \quad (2.19)$$

$$\phi'_{kq2} = L'_{kq2}i'_{kq2} + L_{mq}i_q \quad (2.20)$$

Onde  $V_d$  e  $V_q$  são as tensões de saída dos enrolamentos do estator.

Pode-se perceber, através das equações apresentadas acima, que a velocidade de rotação ( $\omega_R$ ) do gerador é uma das variáveis das quais influenciam na tensão dos enrolamentos do estator. Isso demonstra, como comentado anteriormente, que tal modelo pode ser indicado para o estudo da regulação de tensão de saída do gerador com variação de rotação do gerador.

Ao contrário do modelo de sétima ordem apresentado anteriormente, há pouca informação disponível sobre o modelo de terceira ordem existente na ferramenta *Simulink* do *Matlab*. Portanto, um experimento para decidir qual modelo é o mais indicado para ser utilizado no trabalho faz-se necessário.

## 2.3 Algoritmos de Controle

### 2.3.1 Algoritmo Genético (GA)

O algoritmo genético se baseia nos processos de evolução natural. A ideia é utilizar o poder da evolução para resolver problemas de otimização. O proponente dos algoritmos genéticos foi John Holland, que os desenvolveu no início dos anos 70 [Winter et al., 1996].

O Algoritmo Genético, em inglês *Genetic Algorithm* (GA), é um algoritmo de busca heurístico adaptativo baseado nas ideias evolucionistas da seleção natural. Embora, aleatórios, algoritmos genéticos exploram as informações históricas para direcionar a busca para as regiões de melhor desempenho no espaço de busca. As técnicas básicas do GA são projetadas para simular processos nos sistemas naturais necessários para a evolução, principalmente aqueles que seguem os princípios de Charles Darwin (“Sobrevive o mais forte”). Como na natureza, onde os indivíduos competem pelos recursos necessários para a sobrevivência, os mais fortes, ou adaptados, têm mais oportunidade para

transmitir o seu material genético para as gerações subsequentes do que os mais fracos [Winter et al., 1996].

GA simula a sobrevivência dos indivíduos mais adaptados sobre consecutivas gerações para resolver um problema. Cada geração consiste em uma população de indivíduos, que são análogos a cromossomos. Cada indivíduo representa um ponto no espaço de busca, e por consequência, uma possível solução.

O algoritmo genético é baseado em uma analogia com a estrutura genética e comportamento dos cromossomos em uma população de indivíduos utilizando os seguintes fundamentos:

- Indivíduos em uma população competem por recursos;
- Esses indivíduos que ganham essa competição irão se reproduzir e desenvolver;
- Genes dos melhores indivíduos se propagam pela população ao ponto que dois bons pais irão produzir, às vezes, filhos melhores que eles próprios;
- Com isso, cada geração irá se tornar mais adaptada ao ambiente;

Uma população de indivíduos é mantida dentro de um espaço de busca para o GA, cada um representando uma possível solução para um dado problema. Cada indivíduo é codificado com um vetor de tamanho finito de variáveis, que são representadas a partir de um alfabeto, normalmente binário 0, 1. Continuando a analogia com a genética, os indivíduos são os cromossomos, e as variáveis são os genes. Sendo assim, um cromossomo (solução) é composto por vários genes (variáveis). Um valor de avaliação, ou *fitness*, é dado para cada solução representando a habilidade de um indivíduo competir. O GA visa produzir gerações melhores que as gerações passadas, fazendo com que sua população evolua, e chegue cada vez mais próxima da solução ótima.

A execução de um algoritmo genético pode ser dividida em quatro etapas:

- Uma população inicial é gerada aleatoriamente;
- Seleção dos melhores indivíduos que irão se reproduzir;
- *Crossover* que representa a reprodução dos pais;
- Mutação que introduz modificações aleatórias;

Estas etapas serão detalhadas nos itens a seguir.

## Seleção

A ideia chave é dar preferência para os melhores indivíduos, permitindo que eles passem seus genes para a próxima geração. A avaliação de cada indivíduo é feita a partir da função de *fitness*. Existem várias maneiras de realizar a seleção dos melhores indivíduos que serão escolhidos como pais, entre eles destacam-se seleção por roleta, por classificação e ainda seleção por truncamento. A seleção por roleta é um sorteio entre os indivíduos onde o indivíduo mais adaptado (melhor *fitness*) tem mais chance de ser sorteado do que o menos adaptado (menor *fitness*). As probabilidades do sorteio são proporcionais à razão entre a adequação do indivíduo e a soma das adequações de todos os indivíduos da população. A escolha é então feita aleatoriamente respeitando essas probabilidades. A seleção por classificação é semelhante a seleção por roleta com a diferença que as probabilidades de seleção dos indivíduos variam de acordo com a sua posição na ordenação em relação aos outros indivíduos, e não em relação ao seu *fitness*. Já a seleção por truncamento é a simples escolha dos N melhores indivíduos, excluindo os demais.

## Crossover

O operador *crossover* é o principal fator que diferencia o GA das outras técnicas de otimização. Dois indivíduos são escolhidos de uma população utilizando o operador de seleção. A região que será feita o *crossover* sobre o cromossomo é escolhida aleatoriamente. Os valores dos dois cromossomos são então trocados no ponto escolhido. Caso  $S_1=000000$  e  $S_2=111111$  e o ponto de *crossover* escolhido foi 2, então  $S_1'=110000$  e  $S_2'=001111$ . Os dois filhos ( $S_1'$  e  $S_2'$ ) criados são então colocados na próxima geração da população. Recombinando as porções de bons indivíduos, é possível que os indivíduos criados a partir desses sejam ainda melhores.

## Mutação

Com baixa probabilidade, uma porção de um novo indivíduo pode ter seus bits invertidos. Isso é feito para manter a diversidade na população e inibir convergências prematuras (mínimos locais). Mutações induzem uma caminhada aleatória pelo espaço de busca. Após apresentado as etapas do algoritmo genético, é possível concluir que, através dos operadores de seleção, *crossover* e mutação, o GA tenderá a convergir, através de várias gerações, para uma solução melhor que a anterior. Como a população contém muito mais informação comparado com um indivíduo apenas, GA combina as boas informações guardadas em uma solução, com as boas informações de outra solução, produzindo novas

soluções com boas informações vindas de seus pais, levando a uma solução melhor e mais próxima da ótima.

### 2.3.2 Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

A otimização por enxame de partículas, em inglês, *Particle Swarm Optimization* (PSO) é uma técnica de otimização, desenvolvida em 1995, inspirada pelo comportamento do voo em bando das aves, [Hu, 2006].

PSO compartilha várias semelhanças com outras técnicas evolucionárias de computação como o Algoritmo Genético, por exemplo. O sistema é inicializado com uma população de soluções randômicas e procura pela melhor solução atualizando as gerações. Entretanto, ao contrário do Algoritmo Genético, a Otimização por Enxame de Partículas não possui operadores como *crossover* e mutação. No PSO, as potenciais soluções, também chamadas de partículas, voam sobre o espaço do problema seguindo sempre a melhor partícula.

As vantagens do PSO, comparado com o GA, são que o PSO é mais fácil de ser implementado e existem poucos parâmetros a serem ajustados.

No algoritmo de otimização por enxame de partículas, cada solução é um “pássaro” no espaço de procura, ou partícula. Todas as partículas possuem um valor de avaliação, ou também chamado valor de *fitness*, que é obtida pela função de avaliação, ou função de *fitness*, e possuem também velocidades que direcionam o “voo” das partículas.

PSO é inicializado com um grupo de partículas randômicas (soluções) e então procura a solução ótima atualizando as gerações. A cada iteração, cada partícula é atualizada seguindo dois “melhores” valores. O primeiro é a melhor solução (*fitness*) que tal partícula conseguiu alcançar até o momento, este valor é chamado de *pbest*. Outro “melhor” valor que é guardado pelo algoritmo é o melhor valor obtido por qualquer uma das partículas até o momento, este valor é chamado de *gbest*, ou também, melhor valor global. Quando uma partícula se junta à população, o melhor valor é um melhor valor local, também chamado de *lbest*.

Após encontrar os dois melhores valores, a partícula atualiza sua velocidade e posição seguindo as seguintes equações:

$$V = V + c_1 * rand() * (PBEST - ATUAL) + c_2 * rand() * (GBEST - ATUAL) \quad (2.21)$$

$$ATUAL = ATUAL + V \quad (2.22)$$

$V$  é a matriz de velocidade das partículas,  $ATUAL$  é a matriz que guarda as soluções (partículas) atuais.  $PBEST$  e  $GBEST$  são as matrizes que guardam os valores  $pbest$  e  $gbest$  já comentados acima.  $rand()$  é uma função randômica que retorna valores entre (0,1).  $c_1$  e  $c_2$  são os fatores de aprendizado, normalmente  $c_1 = c_2 = 2$ , [Hu, 2006].

### 2.3.3 Controlador PID

Considere o seguinte sistema de malha fechada, apresentado pela figura 2.9.

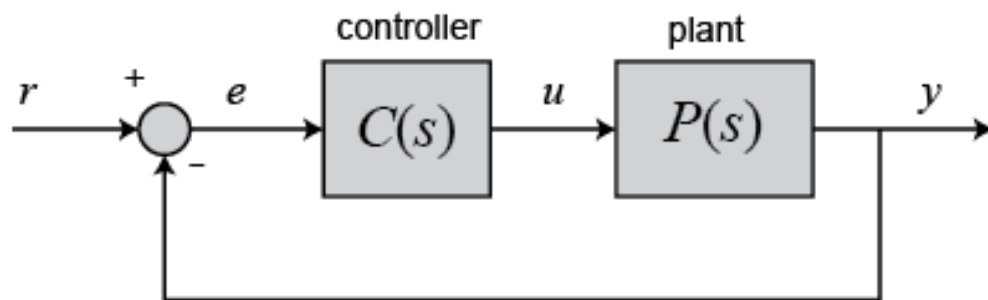


Figura 2.9: Sistema PID em malha-fechada [Matlab, 2016]

A saída do controlador PID no domínio do tempo, pode ser expressa da seguinte forma [Matlab, 2016]:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.23)$$

O controlador PID é a forma mais comum de controlador com *feedback*. Este era um elemento essencial nos primeiros governadores (controladores de injeção de motores a diesel) e se tornou uma ferramenta padrão no controle de processos que emergiu nos anos 40. Em controle de processos, hoje em dia, mais de 95% dos controladores são do tipo PID (sendo, em sua maioria, somente controladores PI) [Astrom, 2002].

Controladores PID são encontrados hoje em todas as áreas de controle sendo um ingrediente importante de sistemas distribuídos. Os controladores também são embarcados em diversos sistemas especializados, responsáveis por controlar um sistema bem específico. O controle PID ainda é também combinado com diferentes tipos de lógicas como, por exemplo, funções sequenciais, seletores, ou ainda simples funções de bloco para construir sistemas de automação complexos utilizados em geração de energia, transporte e na manufatura. Esta versatilidade e facilidade de implementação fez com que esse tipo de controlador fosse implementado, em grande número, em reguladores de tensão microcontrolados, sobrepondo os controladores analógicos clássicos. Esta vasta utiliza-

ção permitiu a evolução deste algoritmo, adquirindo novas formas como, por exemplo, a adaptação contínua, escalonamento de ganho entre outros [Astrom, 2002].

Os parâmetros do controlador são o ganho proporcional  $K_p$ , o ganho integral  $K_i$  e o ganho derivativo  $K_d$ . As parcelas integral, proporcional e derivativa podem ser interpretadas como as ações do controlador baseadas no passado e no presente. Ainda, a parcela derivativa pode ser considerada a parcela preditiva do controlador.

Para o sistema estudado neste trabalho, um controlador proporcional ( $K_p$ ) terá o efeito de reduzir o tempo de subida e irá reduzir o erro em regime. Um controlador integral ( $K_i$ ) terá o efeito de eliminar o erro em regime para uma constante, ou entrada em degrau, mas fará com que a resposta a transientes se torne mais lenta. Um controlador derivativo ( $K_d$ ) reduzirá o sobressinal (*overshoot*), e irá melhorar a resposta a transientes. Os efeitos de cada parâmetro do controlador,  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  em no sistema de malha-fechada, estudado neste trabalho, são apresentados na tabela 2.1 abaixo [Astrom, 2002].

Tabela 2.1: Parâmetros PID

Parâmetro	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de estab.	Erro em regime
$K_p$	Diminui	Aumenta	Pouca mudança	Diminui
$K_i$	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
$K_d$	Pouca mudança	Diminui	Diminui	Não modifica

Essas correlações podem não ser exatamente precisas porque  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são dependentes entre si. Na verdade, a mudança de um dos parâmetros pode mudar o efeito dos outros dois. Portanto, esta tabela só vale como referência para se determinar os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , mas não como regra.

### 2.3.4 Função de *Fitness*

Como visto anteriormente, os algoritmos de otimização como o genético ou o de enxame de partículas utilizam uma função que avalia os parâmetros que são testados pelo algoritmo. Esta função é essencial para que o algoritmo busque a melhor solução do problema em questão.

Muitos trabalhos citam e testam diferentes funções de *fitness* para controladores PID aplicados a regulação de tensão de alternadores entre eles, pode-se citar [Madinehi et al., 2011] [Fermino, 2014] [Yegireddy and Panda, 2014].

No trabalho de [Madinehi et al., 2011], uma comparação entre dois das quatro funções utilizadas na literatura para avaliar o desempenho de controladores PID é apresentada. As quatro funções citadas por [Madinehi et al., 2011] são as seguintes:

- IAE (*Integrated Absolute Error*);

- ISE (*Integrated Square-Error*);
- ITSE (*Integral of Time-Weighted-Squared-Error*);
- Método do *Overshoot*;

Tais métodos possuem suas vantagens e desvantagens. Por exemplo, ISE, ou Integral do Erro Quadrático, tende a diminuir o sobressinal do sistema, porém tende a ter um tempo de estabilização muito longo. Já ITSE, ou Integral do Erro Quadrático multiplicado pelo Tempo, tende a diminuir tanto o sobressinal quanto o tempo de estabilização, porém consome mais processamento para ser calculado. Ainda, o método de sobressinal possui um parâmetro  $\beta$  o qual é difícil de ajustar sem ter muita experiência com a aplicação de tal método [Madinehi et al., 2011]. As funções de avaliação de cada método são apresentadas a abaixo:

$$ITSE = \int te^2(t)dt \quad (2.24)$$

$$W = (1 - e^{-\beta})(M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (2.25)$$

$$IAE = \int |e(t)|dt \quad (2.26)$$

$$ISE = \int e^2(t)dt \quad (2.27)$$

Onde  $e(t)$  é o erro entre a saída e a entrada do sistema,  $t$  é o tempo,  $M_p$  é o sobressinal,  $t_r$  o tempo de subida,  $t_s$  o tempo de estabilização,  $E_{ss}$  o erro em regime e  $\beta$ , como já exposto anteriormente, o parâmetro de ajuste do método.

Na comparação feita por [Madinehi et al., 2011], o método que utiliza o integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo foi o que se saiu melhor para a aplicação em um controlador PID aplicado a um regulador de tensão. Sendo assim, decidiu-se por utilizar tal método como função de avaliação para os algoritmos de otimização que serão comparados neste trabalho.

## 2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os conceitos introdutórios e básicos para o melhor entendimento dos assuntos abordados por este trabalho. Tais conceitos foram apresentados de forma a facilitar a compreensão pelo leitor, também introduzindo certos temas que serão melhor explorados nos itens a seguir. Com estes conceitos definidos, é

possível então apresentar a metodologia utilizada pelo autor durante o trabalho, assunto que será exposto no próximo capítulo.

# Capítulo 3

## Metodologia

Na figura 3.1 é apresentado o fluxo do trabalho desde sua concepção até a elaboração da dissertação, passando por todas as etapas de pesquisa e análise.

O primeiro passo para a realização do projeto foi a definição dos objetivos do projeto. Para isso, foram identificadas as palavras-chaves que auxiliariam na pesquisa de artigos científicos. Estes, por sua vez, tiveram o papel de esclarecer qual o estado da arte atual do tema e aumentar o conhecimento do autor sobre os temas na área de pesquisa. As palavras-chave utilizadas para tal pesquisa foram as seguintes:

- Alternador (*Alternator*);
- Controle de tensão de alternador (*Alternator voltage control*);
- Regulador de tensão automática (*Automatic voltage regulator*);
- Modelo matemático de um alternador (*Alternator mathematical model*);
- Algoritmos de controle de tensão (*Voltage control algorithm*);

As palavras-chaves foram pesquisadas tanto na língua-portuguesa quanto na língua inglesa, sendo a última a principal utilizada na área de pesquisa. Com as palavras-chaves definidas, puderam ser utilizadas as seguintes bases de busca que possuíam uma maior relação com a área de estudo:

- IEEE Xplore [IEEE, 2015];
- Springer Link [Springer, 2015];
- ACM Digital Library [ACM, 2015];

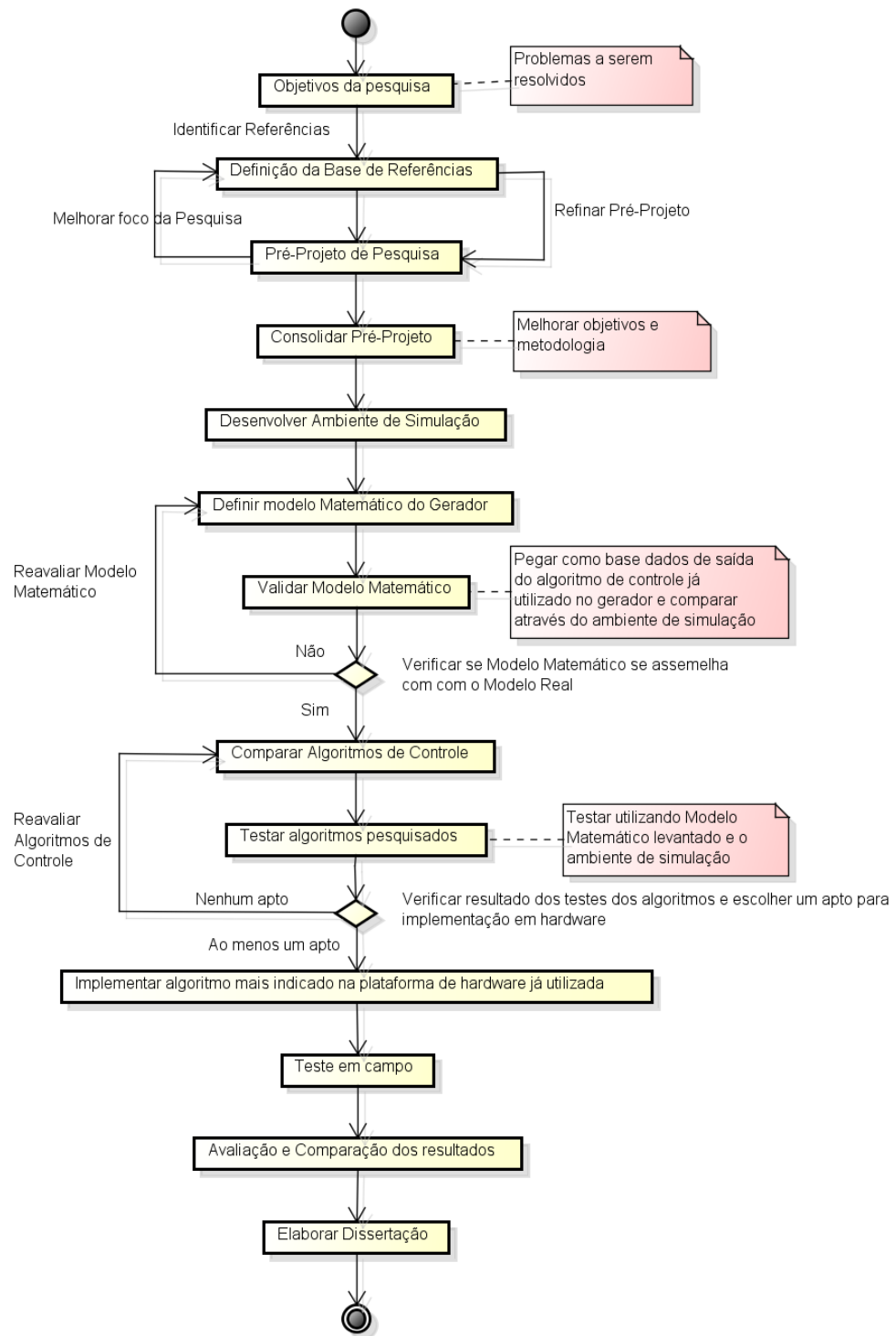


Figura 3.1: Diagrama de blocos que representa o método de pesquisa utilizado para definir e executar o trabalho de mestrado

Nestas bases, foram então pesquisados os artigos os quais possuíam informações relevantes para o trabalho e/ou cujo projeto se assemelhasse com o que este se propõe, ajudando assim a achar as lacunas nesta área de pesquisa. Sendo assim estes

trabalhos serviram como guia e base para o projeto proposto. Após a formação de uma base de trabalhos científicos sólida, pôde-se então definir os objetivos e justificativas deste projeto.

A primeira etapa de desenvolvimento do projeto foi o levantamento dos requisitos e limitações do projeto, sendo o tempo de execução máximo do algoritmo que foi implementado no sistema embarcado o principal deles. Este limite de tempo leva em conta a capacidade do processador, e as outras tarefas que o processador executa além do algoritmo de controle de tensão. Tal algoritmo não poderia afetar as outras funcionalidades do sistema embarcado, sendo que ele teria como entrada as medidas de tensão e corrente do alternador, além da sua rotação, e como saída um sinal PWM para que este fosse utilizado em um *driver* de corrente para excitar o alternador.

Com as limitações do projeto definidas, foram então levantados, com base nos estudos já previamente realizados e em outras bases ainda não exploradas, quais os algoritmos mais citados e utilizados pela literatura na aplicação de regulação de tensão.

Com os algoritmos definidos, a próxima etapa do desenvolvimento do projeto foi a escolha dos critérios que foram utilizados para avaliar o desempenho dos algoritmos. Tais critérios devem contemplar os tempos de resposta dos algoritmos e serem suficientes para justificar a escolha de um ou de outro.

Com os algoritmos e critérios escolhidos, um ambiente de simulação foi ser montado, utilizando a ferramenta *Simulink* do software *Matlab*, para que fosse possível avaliar tais algoritmos através das métricas definidas. Para que o ambiente fosse desenvolvido, uma avaliação dos modelos matemáticos disponíveis foi realizada para definir qual modelo poderia ser utilizado no projeto, para que os resultados fossem o mais próximo do real. Com a comparação feita, o modelo escolhido foi ajustado utilizando a resposta do alternador real o qual foi utilizado nos testes em bancada, permitindo uma aproximação ainda maior entre o ambiente real e simulado.

Após o desenvolvimento do ambiente de simulação, os dois algoritmos mais citados pela literatura foram implementados e testados utilizando o software *Matlab*. O resultado de tais testes puderam ser comparados através das métricas definidas anteriormente durante o trabalho.

Com as comparações feitas, o algoritmo que possuiu a melhor avaliação de acordo com os critérios pré-definidos foi implementado no sistema embarcado, onde foi nele medido seu tempo de processamento. Após este primeiro teste, foram realizados testes em bancada com um alternador e com a mesma carga utilizada na simulação, para facilitar a comparação dos resultados.

Após os ensaios, foram comparados os resultados dos testes do algoritmo escolhido com o algoritmo já utilizado no equipamento pela empresa, podendo então analisar

se o algoritmo proposto gera uma melhor resposta para a regulação de tensão do alternador, respeitando as limitações do sistema de tempo-crítico onde foi implementado.

### **3.1 Conclusão**

Neste capítulo foi apresentada a metodologia que foi utilizada durante o desenvolvimento e experimentos deste trabalho. Tal explicação sobre a metodologia visa preparar o leitor para os próximos capítulos, para que este tenha uma melhor compreensão sobre a sequência deste projeto.

# Capítulo 4

## Desenvolvimento

Este capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do ambiente de simulação utilizado neste trabalho. Além disso, os algoritmos que serão avaliados são definidos através de uma pesquisa na literatura e os critérios que serão utilizados para avaliação destes são apresentados. Resultados da comparação entre os modelos simulados e real que validam o modelo simulado utilizado são apresentados, e o padrão de variação de rotação do alternador é definido para completar o desenvolvimento do ambiente de simulação.

### 4.1 Algoritmos de Controle de Tensão de Alternadores

Um dos objetivos deste trabalho é comparar os dois algoritmos de controle mais citados na literatura. Portanto, para que se possa comparar tais algoritmos, é necessário primeiramente definir quais são estes algoritmos. Sendo assim, foi realizada uma pesquisa na base de busca *IEEE Xplore* [IEEE, 2015] utilizando a palavra-chave *AVR Control Algorithm*, que em português significa algoritmos de controle para reguladores automáticos de tensão.

A busca resultou em 122 trabalhos, dos quais 51 foram identificados como relevantes a esta pesquisa. Dos 51 trabalhos, verificou-se que 38 deles utilizam algum método de otimização para obter os parâmetros ótimos do controlador PID, utilizando então este controlador PID para o controle da tensão do alternador. Dentre os outros 13 artigos, [Jamaan et al., 2004], [Mitra et al., 2007], [Naderi et al., 2007], [Vani et al., 2009] e [Jabbari et al., 2011] apresentaram o controlador *Fuzzy* como solução para o controle de tensão do alternador, [Smith, 1993] e [Fusco and Russo, 2008] apresentaram um controlador adaptativo, [Valizadeh et al., 2008] utilizou um controlador *BELBIC* e [Asama et al., 2002] um controlador  $H_\infty$ , [Finch et al., 1989] e [Finch et al., 1991] utilizaram controladores preditivos, e há ainda trabalhos como os de [Salem et al., 2000] que

utilizou abordagens neurais, e também [Ou et al., 2013] que apresentou uma abordagem híbrida. A tabela 4.1 mostra os dados sobre a pesquisa realizada.

Tabela 4.1: Dados pesquisa algoritmos utilizados

Tipos de algoritmos encontrados	Quantidade de publicações	Porcentagem
Otimização de controlador PID	38	74,51%
Controlador Adaptativo	2	3,92%
Controlador $H_{\infty}$	1	1,96%
Controlador Preditivo	2	3,92%
Controlador Híbrido	1	1,96%
Controlador <i>Fuzzy</i>	5	9,80%
Controlador <i>BELBIC</i>	1	1,96%
Controlador Neural	1	1,96%

Os dados mostram como há uma grande predominância na utilização de técnicas de otimização de controladores PID. Sendo assim, foram também verificadas quais técnicas de otimização eram utilizadas pelos trabalhos. Verificou-se então que, dos 38 trabalhos que utilizaram otimização de controladores PID, [Gaing, 2004], [Karimi-Ghartemani et al., 2007], [Mukherjee and Ghoshal, 2008], [Coelho and Herrera, 2008], [Rahimian and Raahemifar, 2011], [Madinehi et al., 2011], [Nirmal and Auxillia, 2013], [Nangru et al., 2013], [Schaefer and Kim, 2014], [Gozde et al., 2014], [Morsali et al., 2014] e [Kouba et al., 2015b] utilizaram alguma variante do algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) para a otimização dos parâmetros de um controlador PID. Já os trabalhos [Devaraj and Selvabala, 2009], [Kahouli et al., 2009], [Zhang, 2011], [Hasanien, 2013], [Ramya et al., 2013], [Khedr et al., 2013], [Ghouraf and Naceri, 2014], [Mohammed et al., 2014], [Yegireddy and Panda, 2014] e [Yegireddy et al., 2015] fizeram uso de alguma variação de um algoritmo genético para obter a mesma otimização. Ainda, 3 desses 38 trabalhos, [McArdle et al., 2001], [Das and Pan, 2014] e [Dadvandipour et al., 2015], abordaram algoritmos *Fuzzy* para otimização de controladores PID. Dentre os outros 13 trabalhos restantes, [Kouba et al., 2015a], [Mohammadi et al., 2009], [Soedibyo et al., 2015], [Ozturk et al., 2015], [Kumar and Shankar, 2015], [Sahu et al., 2012b], [Mandal et al., 2011], [Majumdar et al., 2014], [Liu et al., 2012], [Sahu et al., 2012a], [Kim et al., 2008], [Kim et al., 2010] e [Priyambada et al., 2014] apresentam outras técnicas de otimização de controladores PID, entre essas técnicas estão o Algoritmo de Busca Gravitacional, ou em inglês, *Gravitational Search Algorithm* (GSA), Inteligência de Partículas, em inglês, *Swarm Intelligence* (SI), entre outros. Tais dados são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados sobre os tipos de otimização de controladores PID

Tipo de Otimização	Quantidade	Porcentagem
Enxame de Partículas	12	31,58%
Algoritmo Genético	10	26,32%
<i>Fuzzy</i>	3	7,89%
Outros	13	34,21%
TOTAL	38	100%

Pode-se concluir, a partir dos dados apresentados acima, que há uma grande variedade de estratégias de controle diferentes aplicados a reguladores de tensão. Porém, como este trabalho possui algumas restrições, principalmente quanto ao tempo de processamento, grande parte desses algoritmos acabam por não serem aptos a serem utilizados. Entre eles pode-se citar os alguns controladores adaptativos, abordagens neurais, e alguns tipos de algoritmos híbridos. Pelo mesmo motivo, excluem-se os algoritmos que preveem o ajuste em tempo real, devido à grande necessidade de processamento para que estes algoritmos, em sua maioria, sejam executados.

Sendo assim, foi decidido por utilizar um controlador PID simples com ajuste *off-line*, ou seja, ajuste em um ambiente simulado e depois aplicado ao alternador real. Este possui baixo nível de complexidade sendo, portanto, adequado aos requisitos deste trabalho. Uma evidência da grande popularidade deste método pode ser vista nos dados apresentados na tabela 4.1. A grande maioria dos trabalhos apresentados na literatura utilizam este tipo de estratégia, que se mostrou muito eficaz nos trabalhos pesquisados, como por exemplo em [Madinehi et al., 2011], [Rahimian and Raahemifar, 2011] e [Gaing, 2004], já apresentados no estudo do estado da arte.

Caso este trabalho não possuísse tais requisitos, outros algoritmos de maior robustez, que não dependem de um grande conhecimento do alternador ao qual serão aplicados, poderiam ser explorados. Isto facilitaria muito o ajuste do controlador, diminuindo ainda mais os custos de comissionamento dos reguladores de tensão. Dentre esses algoritmos, pode-se ressaltar os trabalhos de [Schaefer and Kim, 2014], [Kim et al., 2010] e [Zhang, 2011], onde em [Kim et al., 2010], é utilizado um algoritmo recursivo dos mínimos quadrados para identificar os parâmetros do sistema e assim sintonizar um controlador PID em tempo real. Já em [Zhang, 2011], um regulador de tensão de um alternador marítimo movido a diesel é controlado por um controlador PID sintonizado em tempo real por um algoritmo genético adaptativo.

Sendo assim, os dois seguintes algoritmos de otimização de controladores PID foram escolhidos para serem avaliados neste trabalho:

- Otimização de controlador PID utilizando Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO-PID);
- Otimização de controlador PID utilizando Algoritmo Genético (GA-PID);

Além destes serem os mais utilizados na literatura, ambos possuem resultados satisfatórios, quando comparados a outras técnicas, tomando como base algumas das métricas seguidas por esse trabalho, quando aplicados a reguladores de tensão, como nos trabalhos de [Madinehi et al., 2011], [Gaing, 2004], [Mohammed et al., 2014] e [Ramya et al., 2013]. Os critérios de avaliação destes algoritmos serão detalhados no item a seguir, para que possam servir de guia para a seleção dos mesmos.

## 4.2 Critérios de Avaliação dos Algoritmos

Para que se possa avaliar qual o melhor algoritmo dentre os mais utilizados na literatura, alguns critérios devem ser levados em conta. Após a realização de um estudo nas bases de pesquisa, foram escolhidos 5 critérios para serem utilizados na comparação dos algoritmos, os quais serão avaliados em simulações.

Estes critérios foram escolhidos visando abranger as principais características e peculiaridades do sistema ao qual se pretende aplicar estes algoritmos, para que assim, possa-se avaliar de forma precisa se tais algoritmos satisfazem estas peculiaridades, aumentando assim as chances de sucesso ao serem implementados.

Os critérios escolhidos são apresentados nos itens a seguir.

### 4.2.1 Sobressinal

Em processamento de sinais, sobressinal (*overshoot* em inglês) é a parte do sinal a qual ultrapassa o limite alvo do sinal. Já quando relacionado a controle de sistemas, sobressinal pode ser considerado a parcela do sinal de resposta que ultrapassa seu valor final, seu valor de regime [Ogata, 1970]. A figura 4.1 demonstra um exemplo de um sinal com sobressinal. Neste exemplo, o valor de regime é 1, e após uma resposta ao impulso, pode-se verificar que o sinal chega a quase 1.5 de amplitude (quase 50% do valor de regime). Em aplicações de reguladores de tensão, sobressinal é um critério muito importante, pois caso ele seja muito grande, pode causar grandes danos aos equipamentos conectados a esta saída de tensão, sendo ele um dos requisitos deste trabalho, não podendo ultrapassar 10% por 1s, como já citado anteriormente.

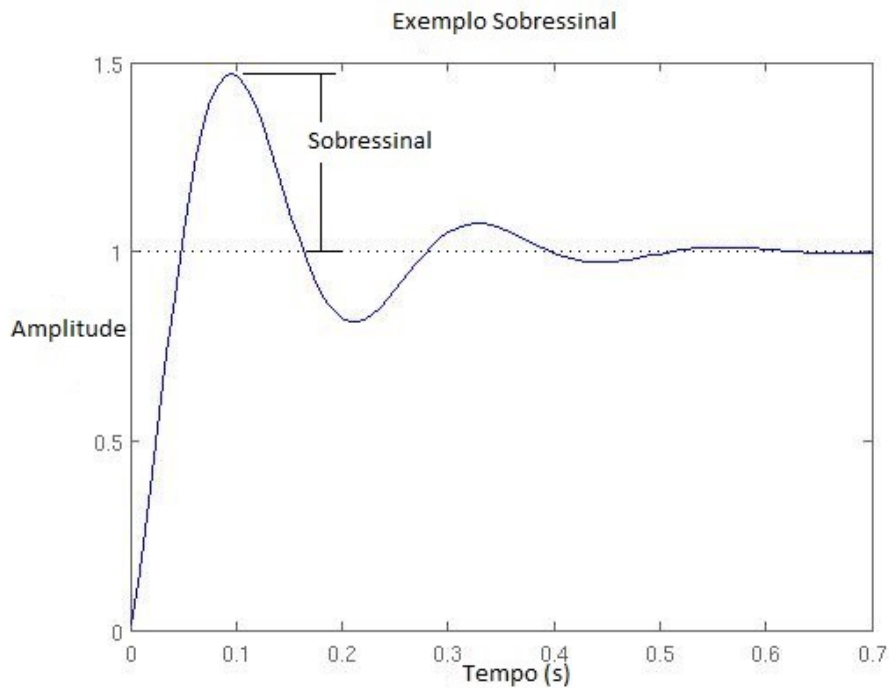


Figura 4.1: Sobressinal

### 4.2.2 Tempo de subida

O tempo de subida (*rise time* em inglês) é o tempo que necessário para a resposta de um sinal passar de 10% a 90%, 5% a 95%, ou 0% a 100% do seu valor final. Estas porcentagens vão depender do tipo do sistema que se está estudando [Ogata, 1970]. Neste caso, será considerado como tempo de subida 5% a 95%. Um exemplo disto é ilustrado na figura 4.2. Em aplicações de reguladores de tensão, mudanças de referências de tensão não podem demorar muito tempo, pois alguns sistemas, como por exemplo ventiladores, atrelados ao alternador utilizam uma razão de tensão/frequência fixa, e caso operem fora desta faixa, podem ter sua vida útil reduzida.

### 4.2.3 Tempo de estabilização

Tempo de estabilização pode ser considerado o tempo necessário para que a curva de resposta permaneça em uma faixa (normalmente 2% ou 5%) em torno do valor final. Este é a maior constante de tempo do sistema [Ogata, 1970]. A figura 4.3 ilustra como é calculado o tempo de estabilização de um sistema. No caso de reguladores de tensão, oscilações na tensão de saída do alternador podem causar danos ou mal funcionamento de outros sistemas que utilizam esta tensão como referência para sua operação, como por exemplo, na excitação de outros alternadores. Portanto, deve-se diminuir ao

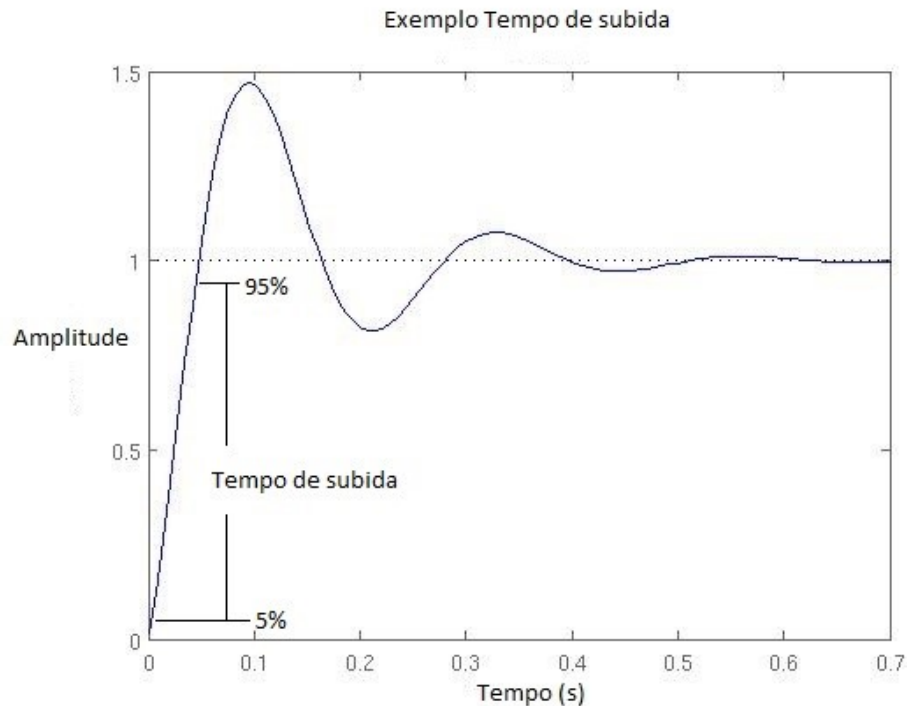


Figura 4.2: Tempo de subida

máximo estas oscilações que são causadas principalmente pelas mudanças de referência de tensão e outras perturbações do sistema.

#### 4.2.4 Erro em regime

O erro em regime pode ser considerado a diferença entre o valor final da resposta e o valor final pretendido. Este erro deve sempre ser nulo, porém, devido a alguns fatores, nem sempre esta condição é atendida [Ogata, 1970]. Um exemplo de erro em regime pode ser visto na figura 4.4. Em aplicações como os reguladores de tensão aplicados à locomotivas, o erro em regime do sistema sempre deve ser o mais próximo de zero possível, para que a tensão no sistema sempre fique fixa e igual a desejada. Qualquer diferença nesta tensão pode alterar o comportamento dos equipamentos que utilizam esta tensão como referência, podendo diminuir sua vida útil ou até danificá-los.

#### 4.2.5 Tempo de sintonia

O tempo de sintonia de um sistema de controle pode ser considerado o tempo necessário para que os parâmetros de controle sejam ajustados para que se tenha uma resposta satisfatória do sistema em questão. Alguns algoritmos ditos auto-ajustáveis dispensam este tempo, porém possuem outras desvantagens. Este critério é de suma importância

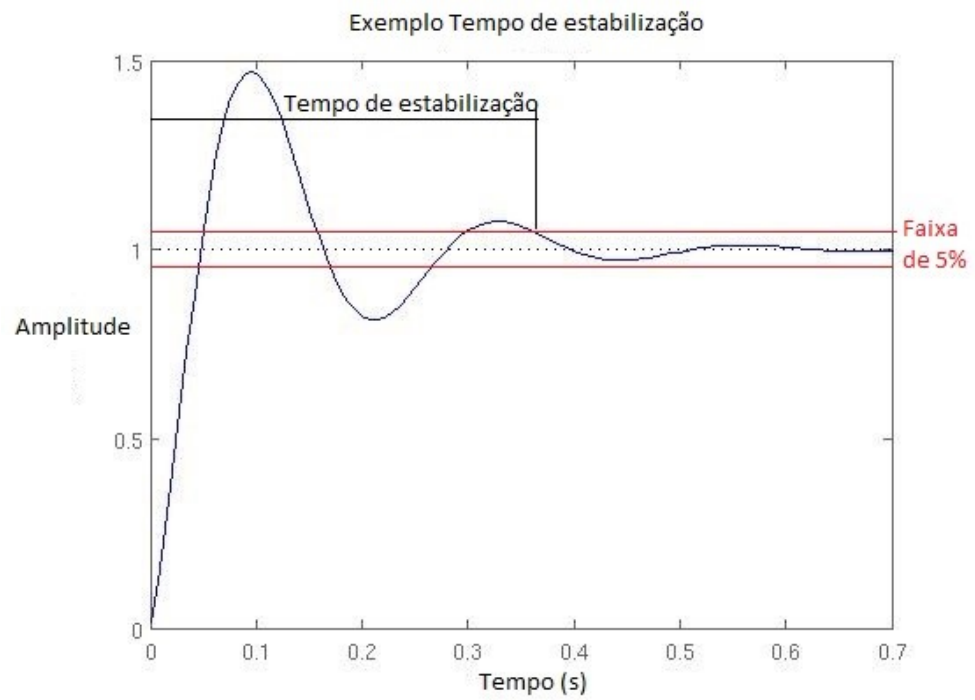


Figura 4.3: Tempo de estabilização

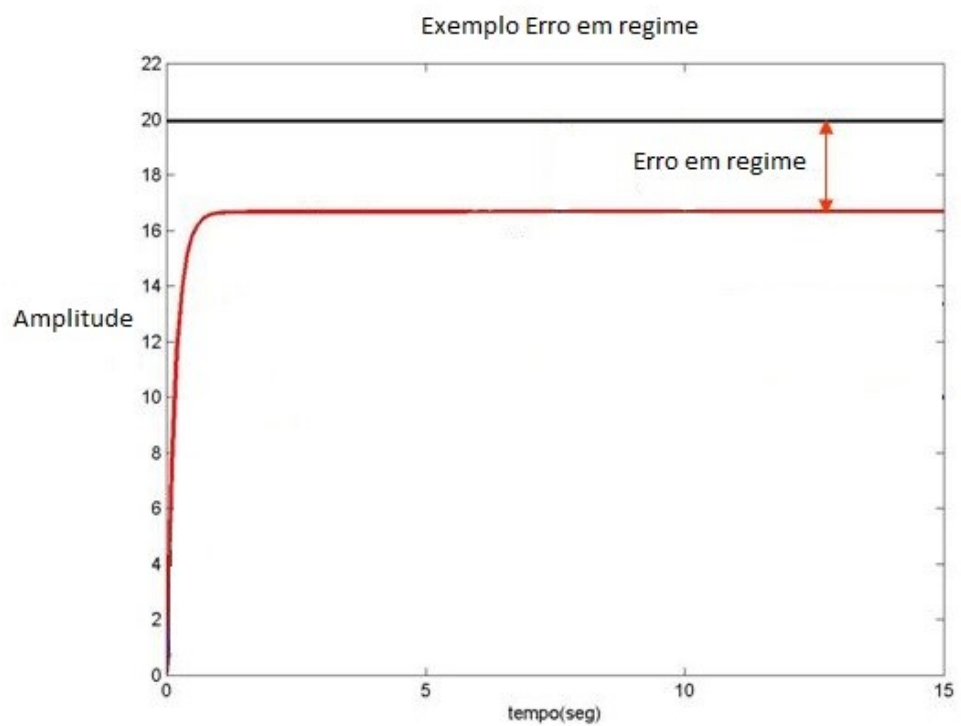


Figura 4.4: Erro em regime

para aplicações na indústria, visto que sistemas muito complexos, que são difíceis de serem ajustados, tomam grande tempo para serem sintonizados, o que se reflete em custo para a indústria, o qual nem sempre é disponível na aplicação de um produto.

Este critério é considerado aqui quantitativo já que os algoritmos escolhidos são otimizadores de controladores PID, portanto, é possível medir seus tempos de sintonia de forma justa. Porém, este critério pode ser considerado qualitativo quando o controlador escolhido é ajustado manualmente, sendo assim, este depende muito de quem está sintonizando o algoritmo de controle. Quando se tem grande conhecimento do sistema em questão, a sintonia de um controlador pode se tornar um trabalho trivial, porém, dependendo do conhecimento e complexidade do sistema, este pode ser um trabalho árduo.

Após escolhidos os critérios, foram dados pesos a estes critérios, levando em conta sua importância na aplicação ferroviária. As justificativas e pesos dos critérios são apresentados através da tabela 4.3.

Com os critérios e algoritmos definidos, a avaliação e ajuste do modelo matemático podem ser realizados, para que então seja montado o ambiente de simulação e possam ser avaliados os algoritmos com os critérios definidos nesta seção. A avaliação dos modelos matemáticos é realizada no item 4.3.

### 4.3 Avaliação dos Modelos Matemáticos Escolhidos

Para que fosse possível criar um ambiente de simulação capaz de reproduzir com o maior realismo possível o comportamento real do alternador aplicado a locomotivas, uma avaliação dos modelos matemáticos citados anteriormente foi necessária. Para isso, foi desenvolvido um ambiente de simulação capaz de variar certos parâmetros de entrada dos alternadores, para assim, estudar qual o comportamento de ambos e então, escolher qual modelo seria utilizado.

Para tanto, foi utilizado para o desenvolvimento do ambiente de simulação a ferramenta *Simulink* desenvolvida pela empresa *MathWorks*, por ser completamente compatível com os modelos apresentados anteriormente.

O *Simulink* é uma ferramenta para desenvolvimento de projetos utilizando diagrama em blocos. Ela possibilita a realização de simulações, criação automática de códigos e, testes e verificações de sistemas embarcados. Ela ainda possibilita a edição de imagens, simulações com modelos de sistemas dinâmicos, entre várias outras coisas. O *Simulink* possui grande compatibilidade com a ferramenta *Matlab*, a qual permite que os resultados realizados com o *Simulink* possam ser exportados e analisados utilizando o *Matlab* [Mathworks, 2016a].

Tabela 4.3: Critérios de avaliação dos algoritmos

Critérios	Justificativa	Peso
Tempo de subida	Mudanças de referências de tensão não podem demorar muito tempo pois alguns sistemas atrelados ao alternador utilizam uma razão de tensão/frequência fixa. Como, por exemplo, ventiladores, que se operarem fora da sua faixa de tensão/frequência, podem ter sua vida útil reduzida, porém a incidência de falha devido a isso é baixa;	1
Tempo de estabilização	Oscilações da tensão do sistema causam variações em outros sistemas os quais utilizam esta tensão como referência, como por exemplo, a excitação de outros alternadores ou até sistemas de menor potência, porém, em sistemas mais novos, esta tensão é monitorada e compensada para evitar essas variações;	2
Erro em regime	Grande parte dos equipamentos de uma locomotiva utilizam como referência a tensão de saída do alternador como base para sua operação. Qualquer diferença nesta tensão pode alterar o comportamento destes equipamentos, diminuir sua vida útil ou até danificá-los. Pequenas variações podem ser compensadas em sistemas mais novos que monitoram esta tensão;	3
Sobressinal	Sobretensão na regulação de tensão levam à diminuição da vida útil dos equipamentos ligados ao alternador, ou até mesmo à queima se a sobretensão for demasiada	4
Tempo de sintonia	A diminuição do tempo gasto no desenvolvimento de um controlador para alguma aplicação nova de um sistema de controle de tensão é fundamental para que este se torne viável para a indústria	3

Sendo assim, um circuito simples, para cada modelo de alternador, foi montado utilizando tal ferramenta, como pode ser visto nas figuras 4.5 e 4.6.

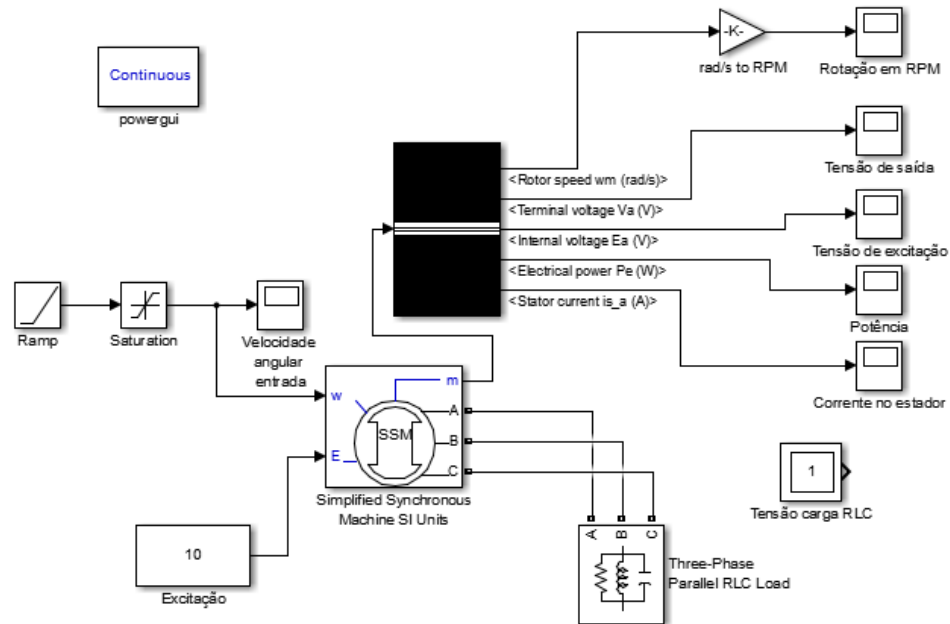


Figura 4.5: Ambiente de simulação alternador de ordem 3

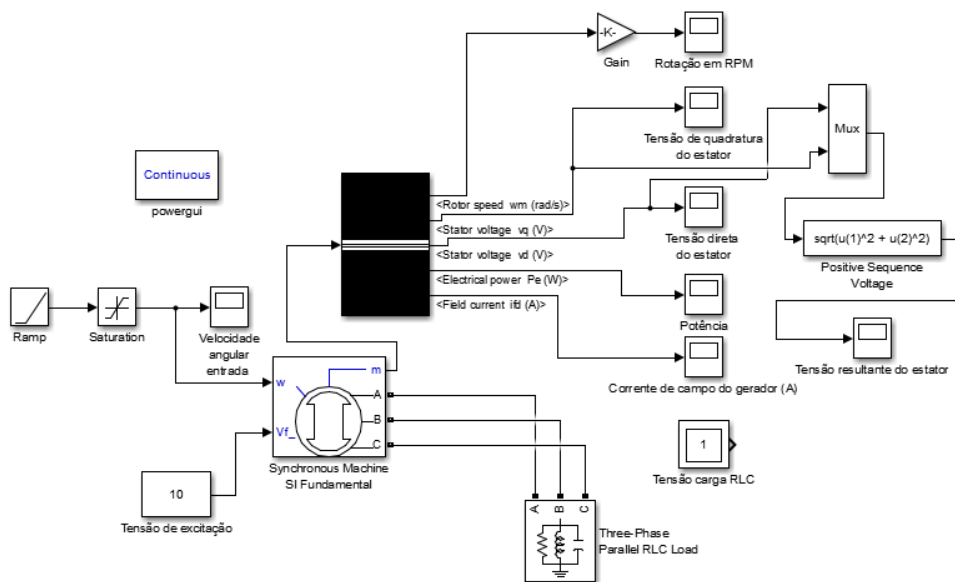


Figura 4.6: Ambiente de simulação alternador de ordem 7

Para que fosse possível medir a saída do alternador, foram escolhidos uma carga fixa do tipo *RLC* e uma tensão de excitação fixa. Outra escolha foi a de variar a rotação do alternador para avaliar se os modelos levavam em conta a variação de rotação na saída de

tensão do alternador, sendo este, o principal requisito para o modelo, já que este trabalho visa avaliar os algoritmos de controle em tal situação.

Já as simulações tiveram 20 segundos de duração, onde do segundo 3 ao 13, como mostra a figura 4.7, a velocidade de rotação do alternador passa de 600 RPM para 1800 RPM (faixas de rotação bem comuns em motores a diesel utilizados em locomotivas).

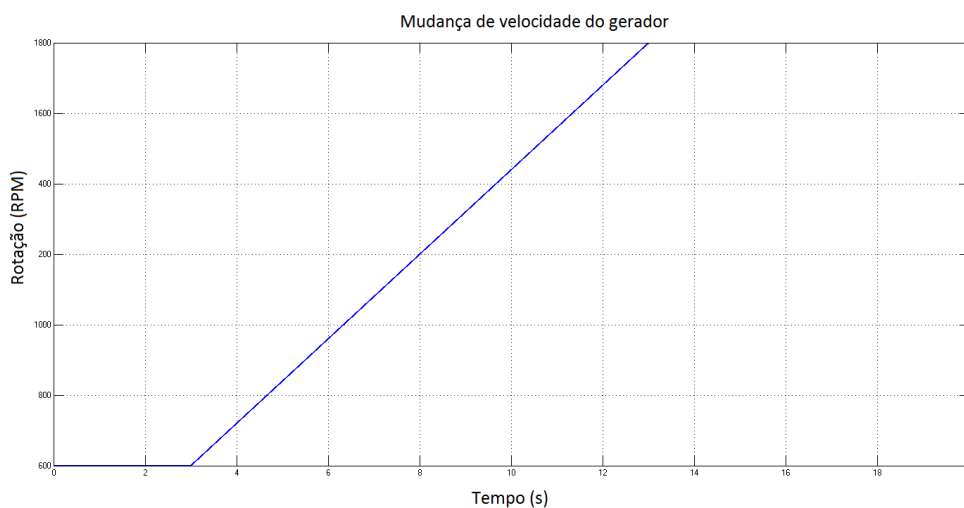


Figura 4.7: Mudança velocidade de rotação do alternador

Com os parâmetros de simulação, das cargas e das entradas escolhidos, foram então escolhidos os parâmetros e características do modelo do alternador. O modelo de sétima ordem da biblioteca *SimPowerSystem* possibilita a escolha dos parâmetros de alguns alternadores já pré-definidos, como pode ser visto na figura 4.8.

Sendo assim, foi escolhido utilizar tal ferramenta para facilitar o preenchimento das informações do alternador. O alternador pré-definido escolhido foi com as seguintes características:

- Frequência nominal de 60Hz;
- Tensão nominal de saída de 460V;
- Potência nominal de 52,5kVA;
- Velocidade de rotação nominal de 1800RPM;
- Três fases;

A partir dos parâmetros escolhidos para o modelo de sétima ordem, foram então preenchidos os mesmos parâmetros, porém mais simplificados, para o modelo de

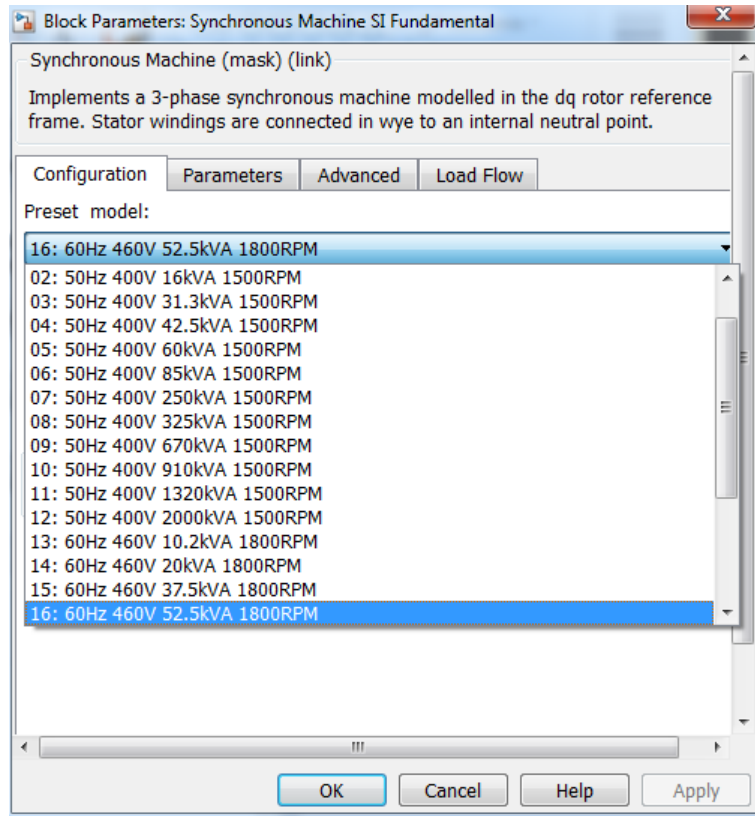


Figura 4.8: Alternadores pré-definidos

terceira ordem, a fim de que ambos obtivessem uma resposta semelhante durante as simulações. Tais características foram escolhidas por serem muito semelhantes ao alternador, mostrado na figura 4.9, que será utilizado nos ensaios em bancada. As informações do alternador são apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Informações Alternador de testes

Parâmetros	Unidade	Alternador
Tensão Nominal	$V_{CA}$	460
Potência Nominal	$kVA$	50
Rotação do Alternador	$RPM$	1800
Frequência	$Hz$	60
Número de Fases	$n$	3

Tal modelo de alternador é utilizado em duas locomotivas PR7 que foram desenvolvidas e produzidas pela empresa onde o autor desta dissertação atua. O alternador em questão é utilizado como alternador auxiliar destas locomotivas, sendo responsável por alimentar os sistemas auxiliares da locomotiva como o compressor, ar condicionado, carregamento das baterias, faróis e etc.



Figura 4.9: Alternador para teste em bancada

Tal locomotiva, mostrada na figura 4.10, possui um motor *Caterpillar* do modelo C18 com potência total de 700 hp.



Figura 4.10: Locomotiva PR7 [HD, 2016]

Com todos os parâmetros definidos, foram realizadas as simulações. As respostas de cada um dos modelos são apresentadas pelas figuras 4.11 a 4.16 a seguir.

A figura 4.11 mostra a tensão de saída de uma das fases do alternador durante os 20s. Através dela, pode-se perceber que a tensão de saída não se alterou durante o tempo. Apenas a frequência da saída foi alterada durante a mudança da velocidade de rotação do alternador. Isto pode ser melhor analisado pela figuras 4.12 e 4.13. A figura

4.12 representa o momento em que o alternador começa a aumentar sua velocidade de rotação. Aqui, é possível ver que a saída permanece com frequência de 20Hz quando a velocidade do alternador é de 600RPM. Quando a velocidade do alternador chega ao nominal, 1800RPM, a frequência de saída passa a ser de 60Hz, frequência nominal do alternador, como mostra a figura 4.13. Isto pode ser explicado pela fórmula (2.1), apresentada anteriormente.

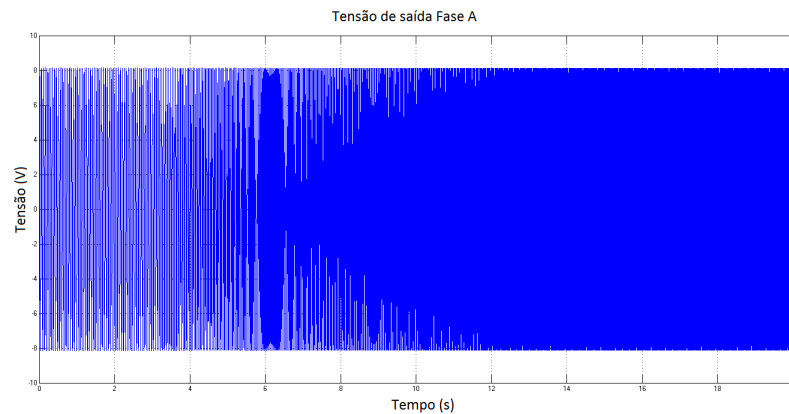


Figura 4.11: Tensão de saída alternador de ordem 3 (0-20s)

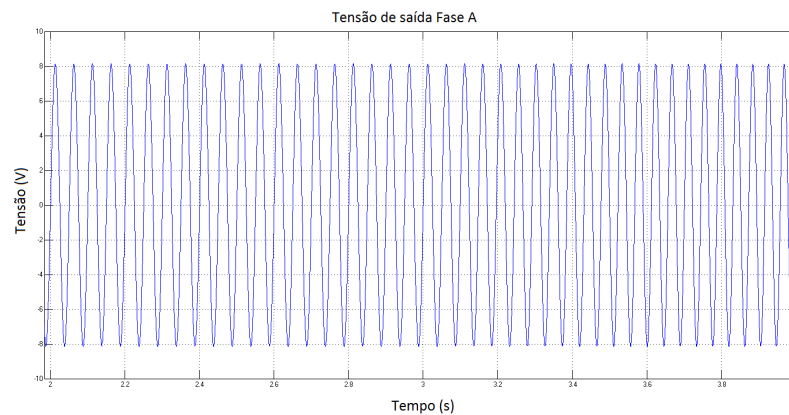


Figura 4.12: Tensão de saída alternador de ordem 3 (2-4s)

Já para o modelo de sétima ordem, percebe-se, pela figura 4.14 que houve uma grande variação de tensão na saída do alternador com a variação da velocidade de rotação do alternador. Além disso, é possível ver que, como já ocorrido na simulação do modelo de terceira ordem, a frequência da tensão de saída também foi alterada, como pode ser visto nas figuras 4.15 e 4.16.

Tais diferenças já eram esperadas, pois como visto nos itens anteriores, o modelo de terceira ordem é mais simples que o modelo de sétima ordem e, portanto, deixa de levar em conta alguns aspectos que são importantes para este trabalho.

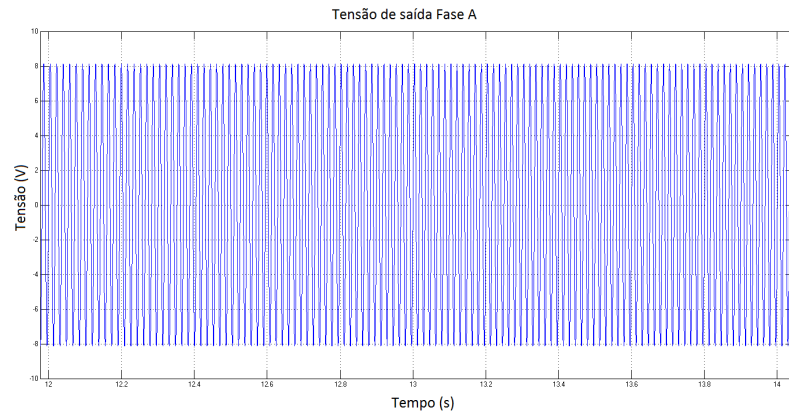


Figura 4.13: Tensão de saída alternador de ordem 3 (12-14s)

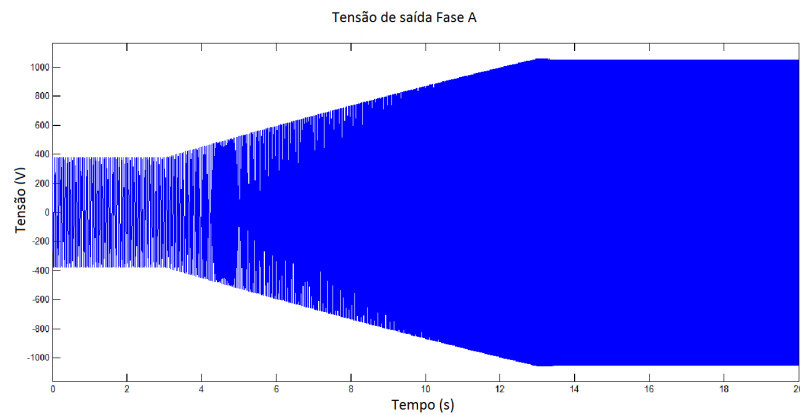


Figura 4.14: Tensão de saída alternador de ordem 7 (0-20s)

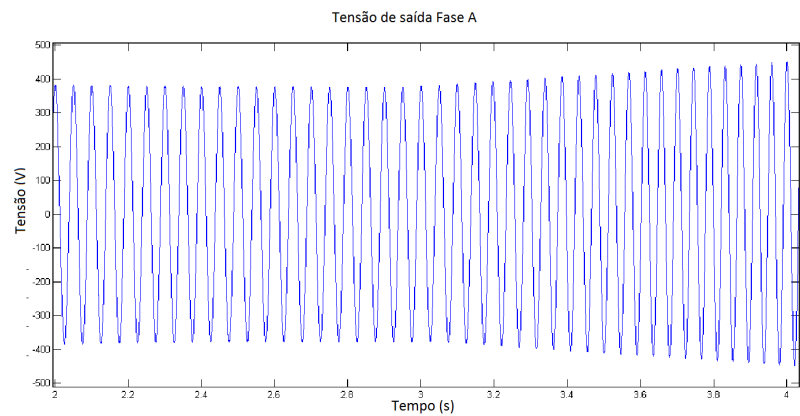


Figura 4.15: Tensão de saída alternador de ordem 7 (2-4s)

Sendo assim, é possível definir que o modelo de terceira ordem não é adequado para a utilização neste trabalho por não levar em conta a velocidade de rotação na tensão de saída do alternador. Já o modelo de sétima ordem, se provou um bom modelo para ser utilizado como base nas avaliações dos algoritmos os quais se pretende comparar. O

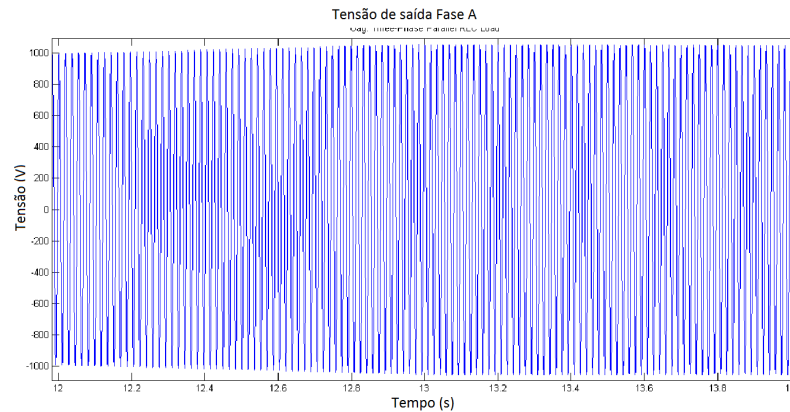


Figura 4.16: Tensão de saída alternador de ordem 7 (12-14s)

próximo passo é então ajustar este modelo de sétima ordem para que este se aproxime ao máximo do alternador real, passo melhor detalhado no item a seguir.

## 4.4 Modelo Alternador Real x Modelo Simulado

A fim de se aproximar ainda mais do modelo real do alternador, algumas mudanças no modelo simulado foram necessárias. O alternador, citado no item anterior, que será utilizado nos experimentos possui não apenas um alternador, mas sim dois em seu encapsulamento. Tal estrutura se faz necessária para que a potência necessária para a excitação do mesmo seja reduzida. Isso é possível devido a composição feita do encapsulamento, o qual é constituído de dois alternadores em série, o primeiro menor, também chamado de piloto, é utilizado para elevar a capacidade de corrente de excitação do alternador principal, o qual é responsável por entregar a potência nominal do conjunto. Tal estrutura pode ser melhor analisada pelas figuras 4.17 e 4.18.

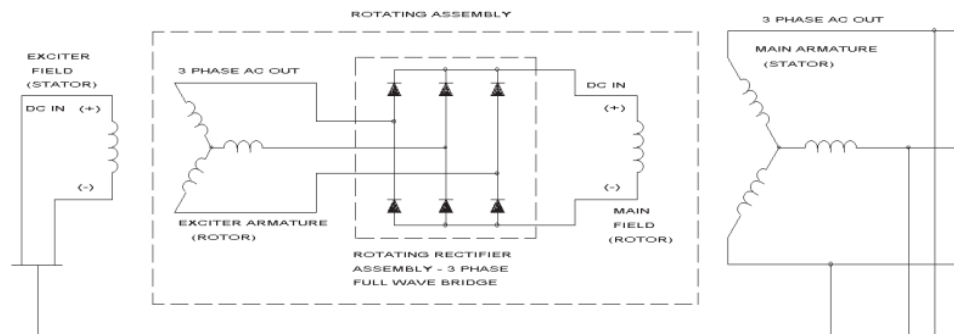


Figura 4.17: Esquema do Alternador [Corp., 2016a]

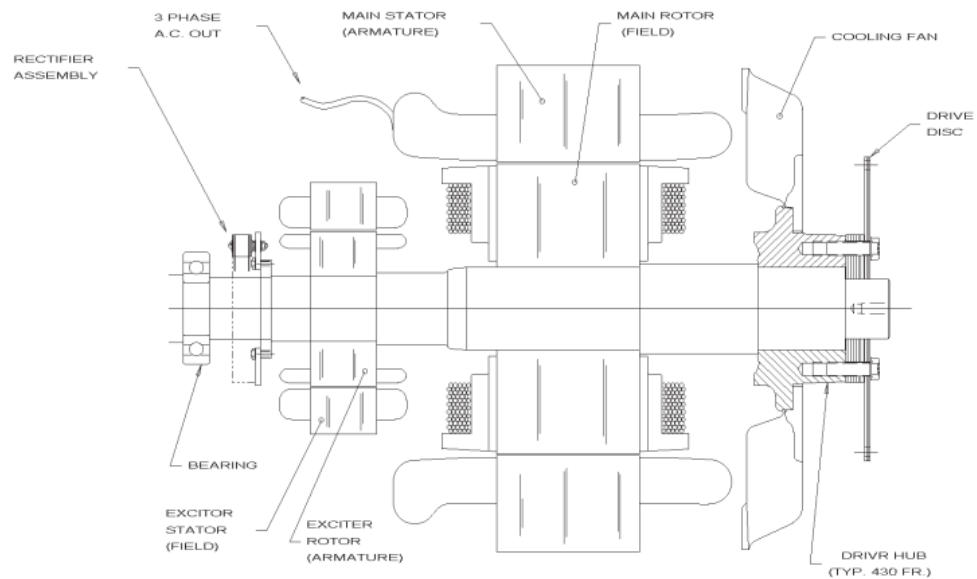


Figura 4.18: Montagem interna do alternador com dois estágios [Corp., 2016a]

Apesar desta configuração possibilitar a utilização de um excitador de baixa potência para excitar o alternador, ela torna o sistema mais lento, já que qualquer variação da tensão/corrente de entrada, só será vista pela saída do alternador principal após passar pelo alternador piloto. Tal fato torna necessário mais uma modificação no modelo simulado, sendo necessário que dois alternadores sejam colocados em série, para assim, tornar o modelo simulado mais próximo do real. Sendo assim, um modelo com tal topologia foi montado, aproveitando um modelo deste tipo já existente na própria ferramenta *Matlab* (*power\_SM\_exciter*), como pode ser visto na figura 4.19. Através de tal modelo, pode-se montar o modelo final do alternador que será utilizado para a comparação dos algoritmos de controle. A montagem final do modelo pode ser vista através da figura 4.20.

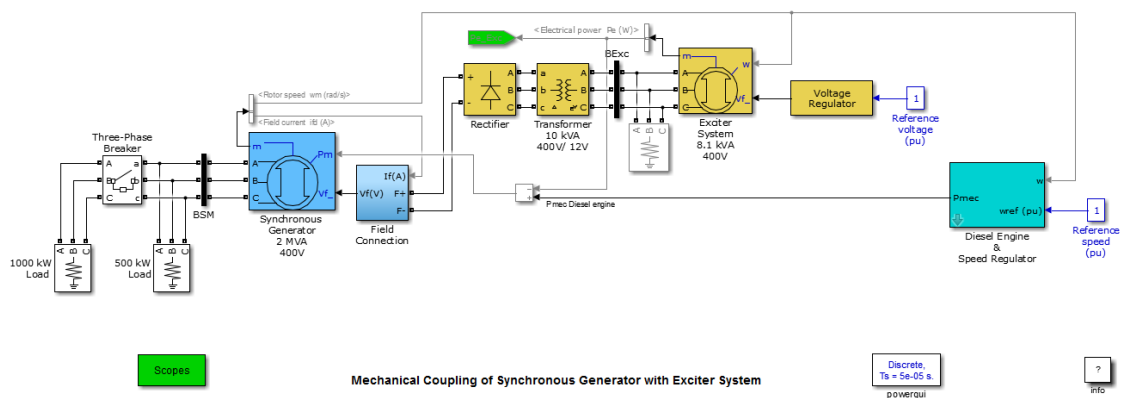


Figura 4.19: Modelo com excitatriz (Power\_SM\_exciter)

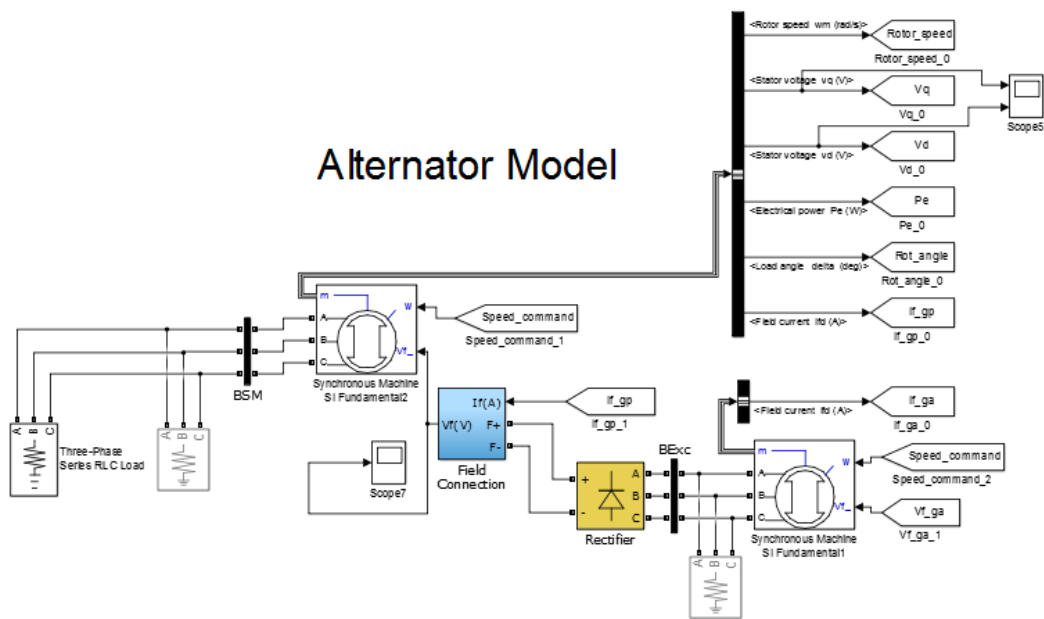


Figura 4.20: Modelo implementado

Com a topologia do modelo escolhida, ainda falta definir os parâmetros internos do modelo simulado. Pode-se perceber que, através das equações do modelo matemático apresentado anteriormente ((2.9) até (2.20)), faz-se necessário que vários parâmetros do alternador sejam conhecidos. Eles são os seguintes:

- $R_s$  - Resistência do estator por fase ( $\Omega$ );
- $L_l$  - Indutância de perda do estator ( $H$ );
- $L_{md}$  - Indutância de magnetização do eixo direto ( $d$ ) vista pelo estator ( $H$ );
- $L_{mq}$  - Indutância de magnetização do eixo de quadratura ( $q$ ) vista pelo estator ( $H$ );
- $R'_f$  - Resistência do campo vista pelo estator ( $\Omega$ );
- $L'_{lfd}$  - Indutância de perda do campo vista pelo estator ( $H$ );
- $R'_{kd}$  - Resistência do amortecedor do alternador do eixo direto ( $d$ ) vista pelo estator ( $\Omega$ );
- $R'_{kq1}$  - Resistência do amortecedor do alternador do eixo de quadratura ( $q$ ) vista pelo estator ( $\Omega$ );
- $L'_{lkd}$  - Indutância do amortecedor do alternador do eixo direto ( $d$ ) vista pelo estator ( $H$ );

- $L'_{lkq1}$  - Indutância do amortecedor do alternador do eixo de quadratura ( $q$ ) vista pelo estator ( $H$ );
- $P_n$  – Potência nominal do alternador ( $VA$ );
- $V_n$  – Tensão de saída nominal do alternador ( $V_{rms}$ );
- $f_n$  – Frequência nominal do alternador ( $Hz$ );
- $i_{fn}$  - Corrente de campo para que a tensão de saída seja a nominal sem nenhuma carga ( $A$ );

Para isso, foi utilizado o manual do fabricante [Corp., 2016b] para que os parâmetros do alternador utilizado na locomotiva PR7 fossem introduzidos no modelo simulado. Porém muitos dos parâmetros requeridos pelo modelo simulado não são disponibilizados pelo fabricante, o que dificulta a obtenção destes. Sendo assim, foi decidido que seriam utilizados os parâmetros disponíveis, e os que não foram disponibilizados, seriam ajustados para que o modelo simulado se assemelhasse ao modelo real.

Portanto, fez-se necessário levantar as curvas de resposta do alternador. Foi então montada uma bancada de testes que era composta com um inversor que controlava a velocidade de um motor trifásico de ímã permanente, o qual estava acoplado ao eixo do alternador, como pode-se ver através da figura 4.21. Na saída do alternador foi conectada uma carga resistiva de 7,5kW com ligação em estrela. O diagrama, apresentado pela figura 4.22 demonstra melhor o esquema do teste em questão.



Figura 4.21: Bancada de teste

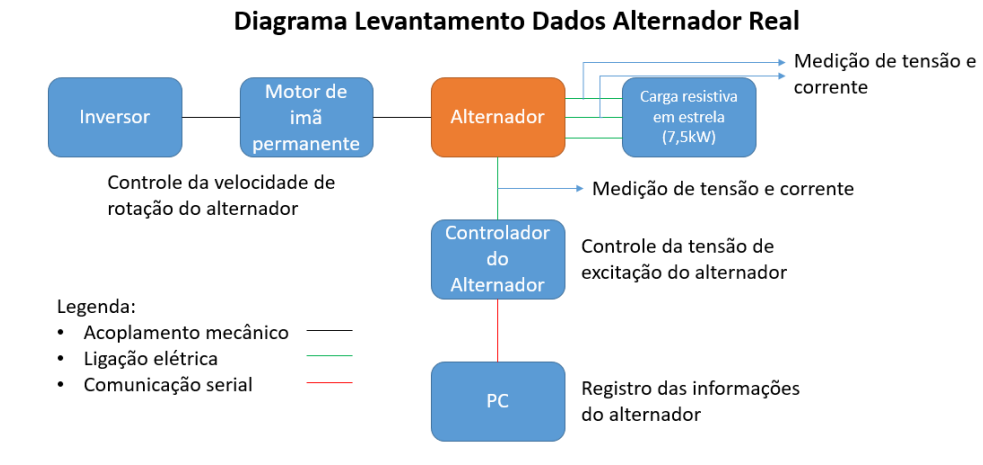


Figura 4.22: Diagrama da bancada de testes do alternador

Foram levantadas as curvas, sempre observando a velocidade de rotação do alternador, a tensão e correntes de excitação e a tensão e correntes de saída. A tabela B.1 mostra os resultados do experimento apresentado no apêndice B.

Com os resultados em mãos, foi então avaliada a resposta do modelo simulado, com os mesmos parâmetros de entrada utilizados nos testes em bancada. Os parâmetros do alternador não fornecidos pelo manual do fabricante foram modificados para que ambas as respostas fossem as mais próximas possível, tomando como base os parâmetros do alternador pré-existente no modelo do *Matlab*, o mesmo utilizado na seção anterior para a primeira validação do modelo de sétima ordem. Este alternador se assemelha ao alternador real quando comparado a tensão de saída, frequência, rotação e potência nominais e número de pólos. Além disso, para auxiliar a modificação desses parâmetros, foram utilizadas as equações do modelo que serviram como um guia na alteração dos parâmetros. Os parâmetros fornecidos pelo manual do fabricante foram os seguintes:

- Excitatriz:

$$R_s = 23,5 \Omega;$$

$$R'_f = 0,12 \Omega;$$

$$V_n = 480 V_{rms};$$

$$f_n = 60 Hz;$$

$$i_{fn} = 0,62 A$$

- Alternador Principal:

$$R_s = 0,19 \Omega;$$

$$R'_f = 0,79 \Omega;$$

$$P_n = 52500 \text{ VA};$$

$$V_n = 480 \text{ V}_{rms};$$

$$f_n = 60 \text{ Hz};$$

$$i_{fn} = 0,62 \text{ A}$$

Os outros parâmetros que foram ajustados tomando como base o modelo pré-definido do *Matlab* foram os seguintes:

- Excitatriz:

$$L_l = 0,015965 \text{ H};$$

$$L_{md} = 0,15231 \text{ H};$$

$$L_{mq} = 0,0014 \text{ H};$$

$$L'_{lfd} = 0,00066734 \text{ H};$$

$$R'_{kd} = 2,032 \text{ } \Omega$$

$$R'_{kq1} = 2,6 \text{ } \Omega$$

$$L'_{lkd} = 0,0011926 \text{ H};$$

$$L'_{lkq1} = 0,001006 \text{ H};$$

$$P_n = 213 \text{ VA};$$

- Alternador Principal:

$$L_l = 0,015965 \text{ H};$$

$$L_{md} = 0,331 \text{ H};$$

$$L_{mq} = 0,0014 \text{ H};$$

$$L'_{lfd} = 0,066734 \text{ H};$$

$$R'_{kd} = 1,032 \text{ } \Omega$$

$$R'_{kq1} = 0,066 \text{ } \Omega$$

$$L'_{lkd} = 0,0011926 \text{ H};$$

$$L'_{lkq1} = 0,001006 \text{ H};$$

A tabela B.2 com os resultados do mesmo experimento feito no ambiente de simulação é apresentada no apêndice B.

Outro parâmetro importante para que a resposta do modelo simulado se aproxime da resposta do modelo real é a opção de simular a saturação do alternador. O modelo

de sétima ordem utilizado não utiliza a saturação do magnético do alternador por padrão, ou seja, a resposta do alternador é linear em relação a tensão de excitação. Portanto, para que o modelo simulado fique semelhante ao modelo real, é necessário utilizar tal ferramenta. Os valores utilizados para a saturação do alternador principal, que nada mais é do que uma matriz com valores de corrente de excitação e tensão de saída, são mostrados através da tabela 4.5.

Tabela 4.5: Dados inseridos para saturação do modelo simulado

Corrente de excitação [A]	Tensão de saída[V]
1,69	380,00
2,33	460,00
3,10	530,00
3,45	580,00
3,98	625,00
4,94	685,00
5,49	710,00
7,03	750,00
8,68	780,00
10,40	805,00
12,15	830,00

A comparação dos resultados entre o modelo real e o simulado pode ser melhor analisada pelas figuras 4.23 a 4.27, as quais apresentam as respostas de ambos os modelos para as velocidades de rotação de 600RPM (figura 4.23), 900RPM (figura 4.24), 1200RPM (figura 4.25), 1500RPM (figura 4.26) e 1800RPM (figura 4.27).

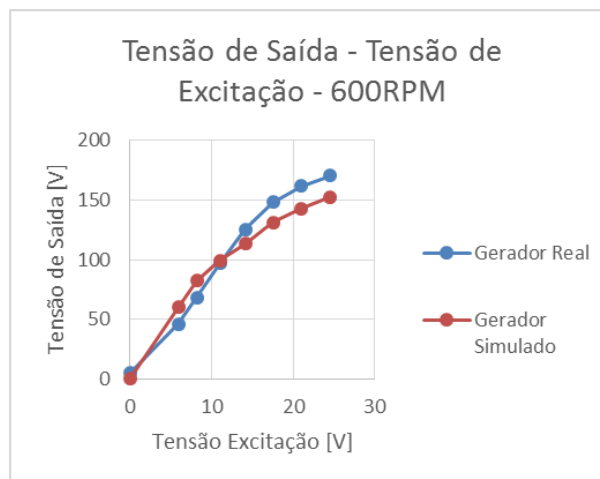


Figura 4.23: Comparação modelos - 600RPM

Através dos resultados pode-se verificar como o modelo simulado se aproxima do modelo real, o que é essencial para que tanto os algoritmos de controle quanto os

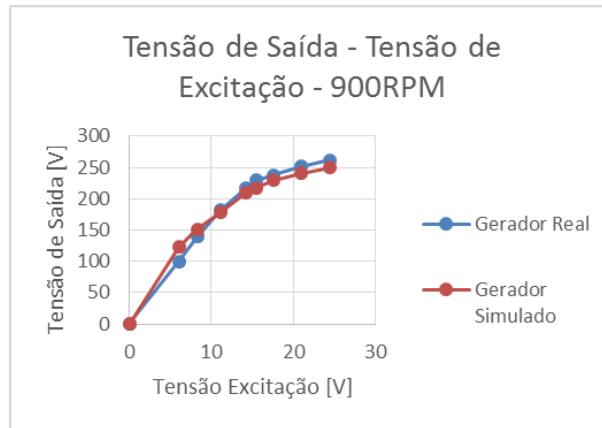


Figura 4.24: Comparação modelos - 900RPM

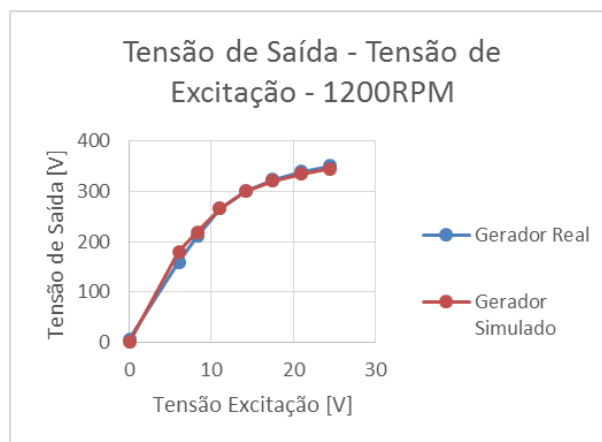


Figura 4.25: Comparação modelos - 1200RPM

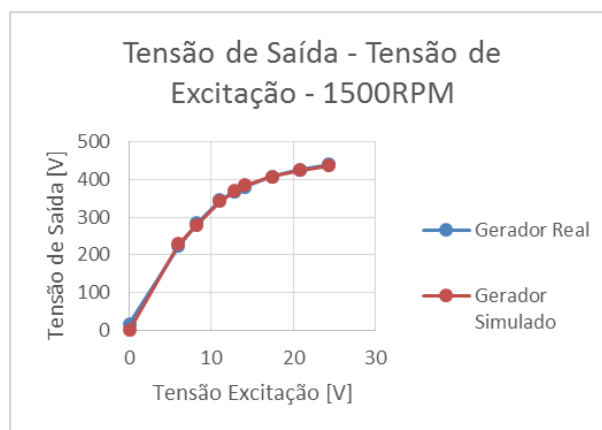


Figura 4.26: Comparação modelos - 1500RPM

parâmetros escolhidos para esses algoritmos possam ser utilizados no modelo real, diminuindo assim o tempo para uma possível sintonia do controlador quando aplicado ao modelo real.

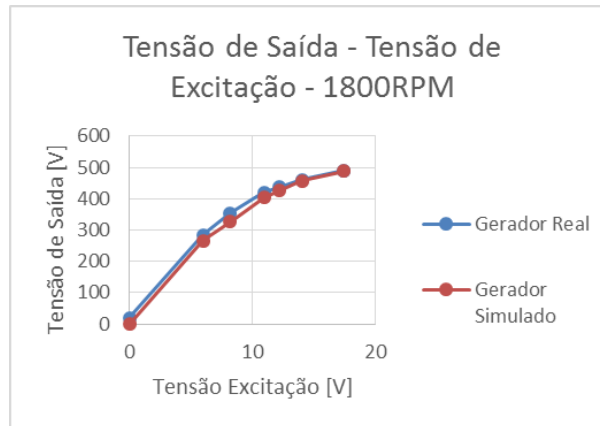


Figura 4.27: Comparação modelos - 1800RPM

Outro parâmetro a ser analisado, além das curvas de resposta tensão de entrada por tensão de saída, é o tempo de resposta do alternador, característica muito importante para que a sintonia do controlador seja igual para os dois modelos. Sendo assim, foi comparada a resposta ao degrau do modelo real e do modelo simulado. O resultado dessa comparação pode ser visto através das figuras 4.28 e 4.29. Neste experimento, foi utilizado o alternador em rotação nominal (1800 RPM).

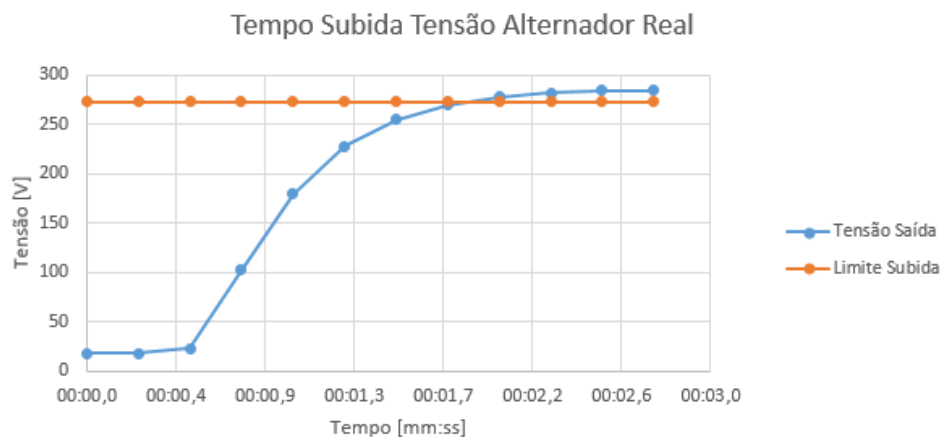


Figura 4.28: Tempo de subida alternador real

O tempo de subida do alternador real (figura 4.28) para um degrau de excitação de 1%, partindo de 0, é 1,7s. Este tempo pode variar um pouco devido ao tempo de amostragem ser da faixa de  $250\mu\text{s}$ . O modelo simulado foi então submetido ao mesmo experimento (figura 4.29), onde o tempo de subida foi também de 1,75s. Pode-se perceber então que, comparando as duas curvas, ambos os tempos de resposta também se assemelham, validando assim o modelo, e possibilitando sua utilização no decorrer deste trabalho, garantindo que o tempo de resposta do modelo real e do simulado são próximos.

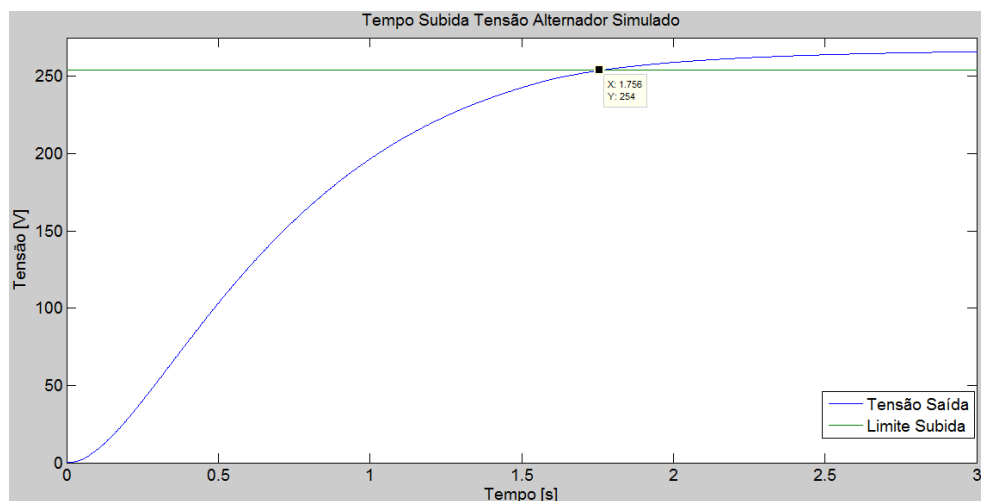


Figura 4.29: Tempo de subida alternador simulado

Sendo assim, foi possível desenvolver um ambiente de simulação para que os algoritmos de controle fossem avaliados, o que será melhor explicado no item 4.5 a seguir.

## 4.5 Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação desenvolvido para avaliar os algoritmos de controle foi baseado no ambiente de simulação desenvolvido previamente para a avaliação do modelo do alternador.

Neste novo ambiente de simulação, foram adicionados um bloco contendo um controlador PID, outro bloco de cálculo do erro, que foi utilizado como entrada para o controlador PID, um bloco contendo os valores de referência da velocidade de rotação do alternador e, por último, o cálculo da função de *fitness*, utilizada como saída para os algoritmos de otimização.

A figura 4.30 apresenta o controlador PID padrão. Apesar de já existir uma função para o controlador PID pronta na ferramenta *Simulink*, foi decidido utilizar tal estrutura pela facilidade de analisar os sinais no interior do controlador. Outra abordagem feita foi a normalização do erro. Isto não causa nenhuma grande diferença no desempenho do controlador, apenas facilita a visualização do erro quando necessário.

A figura 4.31 apresenta o cálculo da função *fitness* para a avaliação do controlador.

A figura 4.32 apresenta o cálculo do erro, já a figura 4.33 mostra o modelo o modelo do alternador (já apresentado anteriormente) e, por fim, a figura 4.34 demonstra os valores de referência utilizados no controlador, os quais foram ajustados de acordo com



## Error Calculation

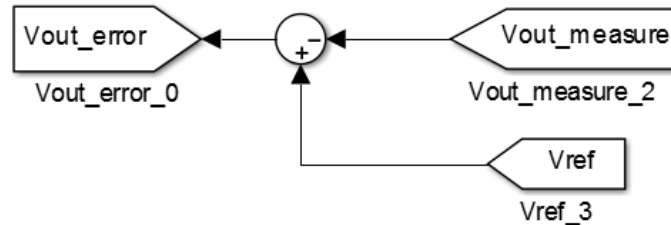


Figura 4.32: Cálculo Erro

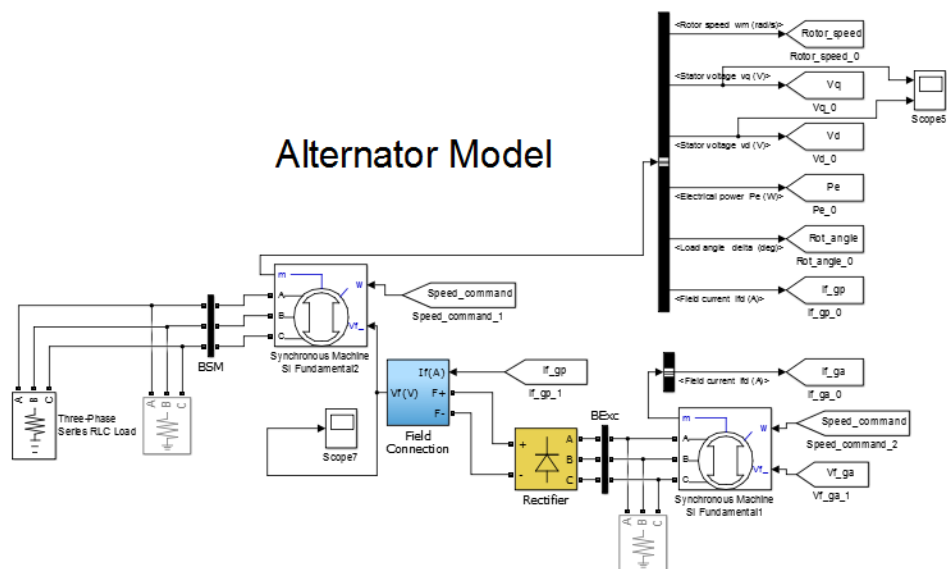


Figura 4.33: Modelo do Alternador

alternador. Para que isso fosse satisfeito e a simulação fosse o mais próximo da realidade, foi feita uma pesquisa na base de dados da locomotiva à qual o alternador utilizado neste trabalho é aplicado, para que fosse retirado um exemplo de operação real do alternador. Assim, pode-se comparar os resultados em campo do algoritmo utilizado hoje em dia, com o algoritmo proposto neste trabalho, tanto durante a simulação, quanto durante o teste em bancada.

Sendo assim, obteve-se o seguinte padrão de operação da velocidade do alternador mostrado através da figura 4.35.

Através da figura 4.35 pode-se verificar como a variação de rotação do alternador acontece. Nos primeiros segundos do gráfico, é possível verificar que a rotação vai de 0 RPM até 900 RPM. Isto acontece quando o operador realiza a partida do motor diesel

## Setpoint Commands

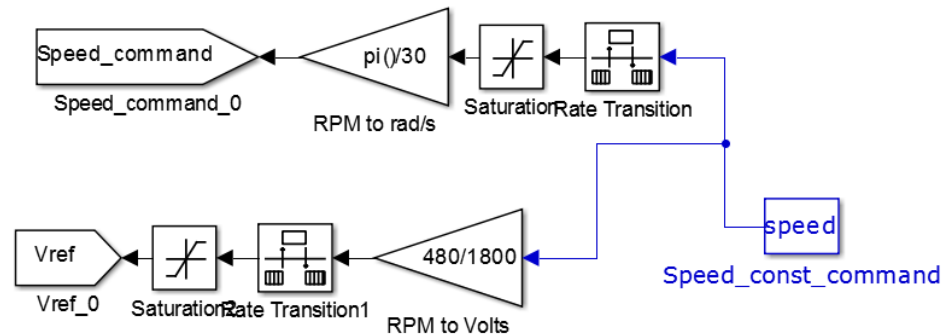


Figura 4.34: Valores de referência utilizados pelo controlador



Figura 4.35: Variação de rotação do alternador em operação

da locomotiva. Assim, ela estabiliza em 900 RPM, que é a rotação de *idle*, ou também chamada de rotação de ponto morto. Após alguns segundos, é possível verificar que a rotação passa de 900 RPM para 1400 RPM. Isto acontece quando o operador começa a operar a locomotiva, sendo assim, o motor diesel da locomotiva aumenta sua rotação para que possa disponibilizar mais potência. Cerca de 1 minuto depois, o operador altera novamente a rotação do motor diesel, agora para 1800 RPM, a máxima rotação do motor diesel, podendo assim disponibilizar o máximo de potência da locomotiva. Cerca de 1 minuto depois, a rotação do alternador passa a ser 1400 RPM novamente, indicando que o operador decidiu por diminuir a potência da locomotiva por algum motivo, e ficando dessa forma por mais algum tempo.

Este tipo de operação acima é bem comum neste tipo de locomotiva utilizada para a locomoção de passageiros, pois deve-se chegar rapidamente a potência máxima, porém não se fica neste estado por muito tempo devido ao curto espaço entre as estações de trem.

É interessante, porém, analisar como se dá a variação de tensão do alternador auxiliar durante este mesmo tipo de operação. A figura 4.36 mostra como varia a referência de tensão do alternador auxiliar e a tensão de saída durante a operação mostrada na figura 4.35.

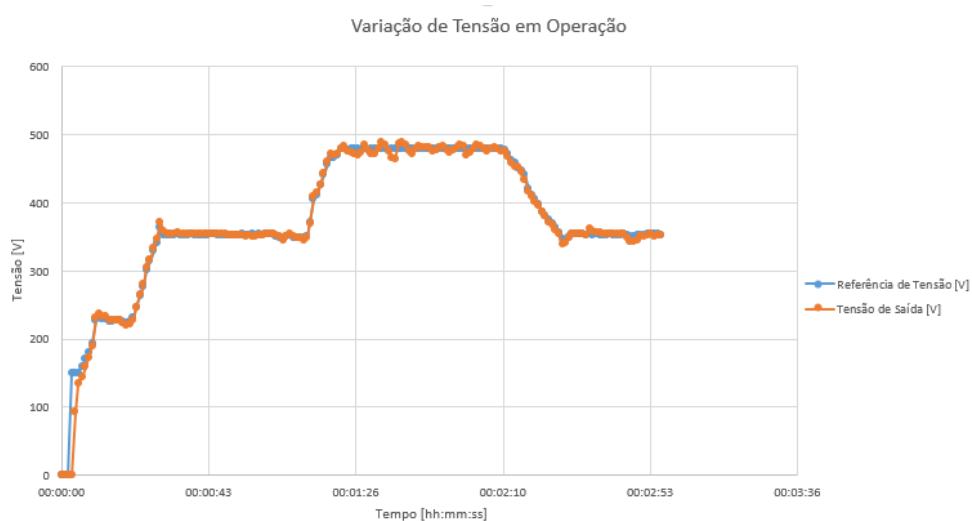


Figura 4.36: Variação de tensão em operação

Na figura 4.36 é possível verificar como há algumas oscilações não desejadas durante a operação da locomotiva. Apesar de a tensão de saída seguir bem a tensão de referência, tal resposta foi conseguida devido a um trabalho de mais de um ano, através de inúmeras tentativas de ajuste manual do controlador, totalizando 400 horas-homem, apenas para chegar na resposta atual. Isto mostra a ineficácia do método de ajuste do controlador, pois este tempo gera custos grandes que, em certos casos, podem chegar a inviabilizar todo um projeto.

Observando mais detalhadamente a curva, através da figura 4.37, pode-se destacar as oscilações da tensão de saída quando o alternador está em rotação nominal. Tal fato, como já comentado anteriormente no trabalho, acaba por diminuir o tempo de vida dos equipamentos alimentados pelo alternador, possibilitando a queima ou danificação desses equipamentos, diminuindo a confiabilidade do sistema.

Com essa curva de variação de rotação em mente, foi então replicada tal curva no ambiente de simulação, para que a otimização do controlador desenvolvido neste trabalho preveja não apenas respostas ao degrau, mas também variações de rotação do al-

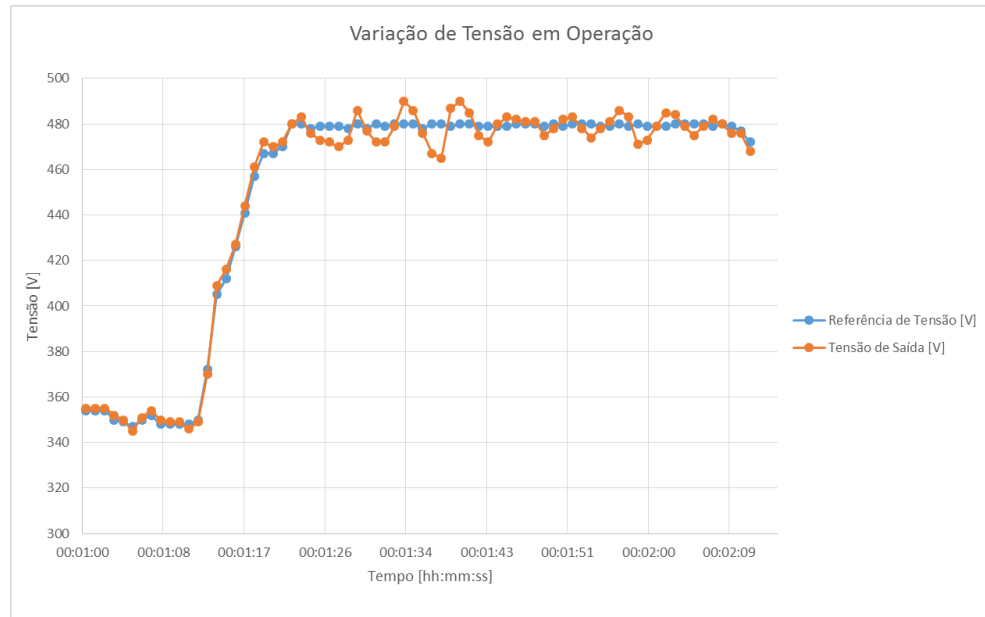


Figura 4.37: Variação de tensão em operação - rotação nominal

ternador que, como apresentado anteriormente neste trabalho, alteram e muito o tipo de resposta do alternador.

A figura 4.38 apresenta a curva de rotação do alternador utilizada no ambiente de simulação. É válido ressaltar que os tempos entre as variações de rotações foram reduzidos para diminuir o tempo de simulação, porém sem que causassem grandes problemas para a resposta do sistema.

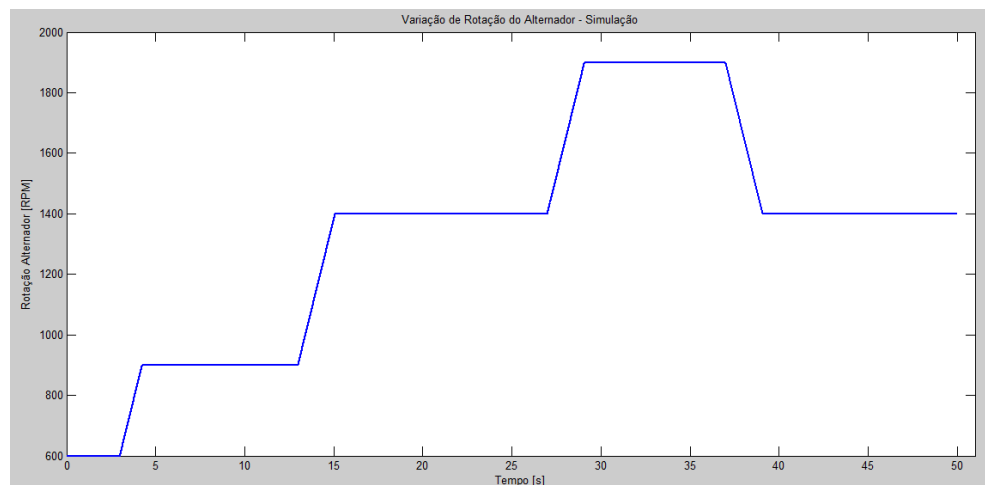


Figura 4.38: Variação de rotação do alternador - simulação

## 4.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as etapas de desenvolvimento do projeto. Nele, foram detalhadas as restrições do projeto, levantados os algoritmos de controle de tensão mais utilizados pela literatura em reguladores de tensão de alternadores, além dos critérios que serão utilizados para a avaliações destes algoritmos. Ainda, foram avaliados dois modelos matemáticos de alternador e escolhido o modelo mais adequado para este projeto. Este modelo foi então ajustado e validado comparando-o com a resposta do alternador real. Com o modelo do alternador definido e ajustado, foi montado o ambiente de simulação e definido o padrão de variação de rotação que será utilizado nas simulações dos algoritmos. Tal ambiente de simulação permitirá a realização dos experimentos com os dois algoritmos de controle para que ambos possam ser comparados. Tais experimentos e comparações são apresentados no próximo capítulo.

# Capítulo 5

## Resultados

Como visto no capítulo anterior, dois algoritmos de otimização de controladores PID se sobressaem na literatura como os mais citados. Sendo assim, neste capítulo será realizada uma análise desses algoritmos, através de simulações com cada um deles para que seja possível definir qual a técnica mais indicada para ser utilizada levando em conta as métricas de comparação já citadas. Tais algoritmos serão avaliados utilizando o ambiente de simulação e os parâmetros descritos no capítulo anterior. A análise da comparação dos algoritmos permitirá escolher um destes para que seja implementado no equipamento já utilizado pela empresa para a regulação de tensão de alternadores. O tempo de processamento do controlador PID implementado e sua resposta serão então comparados com o algoritmos já utilizado pela empresa. Os ensaios serão realizados através da bancada de teste já utilizada anteriormente para o levantamento da curva de resposta do alternador. As etapas e conclusões destas etapas serão melhor explicitadas no decorrer deste capítulo.

### 5.1 Comparação entre algoritmos de otimização

Com os parâmetros de simulação definidos, foi então possível aplicar os algoritmos apresentados anteriormente ao ambiente de simulação. O primeiro algoritmo implementado foi o algoritmo genético. Para facilitar na execução e desenvolvimento do algoritmo de otimização, foi utilizado a ferramenta do próprio Matlab para executar o algoritmo genético. Tal ferramenta é conhecida como GAtool, a qual implementa o algoritmo genético de forma simples, possibilitando o ajuste de diferentes parâmetros do algoritmo de forma fácil e precisa. A GAtool pode ser vista através das figuras 5.1 e 5.2.

Para integrar a ferramenta do Matlab com o ambiente de simulação, foi criado um arquivo que a ferramenta utiliza para executar a simulação. O arquivo gerado (*Gen\_Ctrl\_Tensao.m*) é apresentado no Anexo A.

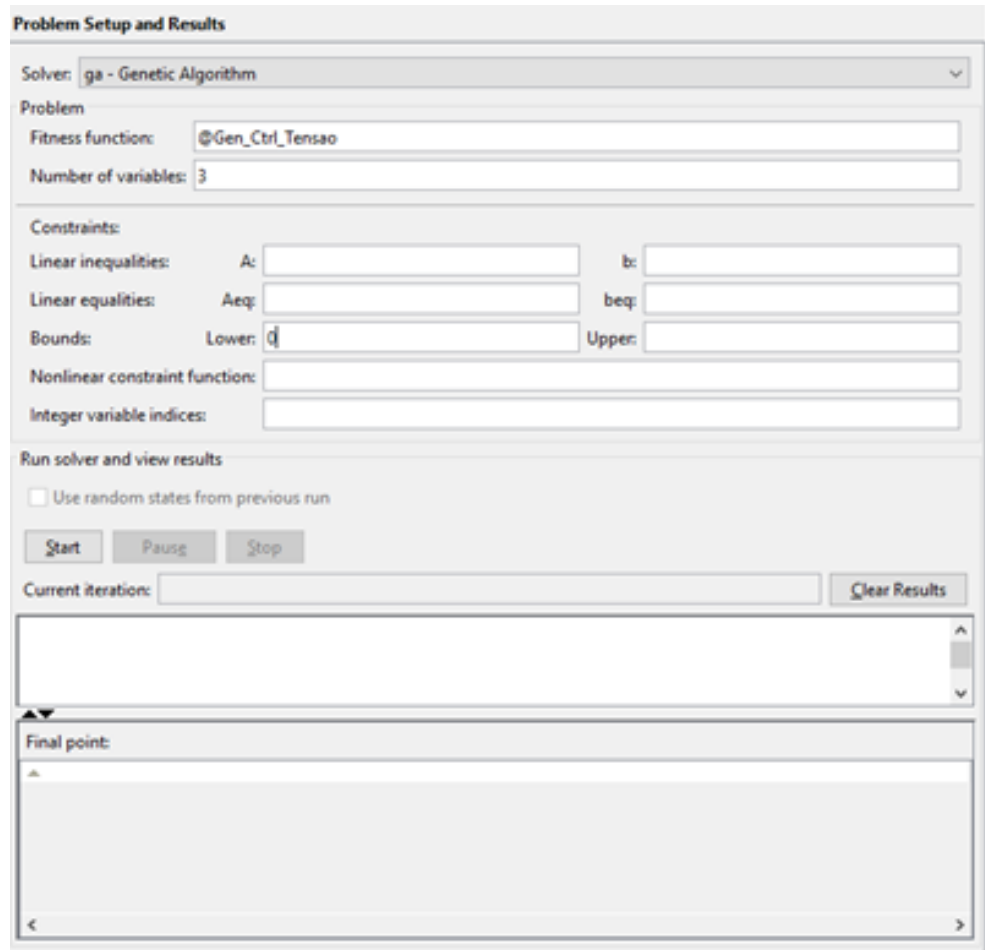


Figura 5.1: Tela GAtool - 1

Este arquivo recebe como parâmetro os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador PID, verifica se todos são positivos e executa a simulação. Caso qualquer um dos ganhos passados como parâmetros sejam negativos, o arquivo não executa a simulação e retorna um valor de ITSE muito alto, penalizando a amostra e fazendo com que ela seja rejeitada pelo algoritmo de otimização. Caso os ganhos estejam na faixa aceitável (maiores que zero), a simulação ocorre e o arquivo retorna o valor de ITSE calculado pela simulação. O objetivo então é achar qual conjunto de parâmetros gera o menor valor de ITSE.

A figura 5.3 mostra a tensão de saída do alternador após o fim da execução do algoritmo genético. Os parâmetros do GA utilizados foram uma população de 50 indivíduos com 300 gerações, além disso foi escolhido utilizar a seleção por roleta. A fração de *crossover* utilizada foi de 0,8 e a mutação foi de 1%. Os valores obtidos para os ganhos do controlador PID foram:

- $K_p = 0,9382$ ;
- $K_i = 0,5210$ ;

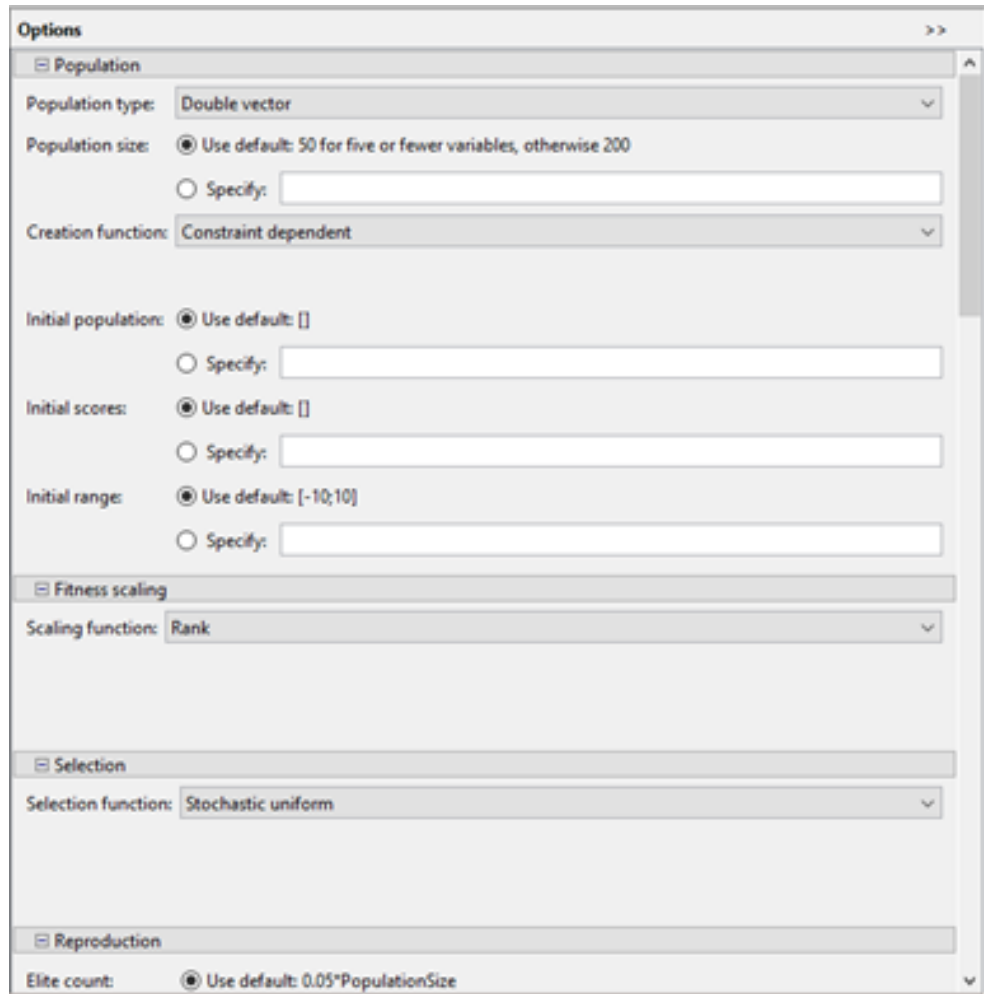


Figura 5.2: Tela GAtool - 2

- $K_d = 0,0998$ ;

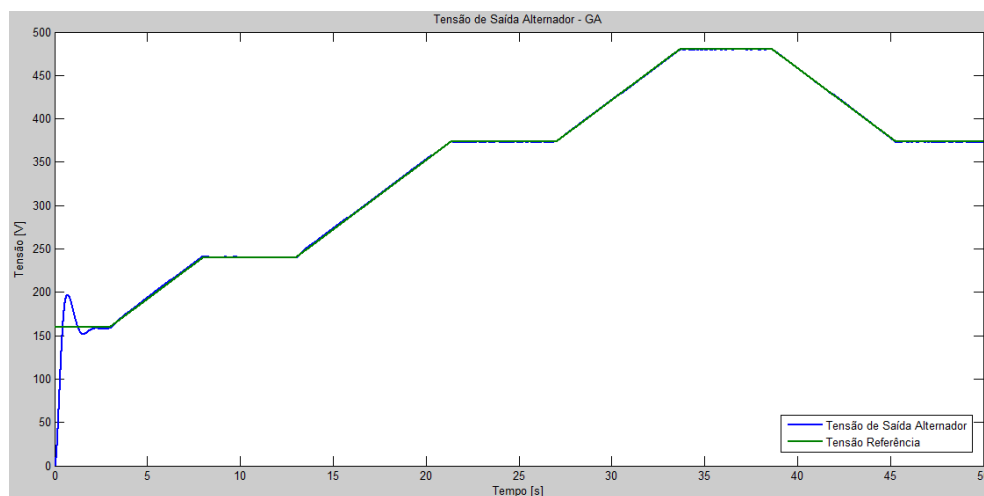


Figura 5.3: Resultado Tensão de Saída - GA

É possível verificar, ao analisar a figura 5.3 que os ganhos obtidos pelo algoritmo genético foram capazes de regular a tensão de saída do alternador. Pode-se verificar um pequeno sobressinal no início da simulação, porém este não é muito significativo.

Após obter o resultado para o GA, foi aplicado o algoritmo PSO, já explicado anteriormente. Para isso, foi utilizado o mesmo arquivo *Gen\_Ctrl\_Tensao.m* e um outro, *PSO\_Ctrl\_Tensao.m*, que aplicava o algoritmo de otimização por enxame de partículas o qual é apresentado no Anexo B.

Este arquivo inicializa os indivíduos, os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , com valores aleatórios entre 0 e 10. Após a inicialização, o algoritmo implementado no arquivo *PSO\_GEN\_CTRL* começa a calcular o ITSE dos indivíduos iniciais executando o ambiente de simulação. Após os cálculos dos ITSE de cada indivíduo, são verificados o melhor ITSE local e o melhor global, para que assim, se possa calcular a velocidade que será aplicada em cada indivíduo, alterando assim os ganhos dos indivíduos sempre em direção ao melhor deles. Depois de aplicado aos indivíduos iniciais, o algoritmo repete essas etapas até o fim das iterações.

A figura 5.4 mostra a tensão de saída do alternador após o fim da execução do algoritmo de otimização por enxame de partículas. Os parâmetros utilizados no PSO foram 50 partículas com 300 iterações, para que fosse igual ao que foi utilizado no GA. Ainda, a inércia utilizada foi de 1, com  $c_1 = c_2 = 2$ . Os valores obtidos para os ganhos do controlador PID foram:

- $K_p = 0,715$ ;
- $K_i = 0,449$ ;
- $K_d = 0,0498$ ;

É possível verificar na figura 5.4 que, como o algoritmo genético, os ganhos escolhidos pelo PSO foram capazes de manter a tensão de saída próxima a tensão de referência, tendo apenas um pequeno sobressinal no início da simulação, porém sendo este pouco significativo. As figuras 5.5 e 5.6 mostram as respostas do algoritmo genético e do PSO nesta curva, a primeira com o tempo total da simulação, e a segunda com os primeiros 3s da simulação.

É possível ver que o algoritmo genético obteve um sobressinal maior que o do PSO, porém o tempo de subida foi um pouco menor. Para que fosse possível comparar melhor o resultado de cada algoritmo, foram calculados o tempo de subida, tempo de estabilização, erro em regime, sobressinal e o tempo de sintonia de cada algoritmo. Assim, os algoritmos podem ser avaliados segundo as métricas pré-definidas no capítulo anterior. A tabela 5.1 mostra os valores de cada métrica calculada para os dois algoritmos.

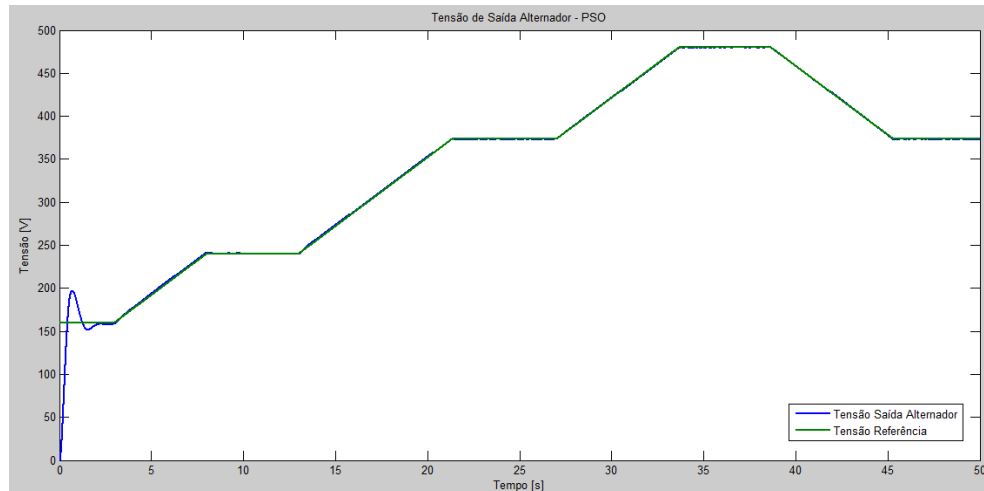


Figura 5.4: Resultado Tensão de Saída - PSO

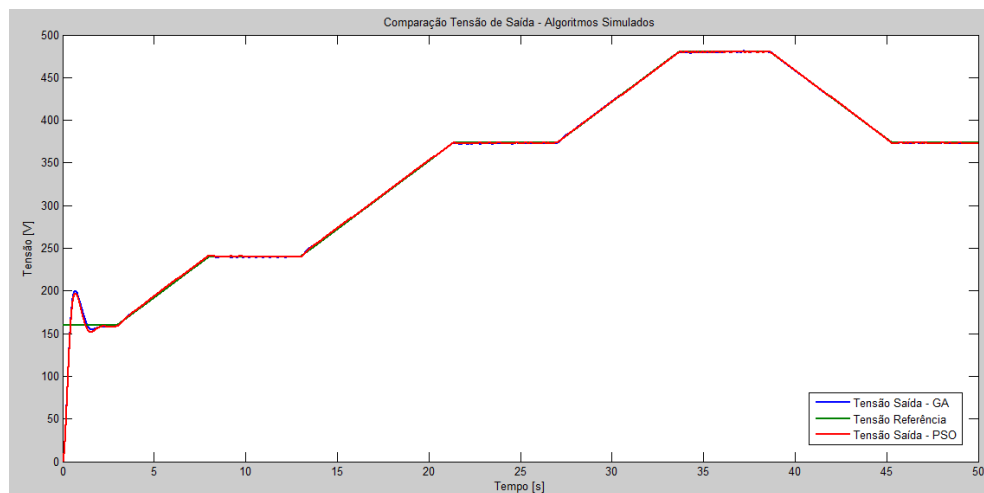


Figura 5.5: Comparação tensão de saída algoritmos

Para auxiliar na comparação dos algoritmos, foram adicionados os pesos de cada uma das métricas, os quais foram discutidos também no capítulo anterior. Estes auxiliam na medição da importância de cada métrica, auxiliando na escolha do algoritmo mais indicado para ser utilizado no regulador de tensão, sendo que, o peso total foi dado ao algoritmo que obteve melhor resultado, enquanto o outro algoritmo recebeu um valor ponderado do peso. A ponderação foi realizada normalizando o melhor resultado, e comparando com o algoritmo de pior resultado, seguindo equação 5.1.

$$PESO\_PONDERADO = \frac{MELHOR\_RESPOSTA}{PIOR\_RESPOSTA} * PESO \quad (5.1)$$

Segundo os resultados apresentados na tabela 5.1, pode-se verificar que o GA obteve um tempo de subida e de estabilização menores que o PSO, sendo assim, como o tempo de subida possui peso 1 e o de estabilização, peso 2, foram atribuídos 1 e 2 ao algo-

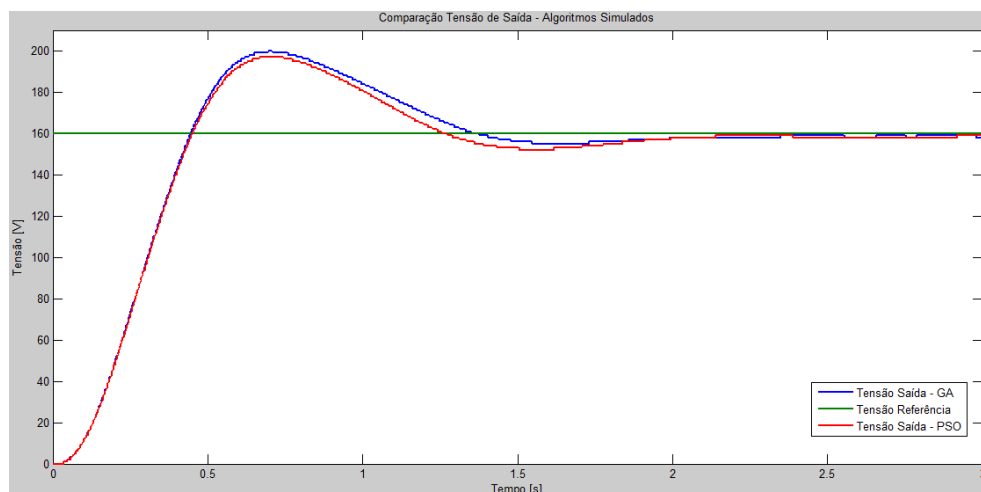


Figura 5.6: Comparação tensão de saída algoritmos - início

Tabela 5.1: Comparação algoritmos de controle

Métricas de avaliação	Peso	GA-PID	Soma GA-PID	PSO-PID	Soma PSO-PID
Tempo de Subida [s]	1	<b>0,428</b>	<b>1</b>	0,432	0,99
Tempo de Estabilização [s]	2	<b>1,232</b>	<b>2</b>	1,618	1,52
Erro em Regime [%]	3	0,1786	1,5	<b>0,0893</b>	<b>3</b>
Sobressinal [%]	4	25	3,7	<b>23,13</b>	<b>4</b>
Tempo de sintonia [h]	3	20,42	2,75	<b>18,75</b>	<b>3</b>
<b>TOTAL</b>	<b>13</b>		<b>10,95</b>		<b>12,51</b>

ritmo genético, e, através da pontareção citada acima, 0,99 e 1,52 ao PSO. Já para o erro em regime, o PSO obteve melhor resultado, obtendo mais 3 pontos devido ao peso deste parâmetro, já o algoritmo genético, como obteve um erro em regime duas vezes maior, obteve 1,5. Os pesos do sobressinal e o tempo de sintonia também foram atribuídos ao PSO pois este obteve melhor desempenho, somando 4 (peso do sobressinal) e 3 (peso do tempo de sintonia), já o algoritmo genético, 3,7 e 2,75. O PSO obteve menor sobressinal máximo, o que pode ser constatado não somente pela tabela, mas também pelos gráficos das curvas de respostas dos algoritmos. O tempo de sintonia do PSO também foi menor, que é considerado o tempo que os algoritmos levaram para calcular todas as iterações até chegar na melhor resposta encontrada por cada um deles.

Analisando então os resultados expostos acima, é possível verificar que o PSO obteve resultado ligeiramente melhor que o GA, sendo assim, o controlador PID obtido a partir deste algoritmo será implementado no sistema embarcado e testado em ambiente real, com um alternador real.

## 5.2 Implementação e testes com o alternador real

Definido os ganhos que seriam utilizados no controlador PID, foi então implementado o controlador no AVR já utilizado pela empresa. Para tanto, foi desenvolvida uma função em linguagem C, que seria chamada a cada 1ms, responsável por implementar o controlador PID e ter como saída o nível de excitação que o AVR deveria utilizar para controlar a tensão de saída do alternador. O pseudo-código com a implementação da função é apresentado no apêndice A.3.

O primeiro passo foi então comparar os tempos de processamento entre o algoritmo já implementado no controlador, e o novo PID implementado. Tal comparação tem como objetivo verificar se o requisito de tempo de processamento foi alcançado na implementação do controlador PID. A tabela 5.2 apresenta os tempos de processamento calculados.

Tabela 5.2: Comparação tempos de processamento algoritmos

Algoritmo	Tempo [ $\mu$ s]
Controlador já utilizado	127
Controlador PID desenvolvido	67

Analisando a tabela acima, é possível verificar que o tempo de execução do controlador PID ficou bem abaixo do requisito do projeto, que é de 250  $\mu$ s, validando assim sua aplicação e garantindo que tal nova função não afetará o funcionamento normal do equipamento.

Com a função implementada, a mesma curva de frequência e definições de referência de tensão utilizadas na simulação foram implementadas em um *software* que realiza o comando do controlador do alternador. Desta forma, as respostas obtidas durante as simulações e os ensaios reais poderiam ser facilmente comparados.

Para a realização dos ensaios no alternador real, foi aproveitada a mesma estrutura utilizada anteriormente para a obtenção da resposta do alternador real, apresentada na seção 4.22.

O primeiro ensaio realizado foi com o algoritmo já utilizado pela empresa. A resposta do algoritmo pode ser vista através da figura 5.7.

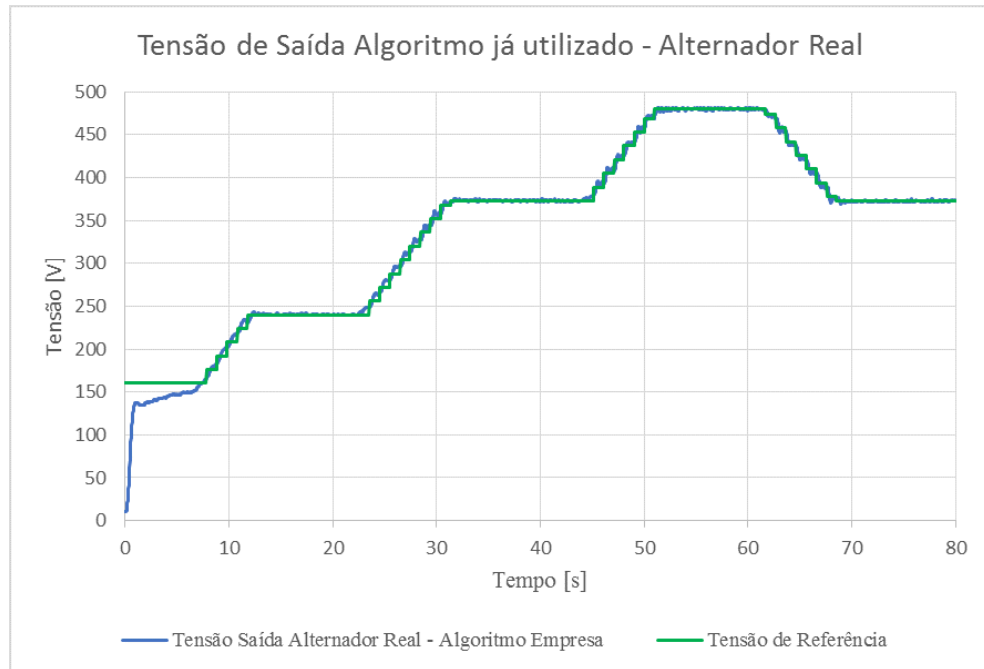


Figura 5.7: Tensão de Saída do Alternador utilizando algoritmo de controle da empresa

Pode-se perceber pela figura 5.7 como o controlador da empresa consegue controlar bem a tensão do alternador, não obtendo nenhum sobressinal significativo, porém, a demora para que a tensão chegue até a tensão de referência não pode ser negligenciada.

Em seguida, foi realizado o mesmo ensaio, porém com o controlador PID implementado, utilizando os ganhos calculados através das simulações do *PSO*. A figura 5.8 apresenta o resultado do ensaio.

A curva de resposta do algoritmo de controle implementado possui um pequeno sobressinal no início do teste, porém, a tensão se estabiliza rapidamente e segue bem a tensão de referência até o fim.

Para uma melhor comparação entre os algoritmos, as duas respostas dos algoritmos foram colocadas no mesmo referencial, juntamente com a resposta advinda da simulação. A figura 5.9 mostra a comparação entre as respostas e a figura 5.10 apresenta a mesma comparação, porém enfatizando o início da curva.

Pouco se pode concluir com a análise da figura 5.9, é visível que ambos os algoritmos seguem a tensão de referência, e que há diferenças no início do teste, porém a resolução não permite maiores conclusões. Porém, observando mais atentamente a figura 5.10, pode-se perceber como a tensão no novo algoritmo atinge a tensão de referência muito tempo antes da resposta do algoritmo utilizado pela empresa. Além disso, pode-se perceber o sobressinal da resposta do controlador PID, porém este se mostrou menor do que a obtida na simulação. Apesar disso, as duas curvas se assemelham bastante, mostrando mais uma vez a eficácia do modelo matemático utilizado durante as simulações.

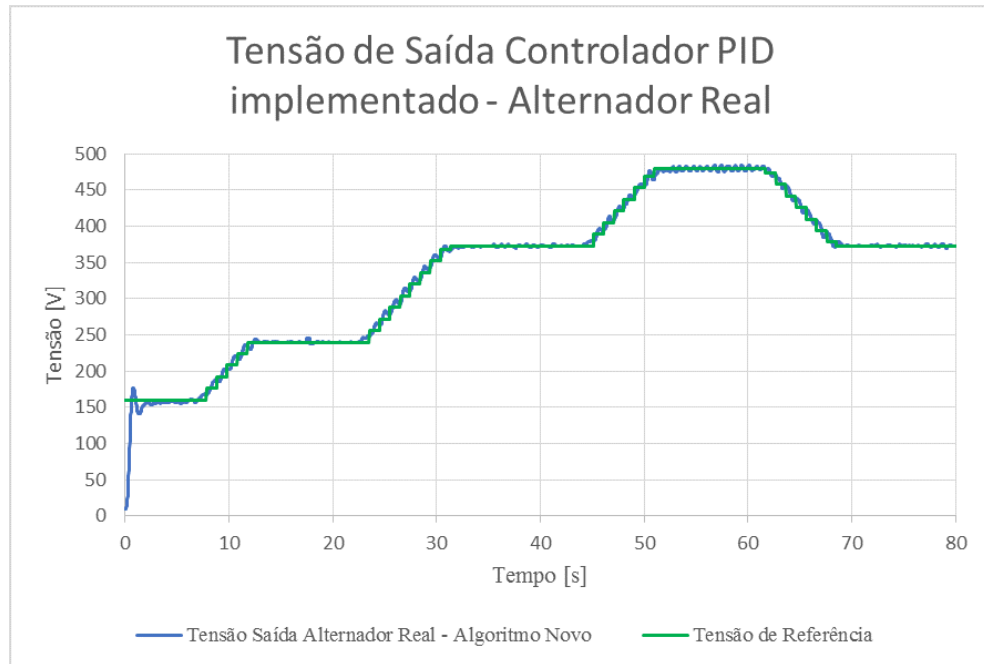


Figura 5.8: Tensão de Saída do Alternador utilizando controlador PID implementado

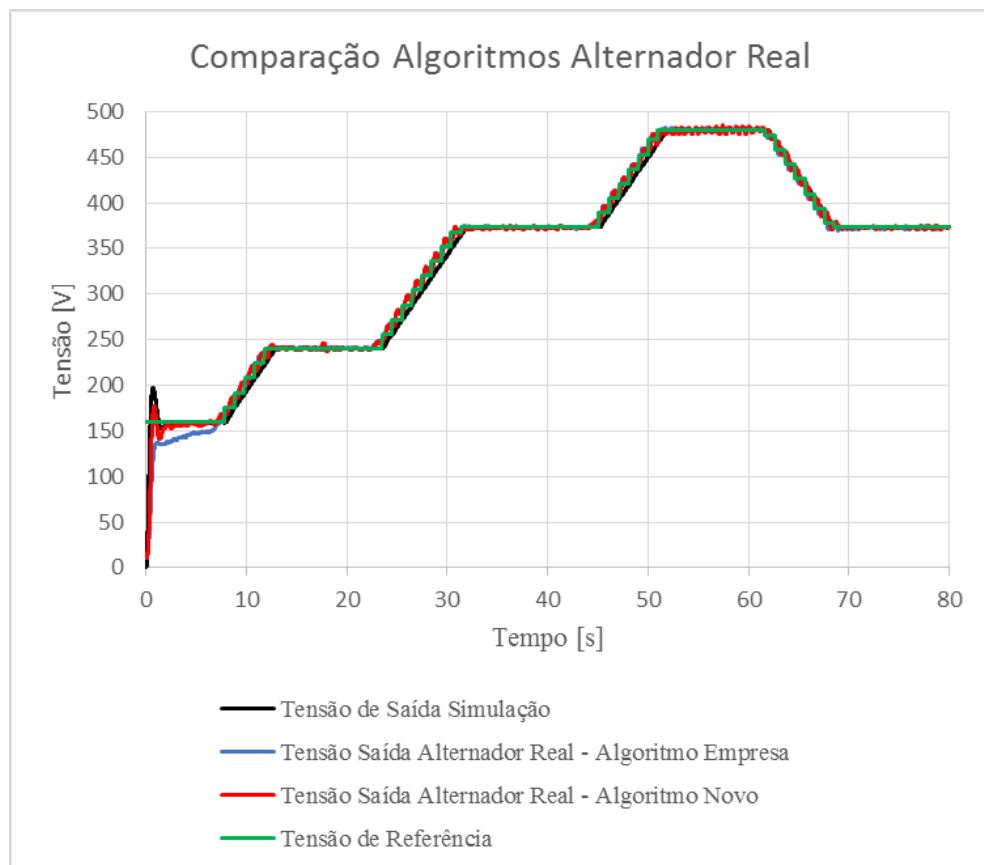


Figura 5.9: Comparação entre os algoritmos no Alternador Real

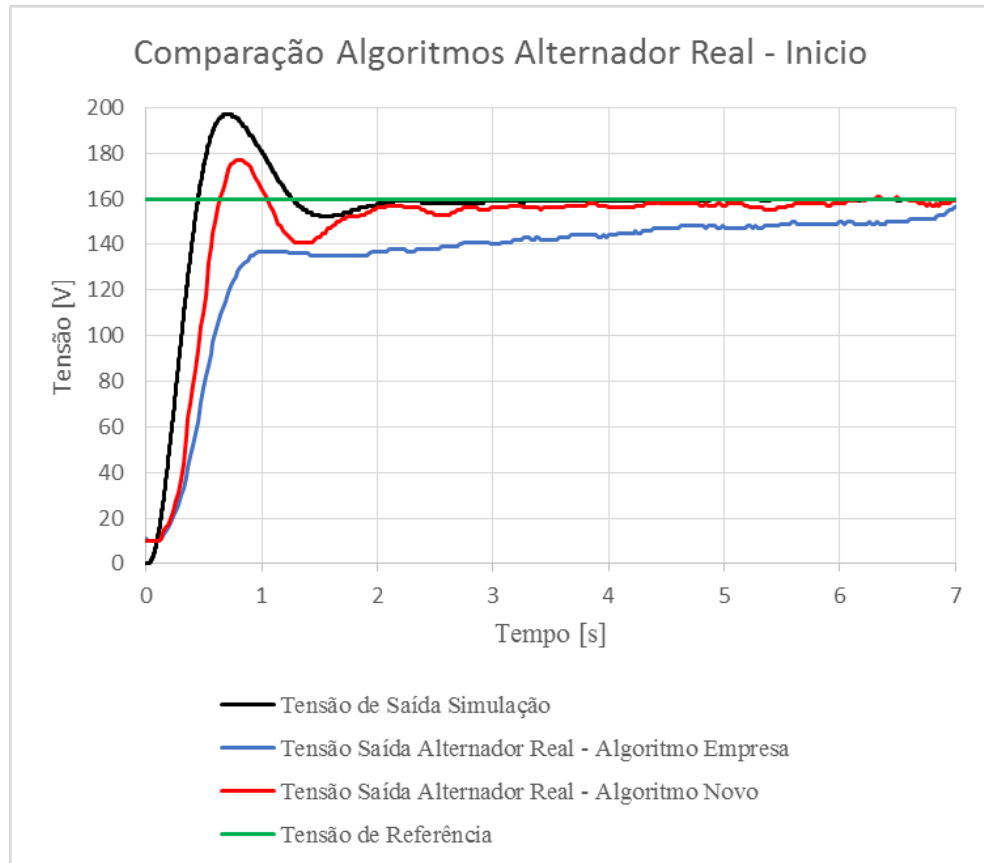


Figura 5.10: Comparação entre os algoritmos no Alternador Real - Início

Isto reforça a semelhança entre o ambiente simulado e real, algo essencial para validar o ambiente de simulação, tornando este possível de ser utilizado em outras aplicações e situações.

Portanto, é possível verificar que o controlador PID obteve um resultado satisfatório, obtendo um tempo de subida menor do que o algoritmo já utilizado pela empresa, apesar de ter maior sobressinal. Além disso, seu tempo de estabilização foi menor. Ainda, é possível verificar a semelhança na resposta do controlador PID quando comparado a aplicação no alternador real e na simulação. A comparação entre as respostas dos algoritmos, apresentada pela tabela 5.3, pode ser melhor analisada utilizando os mesmos critérios de avaliação ponderados utilizados na escolha dos algoritmos.

Como já citado anteriormente, é possível ver como o PSO-PID implementado possuiu um menor tempo de subida e de estabilização, porém um maior sobressinal quando comparado com o algoritmo proprietário da empresa. Ainda analisando a tabela 5.3, é possível verificar que o erro em regime dos dois controladores foi semelhante, porém o tempo de sintonia dá vantagens para a nova abordagem. Como já citado no capítulo introdutório, o algoritmo proprietário da empresa demorou mais de um ano, cerca de 400 horas-homem, para chegar a resposta atual, enquanto o controlador PID imple-

Tabela 5.3: Comparação algoritmos de controle - aplicação real

Métricas de avaliação	Peso	Algoritmo proprietário	Soma Algoritmo proprietário	PSO-PID	Soma PSO-PID
Tempo de Subida [s]	1	6,837	0,09	<b>0,6235</b>	<b>1</b>
Tempo de Estabilização [s]	2	6,837	0,51	<b>1,7415</b>	<b>2</b>
Erro em Regime [%]	3	<b>0,267</b>	<b>3</b>	<b>0,267</b>	<b>3</b>
Sobressinal [%]	4	<b>3,98</b>	<b>4</b>	10,625	1,5
Tempo de sintonia [h]	3	400	0,14	<b>18,75</b>	<b>3</b>
TOTAL	13		7,74		<b>10,5</b>

mentado através do ajuste feito *off-line* foi realizado em apenas algumas horas. Estas 400 horas-homem consideram o tempo do início ao fim do ajuste do algoritmo feito de forma manual, em diversas tentativas, até que uma resposta satisfatória fosse alcançada. Tal algoritmo era apenas ajustado na locomotiva, o que demandava sempre que um engenheiro ou técnico se deslocasse até a locomotiva, além de impedir a operação da locomotiva durante os testes. Em média, estes testes ocorriam durante 3 ou 4 dias, uma vez a cada 1 mês e meio.

### 5.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios realizados neste projeto. Os ensaios permitiram esclarecer e atingir os últimos objetivos deste trabalho, que eram a comparação entre os dois algoritmos mais citados pela literatura, a implementação do melhor algoritmo em um sistema embarcado respeitando suas limitações e a comparação deste com o algoritmo já utilizado pela empresa. As comparações permitiram verificar que o algoritmo de otimização por enxame de partículas obteve um melhor resultado no ajuste do controlador PID do que o algoritmo genético. Além disso, a implementação do novo controlador desenvolvido que utiliza sintonia *off-line* com a ajuda de um algoritmo de otimização por enxame de partículas mostrou-se ter uma resposta mais rápida do que a do algoritmo já utilizado pela empresa, porém com um sobressinal maior. Sendo assim, sua sintonia acabou por ser mais rápida, por utilizar um algoritmo inteli-

gente para o ajuste do controlador PID, ao contrário do algoritmo utilizado pela empresa, ajustado de forma empírica.

# Capítulo 6

## Conclusão

### 6.1 Discussões

Os resultados das aplicações dos controladores apresentados na literatura não possuem informações suficientes que garantam um resultado satisfatório se aplicados ao problema proposto. Em alguns casos, pouco se fala sobre a capacidade do controlador em lidar com sistemas como o apresentado neste trabalho, em outros, o tempo de processamento dos algoritmos não é divulgado, deixando dúvidas sobre a possibilidade de implementação, pois podem ultrapassar as limitantes temporais do sistema ao qual se propõe desenvolver o trabalho. Ou ainda, alguns trabalhos trazem resultados que não garantem a eficiência se aplicados ao sistema proposto, sendo assim, tais fatos limitariam a utilização dos mesmos. Deste modo, encontrou-se uma necessidade de realizar um estudo e avaliação dos métodos utilizados no controle de tensão de alternadores, pois com isso, pode-se determinar qual a técnica mais adequada para ser implementada neste problema.

Ainda sobre os trabalhos estudados, nenhum tratou sobre o problema de mudança de rotação do motor diesel, ou da unidade de geração de energia mecânica. A maioria dos trabalhos considera que a rotação do alternador é fixa, algo que não acontece em aplicações como a ferroviária e a naval. A mudança de rotação pode gerar perturbações no sistema, causando mudanças em seu comportamento, o que agrega dificuldade ao problema.

O modelo matemático do alternador avaliado neste trabalho foi ajustado de acordo com a resposta do alternador real. Isto traz grandes benefícios para os resultados do trabalho, pois com isso, as simulações tendem a ser mais próximas da realidade. Ainda, este modelo pode ser aplicado em outros sistemas em que as curvas de resposta do alternador sejam conhecidas, possibilitando o ajuste do modelo e então, o ambiente de simulação criado pode ser utilizado, seja para analisar o comportamento e resposta dos

algoritmos de controle, como a resposta de algum parâmetro mais específico do alternador.

Outro fato observado foi a predominância na literatura da utilização de algoritmos de otimização para controlador PID como solução de controlador para os reguladores de tensão. Além disso, há uma grande predominância na utilização de algoritmos de enxame de partículas e genético quando se trata de algoritmos de otimização de controladores PID. Uma desvantagem destas técnicas é a dependência do modelo o qual são implantados, por se tratarem de algoritmos ditos off-line, ou seja, são calculados antes da execução final. Isto pode se tornar um problema quando aplicado a alternadores de locomotivas, pois estes podem variar muito os parâmetros devido a manutenções e possíveis danos. Foi por tal fato que se optou pelo ajuste do modelo partindo das curvas do alternador.

Os resultados da comparação dos algoritmos em simulações mostraram que o PSO obteve melhores resultados que o GA. As simulações de ambos os algoritmos foram realizadas considerando a variação de velocidade de rotação do alternador, o qual modifica as características do alternador, como foi verificado durante o trabalho. O padrão de variação de velocidade de rotação do alternador foi baseado na operação de uma locomotiva onde o alternador real é aplicado. A maior diferença que se pode levantar a partir das simulações realizadas é o tempo de sintonia destes algoritmos. Por ser, de certa forma, um algoritmo mais complexo, o GA acaba por ter um tempo de processamento um pouco maior do que o PSO, cerca de 9%. Além disso, seu ajuste, por possuir mais parâmetros, pode não se tornar tão trivial. Apesar desses fatos citados, não houve grande diferença entre os resultados, portanto, uma aplicação com a utilização do GA não deve ser descartada, apesar de o PSO ter obtido melhores resultados nesta aplicação.

Já os resultados da comparação do controlador PID implementado, utilizando os valores de ganho obtidos a partir do PSO, com o algoritmo já utilizado pela empresa mostraram que o novo controlador apresentou melhores resultados utilizando as métricas de comparação discutidas neste trabalho. A maior diferença foi o tempo de sintonia entre eles. Como já citado anteriormente no trabalho, o algoritmo utilizado pela empresa demorou mais de um ano, por volta de 400 horas-homem, para ser sintonizado, por utilizar uma sintonia empírica, seu ajuste não é trivial. Já o novo controlador PID, por utilizar um método inteligente para ajustar seus ganhos, faz com que sua sintonia seja mais eficiente. Outro fator relevante foi o tempo de processamento dos dois controladores. O novo controlador utilizou quase a metade do tempo de processamento que o algoritmo da empresa utiliza, abrindo algumas possibilidades para a implementação de outras funcionalidades no mesmo equipamento, ou até mesmo, o estudo de alguma melhoria neste algoritmo.

## 6.2 Conclusões

O mercado ferroviário brasileiro está em ampla expansão e com ele há um grande aumento do investimento nesta área não só no Brasil como no mundo. Sendo assim, a demanda por novas tecnologias que melhorem a durabilidade e desempenho dos sistemas atuais vem crescendo. Dentre essas tecnologias, podem se destacar o avanço do desenvolvimento de reguladores automáticos de tensão digitais. Este avanço se dá, principalmente, na procura de algoritmos de controle robustos o suficiente para lidar com as particularidades dos sistemas aos quais são utilizados, porém, sem deixarem de ser simples e flexíveis, para que possam ser facilmente e amplamente utilizados em diversos tipos de locomotivas diferentes. Muitos trabalhos sobre tal assunto vêm sendo apresentados durante estes últimos anos, onde se podem destacar os algoritmos inteligentes que otimizam controladores PID. Porém, os resultados destes trabalhos não são suficientes para apontar qual o melhor algoritmo para ser utilizado na regulação de tensão de alternadores com mudança de rotação. Tais algoritmos possuem grande dependência do modelo matemático ao qual são aplicados quando ajustados previamente, ou seja, quando são ajustados em modo *off-line*. Portanto, durante este trabalho, foram levantadas as curvas do alternador ao qual o controlador será aplicado através de uma bancada de testes para que fosse assim obtido um modelo de alternador mais próximo do real. Com o modelo do alternador, foi realizada uma pesquisa e análise dos algoritmos utilizados em reguladores de tensão automáticos (AVRs) mais citados pela literatura. A pesquisa mostrou que a técnica mais utilizada este tipo de controle é a de otimização de controladores PID utilizando métodos inteligentes. Dentre esses métodos, se destacam o Algoritmo Genético (GA) e o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Esses dois algoritmos foram então comparados através de métricas definidas durante o trabalho para que fosse possível verificar qual dos algoritmos seria o mais indicado para ser utilizado em um regulador de tensão real aplicado em uma locomotiva, o qual já possui um algoritmo implementado, porém que levou muito tempo para ser ajustado. O resultado da comparação demonstrou que o PSO obteve melhor desempenho quando aplicado em um ambiente de simulação com o modelo do alternador implementado e considerando um padrão de mudança de velocidade de rotação do alternador retirado de uma aplicação real. O controlador PID ajustado através do PSO foi então implementado no sistema embarcado já utilizado na regulação de um alternador para que assim fosse possível comparar o controlador PID ajustado pelo PSO com o algoritmo já utilizado no regulador. Este ainda devia respeitar a limitação do sistema embarcado quanto ao tempo de processamento disponível para o cálculo do controlador, que era de  $250 \mu\text{s}$ . O resultado mostrou que o novo controlador obteve menor tempo de subida e de estabilização, porém com maior sobressinal (pouco significativo, por se manter dentro dos 10% inicialmente estabelecidos), além do tempo

de processamento que ficou dentro do limite definido. A grande contribuição foi o tempo de sintonia do novo controlador, enquanto o controlador já existente demorou por volta de 400 horas-homem para ter o atual desempenho, o novo controlador pode ser ajustado em muito menos tempo, mais precisamente 18,75 horas, utilizando-se do ambiente de simulação e da aplicação do algoritmo de otimização. Este ganho é de grande importância quando se trata de controladores aplicados na indústria por reduzir drasticamente o custo de ajuste de tal controlador.

Os objetivos deste trabalho foram então atingidos: o modelo do alternador foi proposto, analisado e avaliado, as métricas para comparação dos algoritmos foram definidas, um estudo para verificar quais as técnicas de controle mais citadas pela literatura foi realizada, permitindo que uma comparação entre as duas técnicas mais citadas pela literatura fosse realizada. O PSO, técnica que obteve melhor resultado, foi implementada no AVR já utilizado pela empresa para o controle de alternadores, onde o tempo de processamento do controlador PID respeita a limitação de ( $250\mu s$ ) imposta pelo equipamento. O controlador PID implementado foi então testado em um alternador real, e seus resultados foram comparados com o algoritmo já utilizado pela empresa. Dentre as contribuições deste trabalho estão o estudo bibliográfico sobre os algoritmos de controle utilizados em reguladores de tensão, o qual permitiu verificar a predominância do uso de algoritmos para a otimização de controladores PID. Outra contribuição foi o método de levantamento da curva do alternador real, o qual foi validado através da comparação das respostas do algoritmo simulado e do real. Ainda, uma terceira contribuição foi a apresentação do modelo matemático do alternador real utilizando a ferramenta Simulink do Matlab e o desenvolvimento de um ambiente de simulação que possibilita a avaliação de diferentes tipos de algoritmos de controle, entre outros parâmetros tanto do alternador como das cargas. Tal modelo matemático não foi encontrado na literatura, o qual considera a variação da velocidade de rotação do alternador para determinar a resposta do sistema e que foi ajustado através de um alternador real, o que o tornou ainda próximo à realidade. Ainda, o ambiente de simulação criado utiliza este modelo ajustado e possibilita sua utilização para a avaliação e comparação de outras abordagens de controle e também a variação de outros parâmetros tanto do próprio alternador, como também de diferentes tipos de cargas, não somente em aplicações ferroviárias. Outras contribuições notáveis foram a comparação entre duas técnicas mais citadas pela literatura para a regulação de tensão, a aplicação de um algoritmo em uma aplicação real e a comparação deste novo controlador com uma técnica de controle já utilizada na indústria.

### 6.3 Trabalhos Futuros

Como já discutido nas seções anteriores deste capítulo, este trabalho abre a oportunidade para que outros estudos sejam realizados dentro desta aplicação ferroviária e de controle de alternadores. O modelo matemático do alternador apresentado foi ajustado através da resposta do alternador real. Porém um estudo mais aprofundado deste modelo pode ser realizado, aproveitando os caminhos deixados por este trabalho, para que um modelo mais simples e eficaz seja desenvolvido. Outra possibilidade de estudo deixado por este trabalho é a utilização de outros tipos de controladores. Foram aqui discutidos vários tipos de controladores, onde neste trabalho, foram utilizados algoritmos de sintonia *off-line*, porém, outros tipos de algoritmos podem ser estudados para esta aplicação, principalmente algoritmos adaptativos, ou até mesmo, algoritmos híbridos, como por exemplo, algoritmos *Fuzzy*-PID. Tal estudo se torna possível pela "sobra" de tempo de processamento verificada com a aplicação do controlador PID. Ainda, outros problemas de alternadores de velocidade de rotação variada podem ser estudados, como por exemplo, alternadores que mantêm a mesma tensão de saída, não importando a velocidade de rotação em que se encontram. Tais alternadores são também bastante utilizados em aplicações ferroviárias, e seu controle também se mostrou não trivial em outras aplicações realizadas pela empresa em que o autor trabalha.

## Referências Bibliográficas

- [AAR, 2015] AAR (2015). Association of american railroads. <https://www.aar.org>. Acessado em 05/07/2015.
- [ACM, 2015] ACM (2015). Association for computing machinery. <http://dl.acm.org/>. Acessado em 15/07/2015.
- [Algreer et al., 2011] Algreer, M., Armstrong, M., and Giaouris, D. (2011). Adaptive pd+i control of a switch-mode dc–dc power converter using a recursive fir predictor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(5):2135–2144.
- [Ang et al., 2005] Ang, K. H., Chong, G., and Li, Y. (2005). Pid control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4):559–576.
- [Asama et al., 2002] Asama, M., Ukai, H., Sone, M., and Nakamura, K. (2002). Comparative studies of digital avr for use on engine generator between  $h_{\infty}$  control and direct design pid control. In *Proceedings of the Power Conversion Conference*.
- [Astrom, 2002] Astrom, K. J. (2002). Caltech. <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>. Acessado em 10/10/2016.
- [Azzouz and Elshafei, 2010] Azzouz, M. and Elshafei, A. (2010). An adaptive fuzzy regulation of the dc-bus voltage in wind energy conversion systems. In *3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pages 1193–1198.
- [Barbi, 2006] Barbi, I. (2006). *Eletrônica de Potência*. Florianópolis.
- [Boldea, 2016] Boldea, I. (2016). *Synchronous Generators*. CRC Press.
- [CIA, 2015] CIA (2015). Country comparison :: Railways. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2121rank.html>. Acessado em 05/07/2015.

- [Coelho and Herrera, 2008] Coelho, L. and Herrera, B. A. M. (2008). Quantum gaussian particle swarm optimization approach for pid controller design in avr system. In *3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- [Corp., 2016a] Corp., M. E. (2016a). Installation, operation & maintenance manual. <http://www.marathonelectric.com/MGPS/details.jsp?item=287PSL1702z&voltage=240Y/480Y&hertz=60&phase=3&brand=MagnaPlus&type=Alternate&selectedModel=287PSL1702>. Acessado em 29/09/2016.
- [Corp., 2016b] Corp., M. E. (2016b). Performance data sheet. <http://www.marathonelectric.com/MGPS/details.jsp?item=287PSL1702&voltage=240Y/480Y&hertz=60&phase=3&brand=MagnaPlus&type=Alternate&selectedModel=287PSL1702>. Acessado em 29/09/2016.
- [Council, 2007] Council, I. (2007). Lighting the way: Toward a sustainable energy future. <http://www.interacademycouncil.net/File.aspx?id=24548>. Acessado em 02/03/2017.
- [Dadvandipour et al., 2015] Dadvandipour, S., Dizaji, N., and Entezar, S. (2015). An approach to optimize the proportional-integral-derivative controller system. In *3<sup>rd</sup> 6<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Szilvasvarad.
- [Das and Pan, 2014] Das, S. and Pan, I. (2014). On the mixed  $h_2/h_\infty$  loop-shaping tradeoffs in fractional-order control of the avr system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4):1982 – 1991.
- [Daware, 2014] Daware, K. (2014). Electricaleasy. <http://www.electricaleasy.com/2014/02/synchronous-motor-construction-working.html>. Acessado em 22/04/2016.
- [Devaraj and Selvabala, 2009] Devaraj, D. and Selvabala, B. (2009). Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral - derivative controller in automatic voltage regulator system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 3(7):641–649.
- [Drainkov et al., 1993] Drainkov, D., Hellendoorn, H., and Reinfrank, M. (1993). *An introduction to fuzzy control*. Springer Berlin Heidelberg.

- [Electricians, 2007] Electricians (2007). Motor formulas. <http://www.elec-toolbox.com/Formulas/Motor/mtrform.htm>. Acessado em 23/04/2016.
- [Farouk and Bingqi, 2012] Farouk, N. and Bingqi, T. (2012). Application of self-tuning fuzzy pid controller on the avr system. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Mechatronics and Automation*, Chendgu.
- [Feng, 2006] Feng, G. (2006). A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(5):676–697.
- [Fermino, 2014] Fermino, F. (2014). Estudo comparativo de métodos de sintonia de controladores pid. Master's thesis, Universidade de São Paulo, Campus São Carlos.
- [Finch et al., 1989] Finch, J., Zachariah, K., and Farsi, M. (1989). Generalised predictive control applied to a turbogenerator voltage regulator. In *Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives*.
- [Finch et al., 1991] Finch, J., Zachariah, K., Farsi, M., and Ham, P. (1991). Advanced digital techniques applied to turbine generator excitation control. In *International Conference on Control*.
- [Fusco and Russo, 2008] Fusco, G. and Russo, M. (2008). Adaptive voltage regulator design for synchronous generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3):946 – 956.
- [Gaing, 2004] Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of pid controller in avr system. *IEEE Power & Energy Society*, 19(2):384–391.
- [Ghouraf and Naceri, 2014] Ghouraf, D. E. and Naceri, A. (2014). An advanced pid-pss based genetic algorithms implemented using gui - matlab. In *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*.
- [Gozde et al., 2014] Gozde, H., Taplamacioğlu, M., and Ari, M. (2014). Automatic voltage regulator (avr) design with chaotic particle swarm optimization. In *3<sup>rd</sup> 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*.
- [Güven and Passino, 2001] Güven, M. K. and Passino, K. M. (2001). Avoiding exponential parameter growth in fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(1).
- [Hasanien, 2013] Hasanien, H. M. (2013). Design optimization of pid controller in automatic voltage regulator system using taguchi combined genetic algorithm method. *IEEE Systems Journal*, 7(4):825 – 831.

- [HD, 2016] HD, S. T. (2016). Nova locomotiva 0km ano 2014 (n<sup>o</sup>1402 rail pr7 motor ca-tepillar). <https://www.youtube.com/watch?v=N1jr4PWPPWw>. Acessado em 30/04/2016.
- [Hu, 2006] Hu, X. (2006). Particle swarm optimization: Tutorial. <http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php>. Acessado em 06/10/2016.
- [IEEE, 2015] IEEE (2015). Ieee xplore. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. Acessado em 15/07/2015.
- [Jabbari et al., 2011] Jabbari, M., Niknam, T., and Hosseinpour, H. (2011). Multi-objective fuzzy adaptive pso for placement of avrs considering dgs. In *IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*.
- [Jackson, 2014] Jackson, S. (2014). Nanogrid. Master's thesis, University of California - Santa Cruz, Santa Cruz.
- [Jadric, 1998] Jadric, I. (1998). Modeling and control of a synchronous generator with electronic load. Master's thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [Jamaan et al., 2004] Jamaan, S., Majid, M., Mustaffa, M., and Rahman, H. A. (2004). A comparative study of pi and fuzzy logic automatic voltage regulator of a micro-alternator system. In *National Power and Energy Conference*.
- [Kahouli et al., 2009] Kahouli, A., Guesmi, T., and Abdallah, H. H. (2009). A genetic algorithm pss and avr controller for electrical power system stability. In *6<sup>th</sup> International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*.
- [Karimi-Ghartemani et al., 2007] Karimi-Ghartemani, M., Zamani, M., and Sadati, N. (2007). An optimal fractional order controller for an avr system using particle swarm optimization algorithm. In *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*.
- [Khanna, 2003] Khanna, V. K. (2003). *Novel IGBT Design Concepts, Structural Innovations, and Emerging Technologies*. Wiley-IEEE Press.
- [Khedr et al., 2013] Khedr, S. F. M., Ammar, M. E., and Hassan, M. A. M. (2013). Multi objective genetic algorithm controller's tuning for non-linear automatic voltage regulator. In *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*.

- [Kim et al., 2008] Kim, K., Rao, P., and Burnworth, J. (2008). Application of swarm intelligence to a digital excitation control system. In *IEEE Swarm Intelligence Symposium*.
- [Kim et al., 2010] Kim, K., Rao, P., and Burnworth, J. A. (2010). Self-tuning of the pid controller for a digital excitation control system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4):1518 – 1524.
- [Kouba et al., 2015a] Kouba, N. E. Y., Mena, M., Hasni, M., and Boudour, M. (2015a). A novel robust automatic generation control in interconnected multi-area power system based on bat inspired algorithm. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*.
- [Kouba et al., 2015b] Kouba, N. E. Y., Mena, M., Hasni, M., and Boudour, M. (2015b). Optimal control of frequency and voltage variations using pid controller based on particle swarm optimization. In *4<sup>th</sup> International Conference on Systems and Control (ICSC)*.
- [Kumar and Shankar, 2015] Kumar, A. and Shankar, G. (2015). Priority based optimization of pid controller for automatic voltage regulator system using gravitational search algorithm. In *International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*.
- [Lee et al., 2008] Lee, D. H., Kim, T. H., and Ahn, J. W. (2008). Control of digital avr in stand alone generator for improved dynamic characteristics. In *3<sup>rd</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes.
- [Li et al., 2010] Li, H., Li, F., Xu, Y., Rizy, D., and Kueck, J. (2010). Adaptive voltage control with distributed energy resources: Algorithm, theoretical analysis, simulation, and field test verification. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3):1638–1647.
- [Liu et al., 2012] Liu, Y., Wang, X., and Li, Y. (2012). A modified fruit-fly optimization algorithm aided pid controller designing. In *10<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*.
- [Madinehi et al., 2011] Madinehi, N., Amirkabir, T. I., Shaloudegi, K., Abedi, M., and Abyaneh, H. (2011). Optimum design of pid controller in avr system using intelligent methods. In *3<sup>rd</sup> IEEE Trondheim PowerTech*, pages 1–6, Trondheim.
- [Majumdar et al., 2014] Majumdar, S., Mandal, K., and Chakraborty, N. (2014). Performance study of mine blast algorithm for automatic voltage regulator tuning. In *Annual IEEE India Conference (INDICON)*.

- [Mandal et al., 2011] Mandal, A., Zafar, H., Ghosh, P., Das, S., and Abraham, A. (2011). An efficient memetic algorithm for parameter tuning of pid controller in avr system. In *11<sup>th</sup> International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS)*.
- [Manzano, 2013] Manzano, J. H. (2013). Transporte rodoviário x transporte ferroviário. <https://brasildelonge.com/tag/transporte-rodoviario-x-transporte-ferroviario/>. Acessado em 02/03/2017.
- [Marre, 1996] Marre, L. A. (1996). *Diesel Locomotives: The First 50 Years*. Kalmbach Publishing Company.
- [Martini and Fabro, 2013] Martini, G. and Fabro, J. (2013). Hybrid filter for high-power converter systems. In *26th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)*, Curitiba.
- [Mathworks, 2016a] Mathworks (2016a). Simulink. <http://www.mathworks.com/products/simulink/>. Acessado em 30/04/2016.
- [Mathworks, 2016b] Mathworks (2016b). Synchronous machine. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html>. Acessado em 29/09/2016.
- [Matlab, 2016] Matlab (2016). Control tutorials for matlab & simulink. <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>. Acessado em 10/10/2016.
- [McArdle et al., 2001] McArdle, M., Morrow, D., Calvert, P., and Cadel, O. (2001). A hybrid pi and pd type fuzzy logic controller for automatic voltage regulation of the small alternator. In *3<sup>rd</sup> Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver.
- [Mitra et al., 2007] Mitra, P., Maulik, S., Chowdhury, S. P., and Chowdhury, S. (2007). Anfis based automatic voltage regulator with hybrid learning algorithm. In *42<sup>nd</sup> International Universities Power Engineering Conference*.
- [Mohammadi et al., 2009] Mohammadi, S. M. A., Gharaveisi, A., Mashinchi, M., and Rafiei, S. (2009). New evolutionary methods for optimal design of pid controllers for avr system. In *IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest.
- [Mohammed et al., 2014] Mohammed, N. F., Song, E., Ma, X., and Hayat, Q. (2014). Tuning of pid controller of synchronous generators using genetic algorithm. In *3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*.

- [Morsali et al., 2014] Morsali, J., Parhizkar, A., Morsali, H., and Zeinali, A. (2014). Recommendation of equipping steam unit of khoy combined cycle power plant with novel pid-pss2b industrial stabilizer to decrease risk of sudden trips. In *5<sup>th</sup> Conference on Thermal Power Plants (CTPP)*.
- [Mukherjee and Ghoshal, 2008] Mukherjee, V. and Ghoshal, S. P. (2008). Crazyness based and velocity relaxed swarm optimized intelligent pid controlled avr system. In *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*.
- [Naderi et al., 2007] Naderi, F., Gharaveisi, A. A., and Rashidinejad, M. (2007). Optimal design of type 1 tsk fuzzy controller using grla for avr system. In *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*.
- [Nangru et al., 2013] Nangru, D., Bairwa, D. K., and Singh, K. (2013). Modified pso based pid controller for stable processes. In *International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE)*.
- [Nirmal and Auxillia, 2013] Nirmal, J. F. and Auxillia, D. J. (2013). Adaptive pso based tuning of pid controller for an automatic voltage regulator system. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*.
- [Nussenzveig, 2006] Nussenzveig, H. M. (2006). *Curso de Física Básica 3 Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgard Blücher.
- [Ogata, 1970] Ogata, K. (1970). *Modern Control Engineering*. N. J.: Prentice-Hall.
- [Ou et al., 2013] Ou, T.-C., Tsao, T.-P., Hong, C.-M., and Chen, C.-H. (2013). Hybrid control system for automatic voltage regulator in smart grid. In *International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*.
- [Ozturk et al., 2015] Ozturk, A., Tosun, S., Alkan, S., and Bozali, B. (2015). Investigating voltage stability problem in the electrical power system using gravitational search algorithms. In *9<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*.
- [Park et al., 2009] Park, S. H., Yu, J. S., Lee, S. S., Lee, S. W., and Won, C. Y. (2009). Output voltage control of synchronous generator for ships using a pmg type digital avr. In *3<sup>rd</sup> IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose.
- [Priyambada et al., 2014] Priyambada, S., Mohanty, P. K., and Sahu, B. K. (2014). Automatic voltage regulator using tlbo algorithm optimized pid controller. In *9<sup>th</sup> International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*.

- [Rahimian and Raahemifar, 2011] Rahimian, M. S. and Raahemifar, K. (2011). Optimal pid controller design for avr system using particle swarm optimization algorithm. In *3<sup>rd</sup> 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*.
- [Ramya et al., 2013] Ramya, R., Selvi, K., and Nivethitha, S. S. (2013). Optimization of synchronous generator excitation controller parameters. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*.
- [Ricardo, 2016] Ricardo, C. (2016). O trem fosse o principal transporte no brasil? <http://super.abril.com.br/comportamento/o-trem-fosse-o-principal-transporte-no-brasil/>. Acessado em 02/03/2017.
- [Sahu et al., 2012a] Sahu, B., Mohanty, P., Panda, S., and Mishra, N. (2012a). Robust analysis and design of pid controlled avr system using pattern search algorithm. In *3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Bengaluru*.
- [Sahu et al., 2012b] Sahu, B. K., Mohanty, P. K., Panda, S., Kar, S. K., and Mishra, N. (2012b). Design and comparative performance analysis of pid controlled automatic voltage regulator tuned by many optimizing liaisons. In *International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*.
- [Salem et al., 2000] Salem, M., Zaki, A., Mahgoub, O., El-Zahab, E., and Malik, O. (2000). Experimental verification of a generating unit excitation neuro-controller. In *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*.
- [Schaefer and Kim, 2014] Schaefer, R. C. and Kim, K. (2014). Auto tuning speeds commissioning of the generator excitation system. In *3<sup>rd</sup> Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*.
- [Smith, 1993] Smith, J. (1993). Modern automatic voltage regulators. In *2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Power System Control*.
- [Soedibyso et al., 2015] Soedibyso, Citraningrum, M. S., Ashari, M., and Pamuji, F. A. (2015). Design of frequency control on hybrid wind-diesel with pid-firefly. In *International Electronics Symposium (IES)*.
- [Spoljaric et al., 2010] Spoljaric, Z., Miklosevic, K., and Jerkovic, V. (2010). Synchronous generator modeling using matlab. Master's thesis, Department of Electromechanical Engineering Faculty of Electrical Engineering, University of Osijek, Croatia.

- [Springer, 2015] Springer (2015). Springer science+business media. <http://link.springer.com/>. Acessado em 15/07/2015.
- [Sreekumar and Agarwal, 2008] Sreekumar, C. and Agarwal, V. (2008). A hybrid control algorithm for voltage regulation in dc–dc boost converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6):2530–2538.
- [Valizadeh et al., 2008] Valizadeh, S., Jamali, M. R., and Lucas, C. (2008). A particle-swarm-based approach for optimum design of belbic controller in avr system. In *International Conference on Control, Automation and Systems*.
- [Vani et al., 2009] Vani, M. U., Raju, G. S., and Prasad, K. R. L. (2009). Robust supplementary controllers for avr and pss. In *Annual IEEE India Conference (INDICON)*.
- [Winter et al., 1996] Winter, G., Périaux, J., Galan, M., and Cuesta, P. (1996). *Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc.
- [Yegireddy and Panda, 2014] Yegireddy, N. K. and Panda, S. (2014). Design and performance analysis of pid controller for an avr system using multi-objective non-dominated shorting genetic algorithm-ii. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*.
- [Yegireddy et al., 2015] Yegireddy, N. K., Panda, S., Tentu, P., and K., D. (2015). Comparative analysis of pid controller for an automatic voltage regulator system. In *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*.
- [Zhang, 2011] Zhang, G. (2011). Marine diesel-generator excitation controller based on adaptive on-line ga tuning pid. In *30<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC)*.

# Apêndice A

## A.1 Código do Arquivo *Gen\_Ctrl\_Tensao.m*

```
1 function Ieq = Gen_Ctrl_Tensao(pid)
2
3     %Período de amostragem da simulação
4     Ts = 1e-3;
5
6     %Ganhos PID tensão de saída gerador
7     KpV = pid(1);
8     KiV = pid(2);
9     KdV = pid(3);
10
11     %Verifica se está na faixa aceitável
12     if (pid(1) < 0 || ...
13         pid(2) < 0 || ...
14         pid(3) < 0)
15         Ieq = 1e20;
16     else
17
18         %Desliga os alertas para deixar a execução mais limpa
19         warning off
20
21         %Integral do erro quadrático
22         IEQ = 0;
23
24         %Roda a simulação do modelo
25         simulacao = sim('Modelo_gerador_final','SimulationMode',
26             'normal','SrcWorkspace','Current');
27
28         %Pega a última amostra do integral do erro
29         n_amostras = size(simulacao.get('IEQ'));
30         Ieq = simulacao.get('IEQ');
31         Ieq = Ieq(n_amostras(1));
```

```

32     end
33 end

```

## A.2 Código do Arquivo *PSO\_Gen\_Ctrl.m*

```

1  %% Inicializacao
2
3  %Limpa a tela e as variaveis do Matlab
4  clear
5  clc
6
7  %Define o tamanho da populacao
8  n = 10;
9
10 %Define o maximo de iteracoes
11 bird_setp = 10;
12
13 %Define a dimensao dos individuos
14 dim = 3;
15
16 %Inicializa as variaveis
17 best_fitness_graph = zeros(1, bird_setp);
18 fitness_graph = zeros(1,bird_setp*n);
19 gain_graph = zeros(bird_setp*n, dim);
20 fitness=0*ones(n,bird_setp);
21 current_fitness =0*ones(n,1);
22
23 %Define os valores de C1 e C2
24 c2 = 2;
25 c1 = 2;
26
27 %Define o valor da Inercia
28 w = 1;
29
30 Ts = 1e-3;
31
32 %Inicializa as matrizes utilizadas para o calculo da velocidade
33 R1 = rand(dim, n);
34 R2 = rand(dim, n);
35
36 %Inicializa os individuos e as velocidades e os melhores locais
37 current_position = 10*(rand(dim, n));
38 velocity = 0*randn(dim, n);

```

```

39 local_best_position = current_position;
40
41 %Avalia a primeira populacao
42 for i = 1:n
43     current_fitness(i) = Gen_Ctrl_Tensao(current_position(:,i));
44     fitness_graph(1,i) = current_fitness(i);
45     gain_graph(i,:) = current_position(:,i);
46 end
47
48 %Atualiza os melhores locais e acha o melhor global
49 local_best_fitness = current_fitness;
50 [global_best_fitness,g] = min(local_best_fitness);
51
52 for i=1:n
53     globl_best_position(:,i) = local_best_position(:,g);
54 end
55
56 %Coloca o melhor fitness no vetor do grafico
57 best_fitness_graph(1,1) = global_best_fitness;
58
59 %Atualiza o valor de velocidade
60 velocity = w *velocity +
61     c1*(R1.*(local_best_position-current_position)) +
62     c2*(R2.*(globl_best_position-current_position));
63
64 %Calcula os novos individuos
65 current_position = current_position + velocity;
66
67
68 %% Loop Principal
69
70 %Inicializa o contador de iteracoes
71 iter = 0;
72
73 %Executa o algoritmo atã© o fim das iteracoes
74 while(iter < bird_setp)
75
76 %Incrementa o contador de iteracoes
77 iter = iter + 1;
78
79 %Avalia os novos individuos
80 for i = 1:n
81     current_fitness(i) = Gen_Ctrl_Tensao(current_position(:,i)) ;
82     fitness_graph(1,i+(iter*n)) = current_fitness(i);
83     gain_graph(i+(iter*n),:) = current_position(:,i);

```

```

84 end
85
86 %Acha os melhores locais
87 for i = 1 : n
88     if current_fitness(i) < local_best_fitness(i)
89         local_best_fitness(i) = current_fitness(i);
90         local_best_position(:,i) = current_position(:,i) ;
91     end
92 end
93
94 %Acha o melhor global
95 [current_global_best_fitness,g] = min(local_best_fitness);
96
97 if current_global_best_fitness < global_best_fitness
98     global_best_fitness = current_global_best_fitness;
99     for i=1:n
100         globl_best_position(:,i) = local_best_position(:,g);
101     end
102 end
103
104 %Coloca o melhor fitness global no grafico
105 best_fitness_graph(1,iter+1) = global_best_fitness;
106
107 %Atualiza a velocidade
108 velocity = w *velocity +
109     c1*(R1.*(local_best_position-current_position)) +
110     c2*(R2.*(globl_best_position-current_position));
111
112 %Atualiza os individuos
113 current_position = current_position + velocity;
114
115 %Diz em qual iteracao esta
116 sprintf('The value of interation iter %3.0f ', iter )
117
118 end
119
120 %Mostra em grafico os fitness, o melhor fitness e a evolucao dos ganhos
121 figure(1)
122 plot(best_fitness_graph);
123
124 figure(2)
125 plot(fitness_graph);
126
127 figure(3)
128 plot(gain_graph);

```

```

129
130 %Coloca os ganhos com o melhor valor escolhido
131 KpV = globl_best_position(1,1);
132 KiV = globl_best_position(2,1);
133 KdV = globl_best_position(3,1);

```

### A.3 Pseudo-código com malha de controle PID implementado em linguagem C

```

1 // Definicoes utilizadas na malha de controle
2 #define TENSAO_MAX_CA 480 // Maxima tensao permitida no alternador
3 #define TENSAO_MIN_CA 160 // Minima tensao permitida no alternador
4
5 #define K_P_TENSAO 7150 // Ganho multiplicado por 10000
6 #define K_I_TENSAO 4490 // Ganho multiplicado por 10000
7 #define K_D_TENSAO 498 // Ganho multiplicado por 10000
8
9 #define MAX_PWM 74000 // 100\% PWM
10
11 unsigned int executar_malha_controle_pid
12     (unsigned int tensao_referencia,
13     unsigned int tensao_alternador)
14 {
15     int aux_int = 0, aux_int1 = 0;
16
17     // Verifica se a tensao de referencia possui um valor valido
18     if(tensao_referencia>0)
19     {
20         // Saturar a tensao nos limites do alternador
21         if(tensao_referencia>TENSAO_MAX_CA) tensao_referencia=TENSAO_MAX_CA;
22         if(tensao_referencia<TENSAO_MIN_CA) tensao_referencia=TENSAO_MIN_CA;
23
24         // Calcula o erro percentual (multiplicado por 1000 para
25         // nao perder muita precisao)
26         aux_int = tensao_referencia - tensao_alternador;
27         aux_int *= 1000;
28         aux_int /= tensao_referencia;
29
30         // Guarda o erro para o calculo do derivativo
31         err_ga = aux_int;
32
33         // Verifica se ja pode calcular a parcela derivativa

```

```
34 // (mantem zero quando eh a primeira amostra)
35 if(flag_primeira_amostra_deriv)
36     ext_ga_deriv = ((err_ga-err_ga_ant)*K_D_TENSAO)/10000;
37 else
38     flag_primeira_amostra_deriv = 1;
39
40 // Guarda o erro anterior para auxiliar no calculo do derivativo
41 err_ga_ant = err_ga;
42
43 // Calcula a parcela de Integral
44 ext_ga_int +=(err_ga*K_I_TENSAO)/100;
45
46 // Calcula a parcela de Proporcional
47 ext_ga_prop=(err_ga*K_P_TENSAO)/10000;
48 }
49 else
50 {
51     tensao_ref_ga = 0;
52     ext_ga=0;
53     ext_ga_int=0;
54     ext_ga_prop=0;
55     ext_ga_deriv = 0;
56     err_ga_ant = 0;
57     flag_primeira_amostra_deriv = 0;
58 }
59
60 // Calcula o valor de excitacao ajustando os denominadores
61 ext_ga=ext_ga_int/10000+ext_ga_prop+ext_ga_deriv;
62
63 if(ext_ga<0)    ext_ga=0;
64 if(ext_ga>MAX_PWM) ext_ga=MAX_PWM;
65
66 return ext_ga;
67 }
```

# Apêndice B

## B.1 Tabela Dados Alternador Real

Tabela B.1: Dados alternador real

Rotação [RPM]	Corrente Excitação [A]	Tensão de Excitação [V]	Corrente de Saída [A]	Tensão de Saída [V]
600	0	0	0	4,97
	0,31	5,97	1,2	46,2
	0,38	8,24	2	68,3
	0,5	11,04	3,2	96,8
	0,64	14,18	4,4	125,5
	0,79	17,54	5,2	148,2
	0,93	21	5,6	161,8
	1,08	24,51	6	170,6
700	0	0	0	2,25
	0,29	6,05	1,9	64
	0,39	8,27	3,1	91,5
	0,5	11,07	4,3	124,8
	0,65	14,16	5,5	156,8
	0,78	17,47	5,9	178,4
	0,83	18,85	6,3	184
	0,92	20,93	6,7	191,7
	1,07	24,48	7,1	201,1
	800	0	0	0
0,3		6,01	2,7	80,4
0,39		8,22	3,9	112,9
0,5		10,99	5,5	152,2

	0,63	14,11	6,7	186,8
	0,78	17,42	7,1	207,8
	0,92	20,86	7,9	221,3
	1,06	24,25	8,1	230,8
900	0	0	0	0,31
	0,29	6,05	3,5	99,4
	0,4	8,28	5	139,7
	0,51	11,07	6,6	181,8
	0,64	14,21	7,8	217
	0,69	15,54	8,2	229,3
	0,77	17,55	8,2	237,7
	0,92	20,93	9	251,1
	1,07	24,42	9,4	261,6
1000	0	0	0,3	1,23
	0,29	6,03	4,2	119,3
	0,4	8,24	5,8	161,4
	0,51	10,99	7,4	209,9
	0,64	14,11	8,6	244,9
	0,69	15,42	9	253
	0,77	17,35	9,4	265,5
	0,92	20,84	10,2	280,7
	1,07	24,34	10,6	291,6
1100	0	0	0,3	3,87
	0,28	6,04	5	138,9
	0,39	8,25	7	185,4
	0,5	11,01	8,6	237,5
	0,63	14,14	9,8	272,9
	0,77	17,46	10,6	294,8
	0,92	20,9	11,4	310,2
	1,07	24,37	11,8	321,6
1200	0	0	0,6	5,91
	0,29	6,05	6,1	159,9
	0,39	8,27	7,7	210,9
	0,5	11,05	9,7	265,5
	0,63	14,16	10,9	300,9
	0,78	17,5	11,7	323,2
	0,92	20,95	12,5	339,2

	1,07	24,46	12,9	351,3
1300	0	0	0,6	9,78
	0,29	6,03	6,9	180,3
	0,39	8,25	8,9	234,9
	0,5	11	10,9	291,8
	0,57	12,89	11,7	317,2
	0,62	14,19	12,1	327,2
	0,77	17,51	12,9	351,6
	0,91	20,93	13,7	368,3
	1,07	24,42	14,1	381,1
1400	0	0	0,9	7,71
	0,31	6,02	7,7	202
	0,4	8,25	9,7	260,7
	0,5	11	12,1	319,3
	0,58	12,83	12,9	342
	0,63	14,14	13,3	354,6
	0,77	17,46	14,1	380,1
	0,92	20,89	14,9	397,6
	1,07	24,38	15,3	412
1500	0	0	1,2	16,5
	0,3	6,01	8,4	222,6
	0,39	8,23	10,8	284,5
	0,5	11	12,8	345
	0,58	12,83	14	368,2
	0,63	14,11	14,4	381
	0,77	17,4	15,2	408
	0,92	20,84	16	427
	1,06	24,31	16,4	441
1600	0	0	1,3	13,3
	0,3	5,98	9,2	242,9
	0,37	8,2	12	314,7
	0,5	10,97	14	369,5
	0,54	12,19	14,8	388
	0,63	14,1	15,2	408
	0,77	17,38	16,4	435
	0,91	20,82	17,2	455
	1700	0	0	1,7

	0,28	6,03	10,4	264,7
	0,38	8,24	12,8	332
	0,5	11	15,2	395,1
	0,55	12,22	15,6	412
	0,63	14,11	16,4	435
	0,77	17,41	17,6	463
1800	0	0	1,6	19,2
	0,3	6	11,1	284,1
	0,4	8,21	13,5	354,8
	0,5	10,96	15,9	421
	0,55	12,15	16,3	437
	0,63	14,05	17,5	461
	0,77	17,44	18,7	490

## B.2 Tabela Dados Alternador Simulado

Tabela B.2: Dados alternador real

Rotação [RPM]	Corrente Excitação [A]	Tensão de Excitação [V]	Corrente de Saída [A]	Tensão de Saída [V]
600	0	0	0	0
	0,28	5,97	1,62	59,81
	0,39	8,24	2,23	82,55
	0,52	11,04	2,69	99,24
	0,66	14,18	3,06	113,17
	0,82	17,54	3,55	131,12
	0,98	21	3,87	143,07
	1,15	24,51	4,14	152,80
700	0,00	0	0,00	0,00
	0,28	6,05	2,17	80,17
	0,38	8,27	2,83	104,63
	0,51	11,07	3,36	124,18
	0,66	14,16	3,92	144,84
	0,81	17,47	4,42	163,31
	0,87	18,85	4,57	168,81

	0,97	20,93	4,79	176,84
	1,13	24,48	5,01	185,23
800	0,00	0	0,00	0,00
	0,27	6,01	2,72	100,55
	0,38	8,22	3,43	126,90
	0,50	10,99	4,04	149,35
	0,64	14,11	4,79	176,86
	0,80	17,42	5,29	195,57
	0,95	20,86	5,67	209,37
	1,11	24,26	5,87	216,82
900	0,00	0	0,00	0,00
	0,27	6,05	3,33	123,19
	0,37	8,28	4,09	151,28
	0,50	11,07	4,81	177,85
	0,64	14,21	5,65	208,93
	0,70	15,54	5,89	217,46
	0,79	17,55	6,20	229,21
	0,94	20,93	6,51	240,62
	1,10	24,42	6,75	249,40
1000	0,00	0	0,00	0,00
	0,27	6,03	3,86	142,63
	0,37	8,24	4,69	173,32
	0,49	10,99	5,63	208,18
	0,63	14,11	6,46	238,71
	0,69	15,42	6,74	248,88
	0,78	17,35	7,04	260,29
	0,93	20,84	7,36	271,98
	1,09	24,34	7,61	281,05
1100	0,00	0	0,00	0,00
	0,27	6,04	4,38	161,76
	0,37	8,25	5,31	196,03
	0,49	11,01	6,44	237,97
	0,63	14,14	7,31	270,04
	0,78	17,46	7,87	290,63
	0,93	20,9	8,22	303,62
	1,08	24,37	8,48	313,41
1200	0,00	0	0,00	0,00

	0,26	6,05	4,88	180,50
	0,36	8,27	5,92	218,62
	0,48	11,05	7,21	266,25
	0,62	14,16	8,15	301,00
	0,76	17,5	8,68	320,81
	0,91	20,95	9,05	334,55
	1,06	24,46	9,35	345,32
1300	0,00	0	0,00	0,00
	0,26	6,03	5,35	197,82
	0,36	8,25	6,49	239,92
	0,47	11	7,92	292,51
	0,55	12,89	8,56	316,30
	0,61	14,19	8,94	330,23
	0,75	17,51	9,49	350,64
	0,90	20,93	9,88	365,08
	1,05	24,42	10,19	376,68
1400	0,00	0	0,00	0,00
	0,26	6,02	5,80	214,26
	0,35	8,25	7,05	260,59
	0,47	11	8,62	318,40
	0,55	12,83	9,29	343,22
	0,61	14,14	9,69	358,06
	0,75	17,46	10,28	379,72
	0,89	20,89	10,70	395,22
	1,04	24,38	11,04	407,77
1500	0,00	0	0,00	0,00
	0,25	6,01	6,20	229,27
	0,34	8,23	7,56	279,49
	0,46	11	9,26	342,33
	0,54	12,83	10,00	369,53
	0,59	14,11	10,42	384,93
	0,73	17,4	11,04	407,94
	0,87	20,84	11,49	424,71
	1,02	24,31	11,86	438,21
1600	0,00	0	0,00	0,00
	0,25	5,98	6,56	242,37
	0,35	8,2	8,03	296,82

	0,46	10,97	9,86	364,49
	0,51	12,19	10,40	384,20
	0,59	14,1	11,12	410,95
	0,73	17,38	11,79	435,67
	0,88	20,82	12,28	453,66
1700	0,00	0	0,00	0,00
	0,26	6,03	6,93	255,90
	0,35	8,24	8,49	313,79
	0,47	11	10,44	385,78
	0,52	12,22	11,01	406,93
	0,60	14,11	11,79	435,52
	0,74	17,41	12,52	462,52
1800	0,00	0	0,00	0,00
	0,26	6	7,18	265,18
	0,35	8,21	8,85	327,15
	0,47	10,96	10,91	403,00
	0,52	12,15	11,52	425,80
	0,60	14,05	12,38	457,32
	0,75	17,44	13,21	488,24