



EDISON RUSSO

**SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
PARA ACIONAMENTO DE CARGAS EMBARCADAS EM
MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

CAMPINAS

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

EDISON RUSSO

**“SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA ACIONAMENTO DE CARGAS
EMBARCADAS EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS”**

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração de Máquinas Agrícolas.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO EDISON RUSSO E ORIENTADO PELO
PROF. Dr. NELSON LUIS CAPPELLI

A handwritten signature in black ink, appearing to be "Nelson Luis Cappelli", is positioned below the text of the certificate.

Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R921s Russo, Edison
Sistema de geração de energia elétrica para
acionamento de cargas embarcadas em máquinas
agrícolas / Edison Russo. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Nelson Luis Cappelli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Máquinas agrícolas. 2. Energia elétrica. 3. Lógica
fuzzy. 4. Sistemas fuzzy. 5. Geração de energia. I.
Cappelli, Nelson Luis, 1954-. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
Título.

Título em Inglês: Electric power generation system for drive embedded loads in
agricultural machines

Palavras-chave em Inglês: Agricultural machines, Electric power, Fuzzy logic, Fuzzy
systems, Power generation

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Nelson Luis Cappelli, Roberto Alves Braga Junior, Lino Rosell
Valdenebro , Claudio Kiyoshi Umezu, Paulo Sérgio Graziano
Magalhães

Data da defesa: 23-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Edison Russo**, aprovada pela Comissão Julgadora em 23 de novembro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Roberto Alves Braga Junior - Membro Titular
UFLA



Dr. Lino Rosell Valdenebro – Membro Titular
CPQD



Dr. Cláudio Kiyoshi Umezu - Membro Titular
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães - Membro Titular
Feagri/Unicamp

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu orientador e amigo,
Prof. Dr. **NELSON LUIS CAPPELLI**, pela
oportunidade, dedicação, confiança e amizade em mais
esta importante etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo Prof. Dr. **CLAUDIO KIYOSHI UMEZU**, sempre presente e disposto a colaborar com a sua competência e amizade em todas as fases deste trabalho;

Ao amigo Dr. **ANGEL PONTIN GARCIA** pelo constante companheirismo e fundamental ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

A minha esposa **RITA** e filhas **ANA CAROLINA** e **JULIANA**, pelo amor e compreensão ao longo de toda essa jornada;

Ao Amigos, Prof. Dr. **ADMILSOM ÍRIO RIBEIRO** e Prof^a Dra. **REGINA MÁRCIA LONGO**, pelos incentivos e apoio para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. **ANTÔNIO DA SILVA MACIEL**, pela amizade e oportunidade de participar de diversos projetos de grande importância para a minha carreira profissional;

Aos amigos e colaboradores, membros da equipe de pesquisadores do Laboratório de Instrumentação e Controle: **ALEXANDRE TIZZEI, CARLOS MENEGHETTI, CARLOS ROMANINI, EDUARDO NUNES, FRANCISCO MANUEL, FABRÍCIO THEODORO SOARES, RAFAEL DE MATOS, RODRIGO LEME**;

Aos **professores da FEAGRI - UNICAMP**, por compartilhar comigo os seus conhecimentos;

Aos **FUNCIONÁRIOS da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP**, sempre prontos para colaborar com todos os alunos desta instituição;

À FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DA UNICAMP (FEAGRI), por propiciar todas as condições necessárias para a execução deste trabalho;

Finalmente, agradeço ao **Sr. PAULO CASTELLANO da Empresa Castell Motores**, pela confiança e parceria.

“O sucesso prático de uma ideia, independente do seu próprio mérito, depende da atitude dos contemporâneos. Se é oportuna, é rapidamente adotada, mas se não é, ela é arrancada como um broto para fora da terra no chão quente, apenas para que seja retardado o seu crescimento na geada do sucesso”

(Nikola Tesla)

RESUMO

A crescente demanda por acionamentos e sistemas elétricos nas máquinas e implementos agrícolas aponta para a necessidade de disponibilização de energia elétrica, em quantidade e qualidade suficientes para o bom funcionamento das mesmas. Neste sentido, a utilização de alternadores veiculares, instalados diretamente nos implementos agrícolas e com acionamento mecânico a partir da tomada de potência, pode apresentar-se como uma alternativa viável, configurando-se no escopo deste trabalho. Na concepção original, esses alternadores possuem um sistema de regulação da tensão de saída gerada, baseado em um controlador do tipo liga-desliga, com o uso de um banco de baterias. A necessidade do uso de baterias, neste tipo de controlador, pode ser um fator restritivo à sua utilização devido à característica sazonal de operação das máquinas e implementos agrícolas. O presente trabalho teve como hipótese analisar a viabilidade técnica de se obter energia elétrica junto a um implemento agrícola, a partir da tomada de potência do trator, por meio de um alternador veicular, sem a necessidade da utilização de baterias e com um sistema de controle da corrente de excitação de campo, que seja capaz de manter a tensão de saída dentro dos limites de operação toleráveis. Para tanto, obteve-se o modelo matemático do alternador utilizado, avaliou-se e simulou-se o sistema original de controle de tensão do tipo liga-desliga, projetou-se e simulou-se um sistema de controle *fuzzy* e implementou-se e testou-se o mesmo em uma bancada de testes. Optou-se pela implementação de um controlador *fuzzy* com múltiplas entradas (velocidade angular, erro de tensão gerada e corrente de carga) e uma saída (corrente de excitação de campo), o que impossibilita o uso de um sistema de controle PID convencional. Para a implementação do controlador *fuzzy* foram criadas as variáveis linguísticas e a base de regras a partir do conhecimento especialista. Os resultados obtidos permitem concluir que o sistema de controle *fuzzy*, quando comparado com o sistema liga-desliga, original do alternador, apresenta nitidamente, um incremento de desempenho, com melhor capacidade do mesmo em manter a tensão de saída na faixa de operação, mesmo quando ocorrem variações na corrente de carga e na velocidade angular de acionamento.

Palavras-chave: Geração de energia; lógica *Fuzzy*; sistemas *fuzzy*; máquinas agrícolas; energia elétrica.

ABSTRACT

The increasing demand for electrical systems and drives in agricultural machinery and implements points to the need for provision of electricity in sufficient quantity and quality for the smooth functioning of the same. In this sense, the use of vehicle alternators installed directly on agricultural implements and mechanically driven by the tractor's power take-off may represent a viable alternative, integrating the scope of this work. As built, these alternators have an output-voltage regulator system based on an on-off controller and a battery bank. The necessity of batteries in this type of controller can be a limiting factor to its use due the seasonal characteristic operation of the farm machinery and implements. This work had as hypothesis, to analyze the technical viability of obtaining electricity at an agricultural implement from the tractor's power take-off, through a vehicular alternator, without using batteries and with a field-current excitation control system, capable of maintaining the output voltage within the tolerable operation limits. Therefore, it was obtained the mathematical model of the alternator, simulated and evaluated between the original on-off voltage-control system, a fuzzy control system was designed and simulated and finally implemented in a test bench. It was opted for the implementation of a fuzzy controller with multiple inputs (angular velocity, and voltage error generated load current) and one output (excitation current field), which precludes the use of a conventional PID control system. For the implementation of the fuzzy controller, were created linguistics variables and an expert knowledge base-rule. The results obtained allow concluding that the fuzzy control system, in comparison within on-off system, has a clearly performance increased, and also, improved ability to maintain the output voltage in its operation range in the occurrence of angular speed and load disorder.

Keywords: Electric power generation; fuzzy logic; fuzzy systems; farm equipment; electric power.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2	<u>OBJETIVOS</u>	7
2.1	OBJETIVO GERAL	7
2.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	8
3.1	ELETRIFICAÇÃO DE TRATORES E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS	8
3.2	MÁQUINAS ELÉTRICAS	19
3.2.1	CLASSIFICAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	19
3.2.2	MÁQUINAS ELÉTRICAS SÍNCRONAS	21
3.3	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM VEÍCULOS	23
3.4	SISTEMA ELÉTRICO VEICULAR	25
3.5	ALTERNADORES SEM ESCOVAS (<i>BRUSHLESS</i>)	27
3.6	REGULADORES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO	29
3.7	REGULADORES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO PARA USO VEICULAR	35
3.8	LÓGICA <i>FUZZY</i>	39
4	<u>MATERIAL E MÉTODOS.</u>	43
4.1	BANCADA EXPERIMENTAL	44
4.2	ADAPTAÇÃO DE UM ALTERNADOR VEICULAR	48
4.3	DETERMINAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO EXPERIMENTAL EM MALHA ABERTA	49
4.4	PROJETO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	54
4.5	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	56
4.6	AValiação DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	58
5	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	61
5.1	BANCADA DE TESTES DESENVOLVIDA	61

5.2	AQUISIÇÃO DE SINAIS E CONTROLE	71
5.3	ADAPTAÇÃO DO ALTERNADOR	74
5.4	ALTERNADOR ATUANDO COM CONTROLE DE EXCITAÇÃO TIPO LIGA-DESLIGA	77
5.5	IDENTIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	80
5.6	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO	84
5.7	SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR LIGA-DESLIGA	86
5.8	CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	88
5.9	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	98
6	CONCLUSÕES	104
7	BIBLIOGRAFIA	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VEÍCULO UTILITÁRIO MODELO GATOR ELECTRIC COMERCIALIZADO PELA JOHN DEERE (FONTE: JOHN DEERE)	3
FIGURA 2 - VENDAS INTERNAS DE TRATORES DE RODAS NO PERÍODO DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2010 (FONTE: ANFAVEA)	3
FIGURA 3 - CATÁLOGO COMERCIAL DO TRATOR MARCA INTERNATIONAL HARVESTER, MODELO FARMALL 450 HI ELECTRALL EQUIPADO COM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (FONTE: HTTP://MUJTRAKTOR.CZ/IMAGES/KCLANKUM/PROSPEKTY/FARMALL_450_BROCHURE.PDF)	8
FIGURA 4 - CONCEITO ELÉTRICO (A) E MECÂNICO (B) DO PROTÓTIPO ELTRAC E135 DESENVOLVIDO PELA EMPRESA ALEMÃ SCHMETZ S.A. (ADAPTADO DE WWW.ELTRAC.DE)	9
FIGURA 5 - DIAGRAMA CONCEITUAL DO SISTEMA MELA (FONTE: HTTP://WWW.FAST.KIT.EDU/DOWNLOAD/DOWNLOADSMOBIMA/007_BEITRAG_AGCO_SZAJEK.PDF) ...	10
FIGURA 6 - TRATOR AGRÍCOLA MARCA JOHN DEERE, MODELO E-PREMIUM 7530 PREMIADO COM A MEDALHA DE OURO NA EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE MAQUINARIA AGRÍCOLA - AGRITECHNICA 2007.....	11
FIGURA 7 - ESQUEMA CONCEITUAL DA TOMADA DE POTÊNCIA ELETRICAMENTE ACIONADA APRESENTADA EM 2009 PELA MARCA JOHN DEERE (FONTE: GUGEL, 2010).....	12
FIGURA 8 - TRATOR AGRÍCOLA BELARUS 3023 PREMIADO COM A MEDALHA DE PRATA NA AGRITECHNICA 2009 (FONTE: WWW.AGRITECHNICA.COM)	13
FIGURA 9 - CAIXA DE TRANSMISSÃO COM O SISTEMA ZF-TERRA+ INCORPORADO. (FONTE: ZF PRESS KIT AGRITECHNICA 2009).....	14
FIGURA 10 - ARQUITETURA DO SISTEMA ELÉTRICO TRATOR/IMPLEMENTO DO PROJETO ELECTRA. (ADAPTADO DE GÖTZ, M. ET AL, 2011)	14
FIGURA 11 - TRATOR AGRÍCOLA MODELO RIGITRAC EWD 120 - DIESEL ELECTRIC (FONTE: WWW.RITRAC.CH)	15
FIGURA 12 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE PROPULSÃO DIESEL-ELÉTRICO E DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO TRATOR RIGITRAC EWD 120 - DIESEL ELECTRIC. (WWW.RIGITRAC.CH)	15
FIGURA 13 - SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, MARCA GKN WALTERSCHEID, MODELO EPOWER, PARA UTILIZAÇÃO EM TRATORES AGRÍCOLAS CONVENCIONAIS. (FONTE: HTTP://WWW.GKN-WALTERSCHEID.DE/EN/AGRITECHNICA/).....	18

FIGURA 14: CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS (ADAPTADO DE HTTP://WEB.EECS.UTK.EDU/~TOLBERT/TEACHING/ECE321/HANDOUTS/MACHCLASS.PDF)	20
FIGURA 15 - MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES (KOSOW, 2011)	22
FIGURA 16 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA TRIFÁSICA, OPERANDO COMO GERADOR.....	23
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA INSTALADA E CONSUMO MÉDIO DE CORRENTE EM UM VEÍCULO TÍPICO, AO LONGO DO TEMPO (SHRUD, ET AL., 2007)	24
FIGURA 18 - VISÃO EXPLODIDA DE UM ALTERNADOR DO TIPO LUNDELL (WHALEY, ET AL., 2004)	26
FIGURA 19 - MODELO ELÉTRICO DE UM GERADOR DO TIPO LUNDELL	26
FIGURA 20 - APARÊNCIA DA FORMA DE ONDA DE TENSÃO GERADA, APÓS RETIFICAÇÃO (SHRUD ET AL., 2007)	27
FIGURA 21 - MODELO DO GERADOR SÍNCRONO (SHRUD ET AL., 2007).....	27
FIGURA 22 - CIRCUITO ELETROMAGNÉTICO DE UM ALTERNADOR AUTOMOTIVO SEM ESCOVAS (ADAPTADO DO INFORMATIVO TÉCNICO DELCO REMY 1G-500 1998)	29
FIGURA 23 - DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO DE UM REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO, IMPLEMENTADO DE FORMA ANALÓGICA, COM UM CONTROLADOR DO TIPO AVANÇO-ATRASO DE FASE	31
FIGURA 24 - CONTROLADOR PID PARA UM REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO, IMPLEMENTADO NA FORMA DIGITAL	32
FIGURA 25 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA MICRO-GERADOR DE ENERGIA E DO CONTROLADOR DE TENSÃO AUTO-AJUSTÁVEL (MOUTINHO ET AL., 2008).....	33
FIGURA 26 - ESTRUTURA DO CONTROLADOR PID <i>FUZZY</i> (MOUTINHO ET AL., 2008).....	34
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE CONTROLE DE UM MOTOR SÍNCRONO, DE IMÃ PERMANENTE.....	35
FIGURA 28 - CORRENTE DE CAMPO E FORMA DE ONDA DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE UM ALTERNADOR DO TIPO LUNDELL (WHALEY ET AL., 2004).....	36
FIGURA 29 - MODELO IMPLEMENTADO EM SIMULINK PARA GERAÇÃO DE 42VDC (SHRUD ET AL., 2007)	37
FIGURA 30 - TENSÃO DE SAÍDA E CORRENTE DE CARGA SIMULADAS (SHRUD ET AL., 2007)	38
FIGURA 31 - RESPOSTA DINÂMICA SIMULADA EM FUNÇÃO DE VARIAÇÕES DE CARGA (SHRUD ET AL., 2007)	39
FIGURA 32 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE DESENVOLVIDO POR GARCIA (2011).....	41

FIGURA 33 - ABSTRAÇÃO SOBRE O SISTEMA DE ACOPLAMENTO DO ALTERNADOR	43
FIGURA 34 - BANCADA DE ENSAIOS DE ALTERNADORES DA EMPRESA CASTELL	45
FIGURA 35 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA BANCADA DE TESTES	46
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO DO ALTERNADOR	50
FIGURA 37 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE <i>FUZZY</i> PROPOSTO.....	54
FIGURA 38 - ESTRUTURA DO SISTEMA <i>FUZZY</i> UTILIZADO PARA CONTROLE DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO.....	55
FIGURA 39 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DA FERRAMENTA <i>FUZZY SYSTEM DESIGNER</i>	57
FIGURA 40 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE DE TENSÃO DE SAÍDA DO ALTERNADOR	58
FIGURA 41 - FORMAS DE ONDE DOS SINAIS DE TESTE UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> : (A) DEGRAUS DE CORRENTE DE CARGA; (B) RAMPAS DE CORRENTE DE CARGA; (C) SINAL SENOIDAL DE VELOCIDADE ANGULAR DO ALTERNADOR	59
FIGURA 42 - BANCADA DE TESTES DESENVOLVIDA.	62
FIGURA 43 - PROJETO DA BALANÇA DE TORQUE DESENVOLVIDA: (1) ALTERNADOR CEN; (2) CÉLULA DE CARGA R&S; (3) BERÇO MÓVEL DA BALANÇA; (4) BRAÇO DE FORÇA; (5) BASE DE FIXAÇÃO E (6) ROLAMENTO AXIAL	63
FIGURA 44 - CIRCUITO AMPLIFICADOR DA CÉLULA DE CARGA	63
FIGURA 45 - BANCO DE RESISTORES PARA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA	64
FIGURA 46 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MÓDULO DE POTÊNCIA PARA O CONTROLE DA CARGA	65
FIGURA 47 - CIRCUITO CONVERSOR ANALÓGICO / PWM.....	66
FIGURA 48 - AMPLIFICADOR DO SINAL DE COMANDO DE VELOCIDADE ANGULAR	67
FIGURA 49 - CIRCUITO CONDICIONADOR DO SINAL DE VELOCIDADE ANGULAR.....	67
FIGURA 50 - <i>LAYOUT</i> DA PLACA CONDICIONADORA DE SINAIS.....	68
FIGURA 51 - CIRCUITO DE CONTROLE DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO	69
FIGURA 52 - <i>DRIVER</i> PWM DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO	70
FIGURA 53 - INTERFACE GRÁFICA DESENVOLVIDA COM O AUXÍLIO DO LABVIEW	71
FIGURA 54 - APLICATIVO EM LINGUAGEM LABVIEW PARA AQUISIÇÃO, CONTROLE E GRAVAÇÃO DE SINAIS ..	73
FIGURA 55 - GERADOR SÍNCRONO DE 2,8 kW DESENVOLVIDO EM PARCERIA COM A EMPRESA CASTEL LTDA .	74

FIGURA 56 - CURVA DE RESPOSTA DA CORRENTE GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DO ALTERNADOR	75
FIGURA 57 - CURVA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO GERADOR SÍNCRONO DESENVOLVIDO	76
FIGURA 58 - CIRCUITO DE CONTROLE DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO DO TIPO LIGA-DESLIGA	77
FIGURA 59 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR COM CONTROLADOR LIGA-DESLIGA, FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO RAMPA NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	78
FIGURA 60 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR COM CONTROLADOR LIGA-DESLIGA, ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO SENOIDAL NA VELOCIDADE ANGULAR DO EIXO DE ACIONAMENTO DO ALTERNADOR; (A) DISTÚRBO DE VELOCIDADE ANGULAR; (B) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	78
FIGURA 61 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR COM CONTROLADOR LIGA-DESLIGA, FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO DEGRAU DE GRANDE AMPLITUDE NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	79
FIGURA 62 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR E DA CORRENTE DE CARGA	82
FIGURA 63 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO CORRENTE DE EXCITAÇÃO E DA CORRENTE DE CARGA	83
FIGURA 64 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR E DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO	84
FIGURA 65 - DIGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA EM SIMULINK PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO ALTERNADOR	85
FIGURA 66 - DIGRAMA DE BLOCOS DO APLICATIVO SIMULINK PARA O CONTROLADOR LIGA-DESLIGA	87
FIGURA 67 - SIMULAÇÕES PARA O CONTROLADOR DE TENSÃO DO TIPO LIGA-DESLIGA	88
FIGURA 68 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	89
FIGURA 69 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA RELATIVAS AO ERRO NORMALIZADO DA TENSÃO	89
FIGURA 70 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA RELATIVAS À VARIÁVEL CORRENTE DE CARGA NORMALIZADA	90
FIGURA 71 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA RELATIVAS À VARIÁVEL VELOCIDADE ANGULAR NORMALIZADA	91
FIGURA 72 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA RELATIVAS À VARIÁVEL CORRENTE DE EXCITAÇÃO NORMALIZADA	92

FIGURA 73 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DO SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i> . (A) VELOCIDADE ANGULAR NORMALIZADA. (B) CARGA NORMALIZADA.....	94
FIGURA 74 - PROGRAMA EM LINGUAGEM SIMULINK DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	95
FIGURA 75 - PROGRAMA EM LINGUAGEM SIMULINK DO SISTEMA DE CONTROLE <i>FUZZY</i> ACOPLADO AO MODELO DO ALTERNADOR, COM ENTRADAS DE REFERÊNCIA E DISTÚRBIOS	95
FIGURA 76 - RESPOSTA DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO RAMPA NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA.....	96
FIGURA 77 - RESPOSTA DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO DEGRAU NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA.....	97
FIGURA 78 - RESPOSTA DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO SENOIDAL NA VELOCIDADE ANGULAR DO EIXO DE ACIONAMENTO DO ALTERNADOR: (A) DISTÚRBO DE VELOCIDADE ANGULAR; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	98
FIGURA 79 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO RAMPA NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	99
FIGURA 80 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO DEGRAU NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA	100
FIGURA 81 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A UM DISTÚRBO DO TIPO SENOIDAL NA VELOCIDADE ANGULAR DO EIXO DE ACIONAMENTO DO ALTERNADOR: (A) DISTÚRBO DE VELOCIDADE ANGULAR; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> ; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA.....	101
FIGURA 82 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A DISTÚRBIOS DO TIPO DEGRAUS DE GRANDE AMPLITUDE NA CORRENTE DE CARGA: (A) DISTÚRBO DE CORRENTE DE CARGA; (B)	

CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR *FUZZY*; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA..... 102

FIGURA 83 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR FRENTE A DISTÚRBIOS DO TIPO DEGRAUS DE GRANDE AMPLITUDE NA CORRENTE DE CARGA; (A) DISTÚRBBIO DE CORRENTE DE CARGA; (B) CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO DO ALTERNADOR FORNECIDA PELO CONTROLADOR *FUZZY*; (C) TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR E O SINAL DE REFERÊNCIA..... 103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - NÍVEIS E VALORES ABSOLUTOS DOS FATORES DO PLANEJAMENTO CENTRAL COMPOSTO.....	51
TABELA 2 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL COMPOSTO CENTRAL 2^3 , PARA OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO ALTERNADOR	51
TABELA 3 - ANÁLISE DA VARIÂNCIA PARA O AJUSTE DO MODELO LINEAR, PELO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS, SENDO: NI = NÚMERO DE REPETIÇÕES NO NÍVEL I; M = NÚMERO DE NÍVEIS DISTINTOS DA VARIÁVEL INDEPENDENTE; $N = \sum NI$ = NÚMERO TOTAL DE OBSERVAÇÕES; P = NÚMERO DE PARÂMETROS DO MODELO	52
TABELA 4 - ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A TENSÃO GERADA FRENTE AOS DISTÚRBIOS DE CORRENTE DE CARGA, TIPO RAMPA E DEGRAU, E DISTÚRBO SENOIDAL DE VELOCIDADE ANGULAR DE ACIONAMENTO	79
TABELA 5 - TENSÕES GERADAS PELO ALTERNADOR EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO PLANEJAMENTO FATORIAL CENTRAL COMPOSTO 2^3	80
TABELA 6 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL CENTRAL COMPOSTO DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR	81
TABELA 7 - TABELA ANOVA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA TENSÃO GERADA PELO ALTERNADOR	81
TABELA 8- RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS DE CORRENTE DE CARGA (CA), VELOCIDADE ANGULAR DE ACIONAMENTO DO GERADOR (VA) E CORRENTE DE EXCITAÇÃO DE CAMPO (EX).....	86
TABELA 9 - BASE DE REGRAS DO SISTEMA <i>Fuzzy</i> PARA A CORRENTE DE EXCITAÇÃO, ONDE CA É A CORRENTE DE CARGA, VA É A VELOCIDADE ANGULAR DE ACIONAMENTO.....	93
TABELA 10 - ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A TENSÃO GERADA FRENTE AOS DISTÚRBIOS DE CORRENTE DE CARGA, TIPO RAMPA E DEGRAU, E DISTÚRBO SENOIDAL DE VELOCIDADE ANGULAR DE ACIONAMENTO	101

1 INTRODUÇÃO

O acionamento elétrico já faz parte das máquinas e equipamentos agrícolas (BUNING, 2010). Para possibilitar o seu uso já estão disponíveis comercialmente, no exterior, tratores agrícolas com tomada de potência elétrica. Estes sistemas fornecem a energia elétrica necessária para acionamento das unidades auxiliares, independentemente da rotação do motor diesel, aumentando a eficiência na utilização da energia e permitindo a utilização de sistemas de controle inteligentes nos implementos, de forma a melhorar a qualidade da operação agrícola realizada, com um consumo de combustível reduzido.

Os primeiros protótipos conceituais de tratores agrícolas equipados com tração elétrica já foram apresentados. Outras máquinas agrícolas automotoras possuem necessidades semelhantes à dos tratores agrícolas e no futuro provavelmente seguirão o mesmo exemplo. Entretanto, a disponibilidade de componentes elétricos que satisfaçam os critérios de projeto dos equipamentos agrícolas é ainda um dos pontos-chaves para o sucesso.

A utilização da energia elétrica no sistema trator-implemento representa o próximo passo no desenvolvimento dos tratores e implementos agrícolas. A transferência e adaptação da tecnologia devem vir da indústria automobilística e de automação. A otimização dos processos e a redução dos insumos nos sistemas agrícolas, com certeza serão obtidos pela utilização das tecnologias que se utilizam de acionamento elétrico. Os benefícios óbvios advindos do uso da energia elétrica nas máquinas e equipamentos agrícolas possibilitarão o projeto e o desenvolvimento de soluções inovadoras e mais eficientes.

A primeira geração de um pacote tecnológico para o trator agrícola, controlado e acionado por meio da energia elétrica, ainda não está comercialmente disponível. Nos países mais desenvolvidos, enquanto isto não acontece, os grandes fabricantes de máquinas e equipamentos agrícolas tem procurado introduzir e/ou adaptar o acionamento elétrico aos implementos agrícolas existentes, afim de criar uma massa crítica de usuários, colecionar experiências e fomentar a aceitação, por parte dos usuários, da nova tecnologia. Contudo, novas ideias e conceitos para o uso do acionamento elétrico em máquinas e implementos agrícolas ainda devem surgir e serem desenvolvidas em conjunto com sistemas de automação,

navegação e de armazenamento de energia. Este pacote tecnológico que engloba o uso da energia elétrica tem potencial para se tornar um novo marco na história do desenvolvimento dos equipamentos agrícolas.

O trator agrícola é considerado a principal fonte de potência na agricultura. Seu conceito básico pouco se alterou desde o primórdio de sua existência. Possui um projeto evolutivo ao qual vem sendo agregado funcionalidades de acordo com o avanço tecnológico, porém, suas funções essenciais permanecem as mesmas, quais sejam: portar, acionar e tracionar implementos agrícolas. Ao longo de sua história, já experimentou a utilização de diversas fontes de potência, tais como as tradicionais: vapor, gasolina e diesel e, mais recentemente as alternativas tais como: óleos vegetais e etanol e, mais recentemente ainda, as híbridas (diesel e eletricidade) e a puramente elétrica, que é a que se desenha para o futuro.

Os tratores agrícolas são máquinas de uso geral e se prestam a atividades agrícolas que demandam uma larga faixa de potência. Esta versatilidade se obtém ao custo de uma baixa eficiência de conversão de energia, quando operado a baixos níveis de potência em relação ao instalado. Muitos setores da agricultura tais como os hortícolas, frutícolas, de produção de flores e outros, exigem uma grande variedade de operações agrícolas que na sua maioria, demandam um baixo nível de potência (até cerca de 37kW ou 50cv), porém elevada versatilidade por parte dos equipamentos. Neste sentido, os chamados veículos utilitários se apresentam como uma boa alternativa ao trator convencional. Já se podem encontrar comercialmente veículos utilitários com acionamento elétricos, como é o caso do Gator Electric, fabricado pela John Deere (Figura 1), e de outros modelos de vários fabricantes. No entanto, alguns são veículos adaptados para acionamento elétrico e ainda mantêm uma certa complexidade mecânica, outros são veículos originalmente projetados para outras aplicações e apenas adaptados para operações agrícolas, outros, ainda, não atendem às reais necessidades agrícolas.



Figura 1 - Veículo Utilitário modelo Gator Electric comercializado pela John Deere (Fonte: John Deere)

Entretanto, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos - ANFAVEA informa que as vendas internas de tratores de rodas no período de janeiro a dezembro de 2010 atingiram um montante de 55709 unidades, sendo que na faixa até 36,5kW (49cv) foram vendidos 1201, ou seja, apenas 2,2% do total e que na faixa de 37,3 a 73,8kW (50 a 99cv) foram vendidos 37398, ou seja, 67,1% do total (Figura 2), indicando que no país a maioria das operações agrícolas são realizadas com tratores nesta faixa de potência.

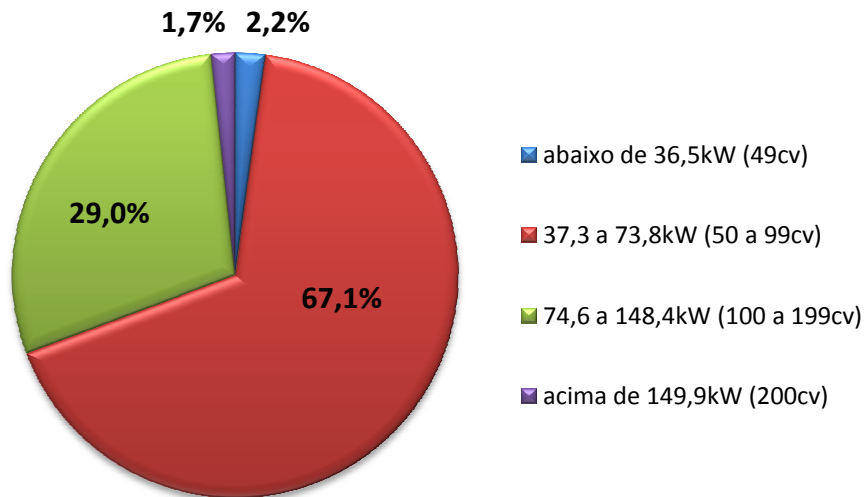


Figura 2 - Vendas internas de tratores de rodas no período de janeiro a dezembro de 2010 (Fonte: ANFAVEA)

No presente, a tecnologia para os tratores agrícolas puramente elétricos para faixas de potência mais elevadas, ainda não está totalmente disponível, principalmente devido às questões relativas ao armazenamento da energia elétrica, exigindo uma solução tecnológica

intermediária que seria a geração da energia elétrica no próprio trator agrícola convencional, a partir do motor diesel, ou no implemento agrícola, a partir da tomada de força do trator.

A indústria de implementos agrícolas utiliza intensamente os circuitos hidráulicos como forma de acionamento de seus mecanismos. Com o desenvolvimento da tecnologia de motores elétricos de alto torque e sem escovas (*brushless*), torna-se possível, em alguns casos, a substituição dos atuadores hidráulicos convencionais por motores elétricos. Segundo Oman (1998), um motor de relutância controlada, de dez centímetros de diâmetro chaveado por cinco fases, pode fornecer uma potência instantânea superior a 40kW tendo uma massa de montagem de aproximadamente 18kg.

A grande vantagem da utilização da energia hidráulica consiste na facilidade de controle da velocidade e inversão do movimento. Além disso, os sistemas são auto lubrificados e compactos, se comparados com as demais formas de transmissão de energia. A desvantagem deste tipo de sistemas é o baixo rendimento, de modo geral em torno de 65%, principalmente devido às perdas de cargas e vazamentos internos nos componentes. Além disso, a construção dos elementos para o acionamento hidráulico necessita de tecnologia de precisão, encarecendo os custos de produção. Ao se analisar os circuitos hidráulicos e as transmissões mecânicas típicas de uma máquina agrícola, pode-se observar que a maioria dos acionamentos demanda uma baixa potência, e que em apenas uma minoria destes acionamentos, estão envolvidos altos consumos de energia. Segundo Comitê (1995), o desenvolvimento tecnológico ocorrido na agricultura brasileira e o conseqüente o aumento da demanda de insumos energéticos, traz à tona a questão da eficiência energética.

Inicialmente os dispositivos eletroeletrônicos desenvolvidos para serem instalados nas máquinas agrícolas limitavam-se ao controle e monitoramento dos processos de operação. Drapinsk (1977) já apontava para as vantagens da utilização de motores elétricos em substituição aos motores hidráulicos. Mais recentemente, Oliva et al. (2001) iniciaram o desenvolvimento de um equipamento para a aplicação de fertilizantes sólidos a taxas e formulações variáveis. Pesquisas apontam para a viabilidade da utilização de acionamentos elétricos em substituição aos acionamentos hidráulicos. Umezu e Cappelli (2006) projetaram um sistema de controle de velocidade angular para um dosador de fertilizante helicoidal. Este controlador mostrou-se capaz de atuar no sistema, modificando a taxa de aplicação de forma

mais precisa que o sistema convencional. Garcia (2007) utilizou como elemento de atuação no sistema de dosagem um motor elétrico de corrente contínua, eliminando, com isso, a necessidade de um sistema hidráulico, partindo para um sistema de atuação puramente eletromecânico. Russo (2005) desenvolveu um Módulo de Interface (MDI) para taxas variáveis, cuja função é receber as informações provenientes do controle do sistema de aplicação, efetuar as leituras dos sensores de campo, processar os dados e comandar os periféricos envolvidos na aplicação, tais como: bombas eletroválvulas e válvulas proporcionais para controle de fluxo.

A crescente demanda por acionamentos e sistemas de controle nas máquinas agrícolas, apontam para a necessidade de disponibilização de energia elétrica em quantidade e qualidade suficientes para o bom funcionamento desses equipamentos. Por outro lado, a geração de energia elétrica nas máquinas agrícolas está restrita à máquina motriz, utilizando-se para isso, o alternador acoplado ao motor. Este tipo de configuração é satisfatório quando a máquina motriz é para um uso específico, como por exemplo; colhedoras de cana. Já para os implementos agrícolas, que compartilham a mesma máquina motriz, geralmente um trator de uso comum, a possibilidade de implementação de equipamentos e acionamentos eletroeletrônicos fica limitada à disponibilidade de energia elétrica do alternador do trator, que por sua vez, é dimensionado apenas para suprir as necessidades para o seu funcionamento. A conversão de energia mecânica em energia elétrica, realizada por intermédio de um sistema embarcado em um implemento, deve apresentar características peculiares em relação ao ambiente de operação, como a presença de poeira, água, agentes químicos e riscos de choques elétricos ao operador, impondo restrições à utilização dos sistemas moto-geradores em 220Vca. Pode-se observar que o mercado aponta para a utilização de tensão nominal de 24Vcc em veículos, para se trabalhar em nível de tensão seguro contra choques elétricos. Os acionamentos elétricos apresentam altos índices de rendimento, baixos custos, alta confiabilidade e a possibilidade de precisão no controle dos movimentos.

Os equipamentos eletroeletrônicos toleram variações na tensão de alimentação conforme o ciclo de operação e flutuação de carga do banco de baterias. Em uma máquina com tensão nominal de 24Vcc (bateria composta por 12 elementos), a tensão pode variar entre 1,91 e 2,45Vcc/elemento, ou seja, varia entre 22,9 e 29,4Vcc. Em uma primeira análise, pode-

se propor a simples substituição do alternador original do trator por um de maior potência. Isto, além de limitar o uso dos implementos que demandam maior consumo de energia elétrica, em muitos casos não seria suficiente para atender a demanda necessária. O banco de baterias, além de ser responsável pela partida do equipamento, tem como função estabilizar a tensão gerada, atuando como um armazenador de energia que supre o sistema nos picos de demanda e absorve os picos de tensão ocasionados pelo alívio repentino de carga. Esses picos, quando presentes no sistema, podem ocasionar danos nos equipamentos eletrônicos a ele acoplados.

Os implementos agrícolas são projetados para aplicações específicas e de uso sazonal, o que limita a possibilidade de se acoplar um sistema convencional de produção de energia elétrica a partir de um alternador automotivo, pois segundo Palmer (2008), o processo de sulfatação das placas positivas das baterias chumbo-ácidas reduz acentuadamente a capacidade de armazenamento de energia, sendo que esta condição pode ser verificada quando as baterias permanecem por longos períodos sem receber recarga.

O presente trabalho teve por hipótese a viabilidade técnica de se obter energia elétrica junto a um implemento agrícola, a partir da tomada de potência do trator, por meio de um alternador veicular, sem a necessidade do uso de baterias, com a utilização de um sistema inteligente de controle da corrente de excitação de campo, que seja capaz de manter a tensão de saída dentro dos limites de operação toleráveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema de transformação de energia mecânica em energia elétrica, a partir da tomada de potência do trator agrícola, com um sistema eletrônico de controle da corrente de excitação de campo para limitar a variação da tensão gerada frente aos transitórios de carga, sem a necessidade do uso de banco de baterias.

2.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Desenvolver uma bancada de testes capaz de simular o sistema proposto;
- Levantar o modelo matemático do alternador veicular utilizado;
- Avaliar e simular o sistema original de controle tipo liga-desliga;
- Projetar e simular um sistema de controle *fuzzy*, e
- Implementar o controlador projetado na bancada de testes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Eletrificação de tratores e implementos agrícolas

Segundo Bodria L. e Fiala M. (2010), um dos principais temas abordados na reunião do Clube de Bolonha de 2010 foi relativo às primeiras experiências com transmissões elétricas para máquinas agrícolas e os desenvolvimentos mais avançadas e inovadoras em automação.

As primeiras aplicações de transmissões elétricas remontam ao início dos anos 1950 (BODRIA e FIALA, 2010 e BUNING, 2010), quando precisamente em 1954 a empresa International Harvester disponibilizou no mercado o trator agrícola modelo Farmall 400, que dispunha, opcionalmente, de um gerador elétrico trifásico (208Vca; 10kW) com o propósito suprir energia elétrica para acionamentos máquinas agrícolas. Posteriormente, a empresa lançou o modelo Farmall 450 com gerador elétrico de 12,5kW capaz de gerar 115/208Vca monofásico ou 208Vca trifásico (Figura 3).

EQUIP YOUR
Farmall 450
WITH
IH Electrall

PORTABLE POWER
Gives you "highline" power wherever your tractor will go

STANDBY POWER
Provides stand-by power in case of highline outage

MOBILE POWER
Drive balers and other machines with electric power

IH Electrall is a high-capacity electric generator that you can mount on your Farmall 450. It furnishes 115-volt and 208-volt single-phase service and 208-volt three-phase service. Output rating is 12.5 kva. This capacity lets you use your time-saving electric tools, and motors up to 10 hp, wherever your tractor will go; powers your house and barn equipment during highline failures; and drives a McCormick 55 baler, or other machines equipped with Electrall motor.

(Above) When the power line falls, just plug in Electrall to prevent financial loss and inconvenience. It supplies power to keep the farmstead fully electrified.

(Below) Electrall powered baler is started and stopped by an on-off switch. Electrall motor is completely enclosed and water-proof, readily transferred to other jobs.

Figura 3 - Catálogo comercial do trator marca International Harvester, modelo Farmall 450 HI Electrall equipado com sistema de geração de energia elétrica (Fonte:

http://mujtraktor.cz/images/kclankum/prospekty/Farmall_450_Brochure.pdf)

Em 1998 foi desenvolvido um trator agrícola com uma combinação de motor diesel e gerador elétrico, montado entre o motor e a transmissão, semelhante aos sistemas utilizados nas locomotivas diesel-elétricas (Figura 4). Este desenvolvimento, focado na criação de uma transmissão de velocidade elétrica infinitamente variável, em substituição ao acionamento hidráulico, foi realizado por uma revenda de máquinas agrícolas (Schmetz S.A.) na Alemanha. (BUNING, 2010).

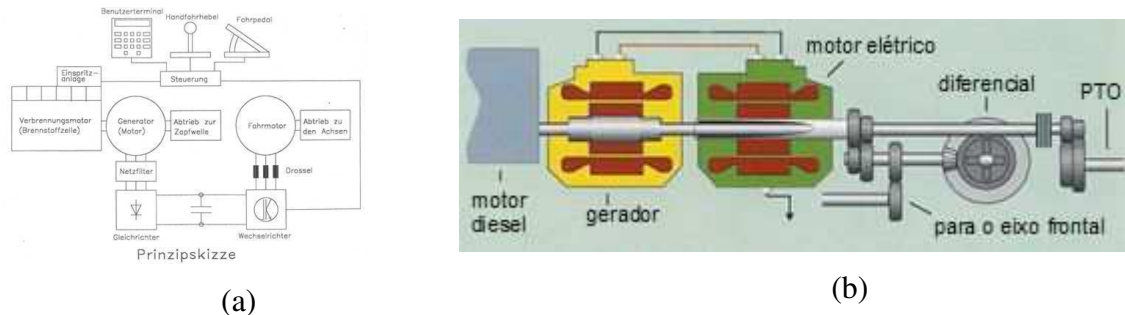


Figura 4 - Conceito elétrico (a) e mecânico (b) do protótipo Eltrac E135 desenvolvido pela empresa alemã Schmetz S.A. (Adaptado de www.eltrac.de)

A partir de 2000 um estudo conceitual apoiado por universidades e organizações da Alemanha e a empresa Fendt (subsidiária da AGCO), denominado MELA (*Mobile Elektrische Leistungs-und Antriebstechnik* - Tecnologia para Acionamento Elétrico Móvel) (Figura 5), tem se mostrado como uma solução possível no sentido de fornecer energia elétrica ao trator agrícola para acionamento de sistemas elétricos auxiliares, para transmissões elétricas continuamente variáveis e para disponibilização de energia elétrica aos implementos agrícolas (BUNING, 2010).

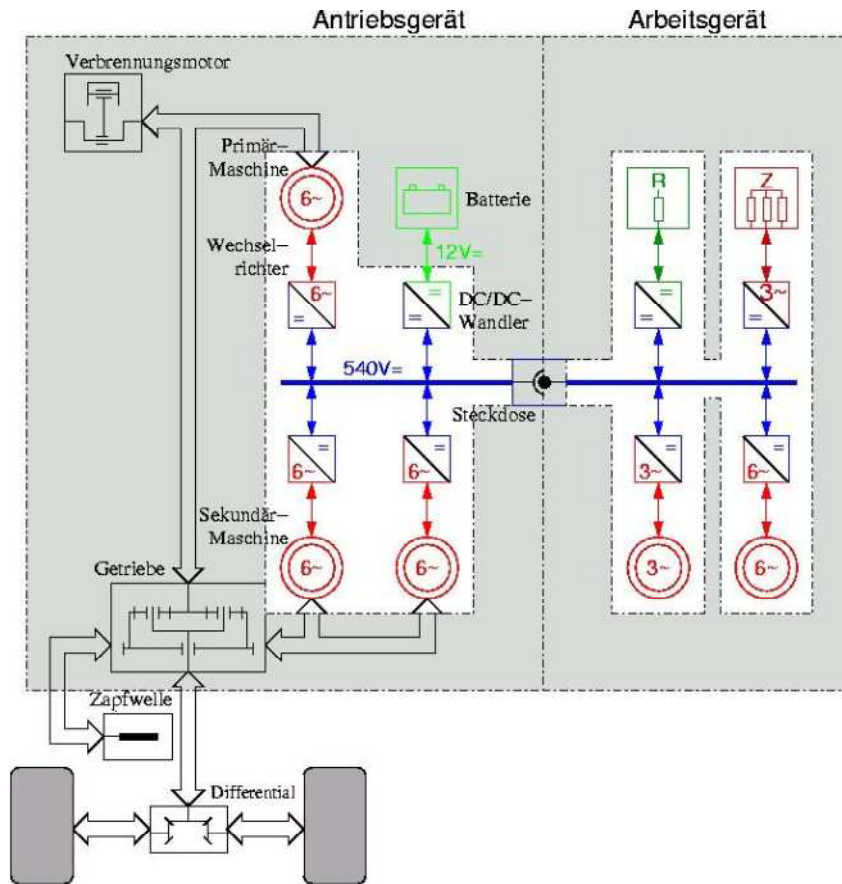


Figura 5 - Diagrama conceitual do Sistema MELA (Fonte: http://www.fast.kit.edu/download/DownloadsMobima/007_beitrag_AGCO_szajek.pdf)

Em 2007, a empresa John Deere apresentou o trator agrícola modelo 6030 E Premium, uma máquina comercial equipada com um gerador de energia elétrica de 20kW, gerando 14Vcc, 230Vca monofásico e 400Vca trifásico. Em termos operacionais, a chegada deste trator configurou-se como sendo a estreia da tração elétrica para o mundo das máquinas agrícolas (BUNING, 2010). No mesmo ano, os modelos E-Premium 7430 e 7530 (Figura 6) foram premiados com a Medalha de Ouro na Exposição Internacional de Maquinaria Agrícola - AGRITECHNICA 2007, maior exposição do mundo de inovações agrícolas, organizada pela Deutsche Landwirtschafts - Gesellschaft - DLG (Sociedade Alemã de Agricultura) (SOBOTZIK, 2010).



Figura 6 - Trator agrícola marca John Deere, modelo E-Premium 7530 premiado com a Medalha de Ouro na Exposição Internacional de Maquinaria Agrícola - AGRITECHNICA 2007

Em 2009, a Empresa John Deere apresentou uma Tomada de Potência eletricamente acionada (Figura 7). O sistema constituía-se, basicamente, de um gerador de energia e de um motor elétrico, comandados por uma eletrônica de potência, montados em uma única caixa de transmissão. Este sistema permitia a rotação do eixo da PTO (*“Power Take Off”*, ou TDP - Tomada de Potência), nos dois sentidos, independentemente da rotação do motor diesel. Possuía, ainda, uma conexão elétrica para acionamento de equipamentos diversos.

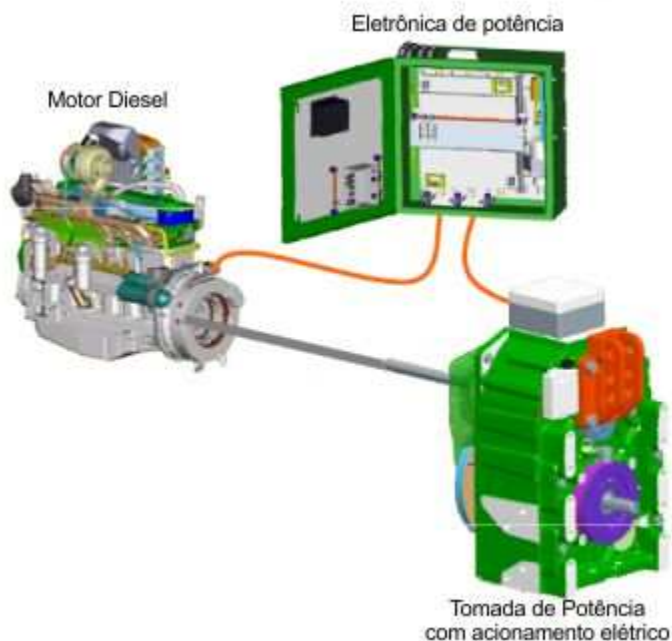


Figura 7 - Esquema conceitual da Tomada de Potência eletricamente acionada apresentada em 2009 pela marca John Deere (Fonte: GUGEL, 2010)

Ainda em 2009, a empresa Belarus apresentou o trator agrícola modelo 3023 (Figura 8), equipado com um motor diesel de 220kW e com tração diesel-elétrica controlada eletronicamente. A tomada de força dianteira é acionada eletricamente, sendo totalmente independente do regime do motor de combustão interna. A rede interna de alta tensão, com corrente contínua, permite gerar até 172 kW de potência elétrica para atender a demanda de equipamentos externos. (SIURU, 2011).

Este desenvolvimento foi premiado com a Medalha de Prata na Exposição Internacional de Maquinaria Agrícola - AGRITECHNICA 2009, organizada pela Deutsche Landwirtschafts - Gesellschaft - DLG, e representa o primeiro trator agrícola com tração diesel-elétrica, produzido em série.



Figura 8 - Trator agrícola Belarus 3023 premiado com a Medalha de Prata na AGRITECHNICA 2009 (Fonte: www.agritechnica.com)

O projeto denominado "ElecTra" foi iniciado em 2009 pela empresa ZF Friedrichshafen AG, em conjunto com as empresas Same Deutz-Fahr Group e AMAZONEN-Werke. Neste projeto, instalou-se o sistema ZF-Terra+ integrado à caixa de transmissão (Figura 9) de um trator com potência nominal de 163kW. O sistema ZF-Terra+ tem a capacidade de gerar continuamente energia elétrica até 50kW, destinados ao acionamento de sistemas auxiliares do trator e ao acionamento de uma semeadora de 9 metros de largura, cujo acionamento hidráulico foi substituído por elétrico. A Figura 10 apresenta a arquitetura do sistema elétrico trator/implemento utilizada no projeto ElecTra.

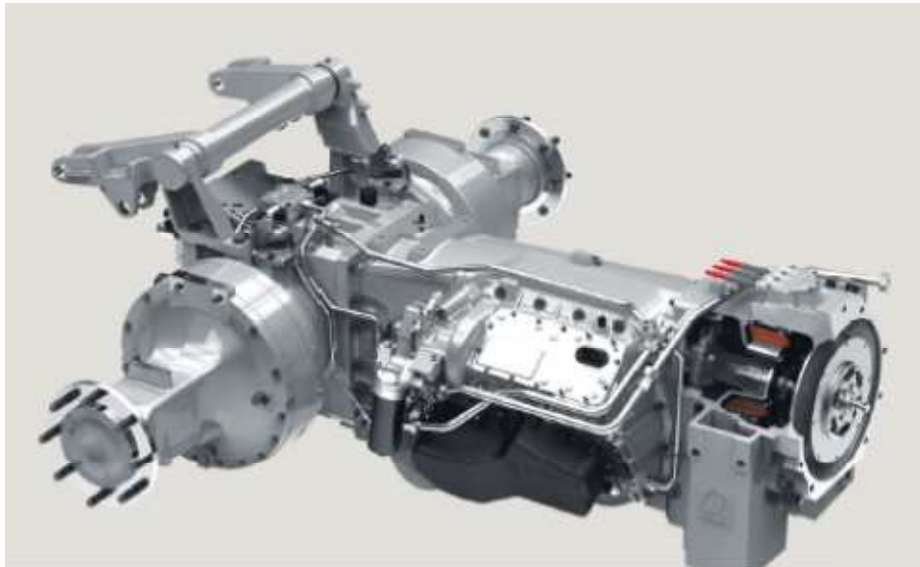


Figura 9 - Caixa de transmissão com o sistema ZF-Terra+ incorporado. (Fonte: ZF Press Kit Agritechnica 2009)

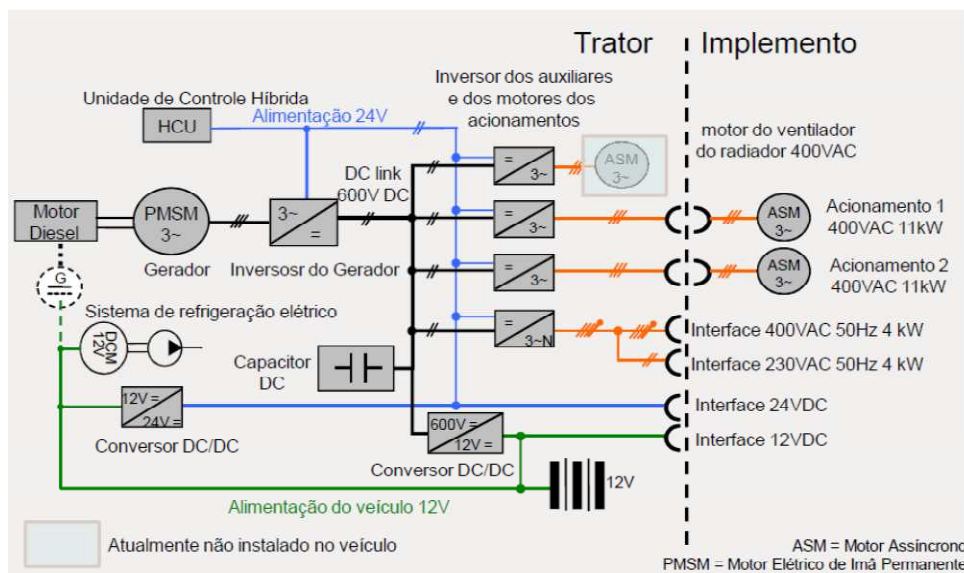


Figura 10 - Arquitetura do sistema elétrico trator/implemento do projeto ElecTra. (Adaptado de Götz, M. et al, 2011)

Em 2011 a empresa Rigitrac Traktorenbau AG desenvolveu, em conjunto com a Technische Universität Dresden, o trator agrícola modelo RigiTrac EWD 120 - Diesel Electric (Figura 11). Este trator possui um sistema de propulsão diesel elétrico composto por um motor

diesel de 91kW, um gerador de energia elétrica de 85kW e 650Vcc e quatro motores elétricos, um em cada roda motora, com potência nominal de 33kW cada.



Figura 11 - Trator agrícola modelo RigiTrac EWD 120 - Diesel Electric (Fonte: www.ritrac.ch)

A Figura 12 mostra esquematicamente o sistema de geração de energia elétrica e de transmissão de energia do trator RigiTrac EWD 120 - Diesel Electric. Este desenvolvimento foi posteriormente premiado com a Medalha de Prata na Exposição Internacional de Maquinaria Agrícola - AGRITECHNICA 2011.

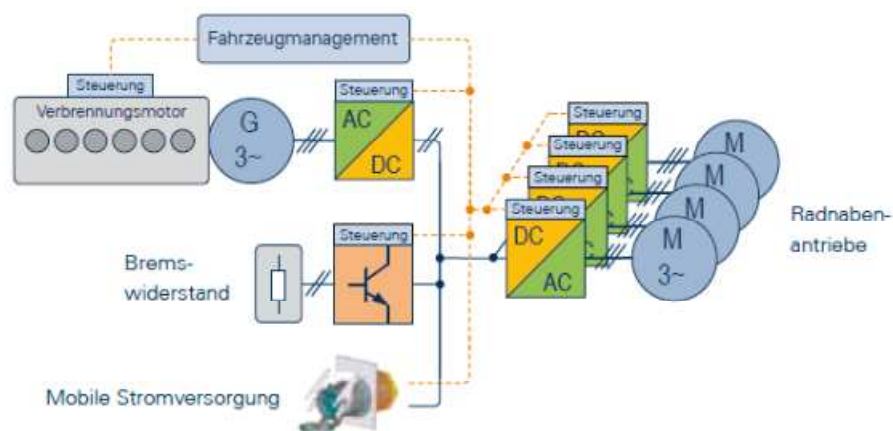


Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema de propulsão diesel-elétrico e do sistema de transmissão de energia elétrica do trator RigiTrac EWD 120 - Diesel Electric. (www.ritrac.ch)

A energia elétrica para o funcionamento dos equipamentos auxiliares dos tratores que absorvem elevados níveis de potência, tais como ventiladores, bombas hidráulicas e compressores de ar condicionado, bem como, a substituição de alternadores com conversores AC/DC (corrente alternada para corrente contínua), já foram alcançados, mas o uso de energia elétrica para a transmissão de potência ainda está na fase inicial de desenvolvimento. Vários estudos têm mostrado que o uso de energia elétrica para os vários componentes auxiliares leva a significativa economia de combustível, especialmente em condições de operação em cargas parciais.

Mark (2012), analisando as novidades apresentadas na feira Agritechnica realizada em Hannover, em novembro de 2011, aponta uma clara tendência na substituição da tomada de potência hidráulica do trator agrícola por sistemas elétricos para transferência da energia para os implementos agrícolas. Segundo o autor, neste evento várias empresas mostraram implementos movidos à eletricidade. A Fliegl, empresa alemã de alta tecnologia, fabricante de reboques para transporte, por exemplo, apresentou um eixo para reboque de acionamento elétrico e estava prevendo que TDP poderia desaparecer dentro de 15 anos.

Os regulamentos para emissões de poluentes e a economia de combustível são os principais motivos para a mudança. Fabricantes de motores estão tendo que fazer mais esforços para reduzir o material particulado e óxidos nitrosos que saem dos gases de escape, bem como para reduzir o uso de combustível. Implementos acionados eletricamente oferecem uma boa alternativa para se conseguir estes objetivos.

O autor aponta ainda que as vantagens da utilização da energia elétrica sobre a hidráulica baseiam-se na redução do calor gerado, do ruído e da baixa eficiência da energia hidráulica. Com respeito à TDP mecânica, as principais vantagens são relativas ao incômodo e perigoso uso dos eixos girantes para a transmissão da energia. Neste caso, a utilização da energia elétrica pode alcançar níveis de até 5% de economia de combustível.

A precisão dos acionamentos elétricos também é melhor. Os motores elétricos disponibilizam uma gama quase infinita de rotação para ventiladores ou bombas, que pode ser alterada em milissegundos. Isso significa melhor flexibilidade e uma aplicação mais precisa, bem como partidas e paradas mais precisas.

Soma-se a isso, a possibilidade de ajuste da rotação da Tomada de Potência Elétrica, independentemente da rotação do motor diesel. Demandas mais elevadas de potência de saída podem ser mantidas à baixas rotações do motor diesel, mesmo quando o motor estiver sob carga, deixando uma maior proporção da potência do motor disponível para tração.

A energia elétrica pode ser utilizada ainda para acionar sistemas auxiliares ou periféricos na máquina agrícola, bem como facilita o reposicionamento destes. Na verdade, praticamente qualquer sistema pode ser acionado pela energia elétrica. Sistemas auxiliares tais como do ar condicionado, dos ventiladores e bombas do sistema de arrefecimento, etc., não precisam mais ser acionados por correias e polias e podem, facilmente, ter a rotação controlada de acordo com a necessidade. O compressor de ar também pode ser acionado eletricamente, sem a necessidade do acoplamento magnético para ligar ou desligar o sistema quando a pressão se encontra fora dos níveis operacionais. O acionamento elétrico destes sistemas ainda tem a vantagem de ser independente da rotação do motor diesel, podendo operar em rotações elevadas mesmo com o motor em baixa rotação.

No que tange ao acionamento de implementos agrícolas, o acionamento elétrico é mais adequado àqueles que demandam menor potência, entre 4 e 6kW, como os de aplicação de insumos agrícolas (sementes, fertilizantes, etc.). São também adequados para os implementos cujos acionamentos são mecanicamente complexos ou são posicionados longe da TDP do trator. A empresa Rauch foi a primeira a desenvolver um espalhador de insumos acionado eletricamente. Atualmente a empresa Amazone disponibiliza o seu pulverizador de arrasto, modelo UX eSpray, com acionamento elétrico que requer apenas 24kW (33HP) para as bombas de alimentação, regulador de pressão, sistema de mistura e eletrônicos.

Pulverizadores autopropelidos com acionamento hidrostático, bem como, colhedoras de grãos, também podem ser acionados eletricamente. As transmissões complexas podem ser simplificadas para reduzir a quantidade de componentes (correias, polias, mancais, etc.) e possibilitar que a máquina funcione em baixa rotação, mantendo a velocidade máxima.

Sistemas de transmissão de energia elétrica geralmente alcançam níveis de 90% de eficiência e são mais eficientes do que os sistemas hidráulicos, que chegam apenas a 75%. Já as transmissões mecânicas (TDP), por si só, são eficientes, no entanto, possuem inconveniências como, por exemplo; o uso de correias ou correntes, eixos girantes, custos,

manutenção, maior dificuldade para controle da rotação, etc. Os tratores elétricos, da série Rigitrac, com acionamento elétrico nas rodas, por exemplo, possuem eficiência de 85%, enquanto os do mesmo fabricante, com unidades hidrostáticas de acionamento, apresentam apenas de 65 a 70% de eficiência.

A energia elétrica pode ser obtida nos tratores agrícolas por meio das unidades diesel-elétricas apresentadas ou por meio da solução ZF-Terra+. Alternativamente, nos tratores agrícolas convencionais, a energia elétrica pode ser obtida montando-se uma unidade geradora na parte frontal do trator, acoplada diretamente ao eixo do motor, ou ainda na parte traseira, montada no engate de três pontos do trator e na TDP. Atualmente existem algumas empresas que procuram desenvolver geradores elétricos para a TDP, capazes de fornecerem potência elétrica de até 100kW (136HP). Uma destas empresas é a GKN Walterscheid, que disponibiliza seu gerador modelo EPower (Figura 13) que pode ser montado em uma TDP dianteira ou traseira e é capaz de fornecer 20kW (27HP) de energia elétrica, a uma rotação da TDP de 68rad s^{-1} (650rpm), ou até 100kW (136HP) a $94,2\text{ rad s}^{-1}$ (900rpm).



Figura 13 - Sistema de geração de energia elétrica, marca GKN Walterscheid, modelo EPower, para utilização em tratores agrícolas convencionais. (Fonte: <http://www.gkn-walterscheid.de/en/agritechnica/>)

Como se pode notar, enquanto não se tem disponível o trator agrícola puramente elétrico, devido a dificuldades tecnológicas para o armazenamento da energia elétrica, ou mesmo, a viabilização da obtenção da energia elétrica por meio das células combustíveis, o

desenvolvimento do trator agrícola elétrico tem sido alternado entre os tratores com sistemas híbridos de tração diesel-elétrico e os com sistema de geração elétrica apenas para os equipamentos auxiliares do trator e para o acionamento de equipamentos agrícolas diversos, por meio da disponibilização de uma Tomada de Potência Elétrica.

O interesse é evidentemente e crescente por uma solução que possibilite fornecer a vários sistemas e implementos, exatamente a potência necessária, independentemente da rotação do motor diesel, a fim de oferecer vantagens em termos de eficiência e produtividade.

3.2 Máquinas elétricas

3.2.1 Classificação de máquinas elétricas

Máquina Elétrica é o nome genérico de dispositivos que convertem energia elétrica para energia mecânica (motores), que convertem energia mecânica para energia elétrica (geradores), ou ainda, que convertem níveis de tensão e corrente alternada (transformadores). Os motores e geradores são considerados máquinas elétricas rotativas, enquanto os transformadores são máquinas elétricas estáticas. A Figura 14 apresenta um diagrama de classificação de máquinas elétricas rotativas.

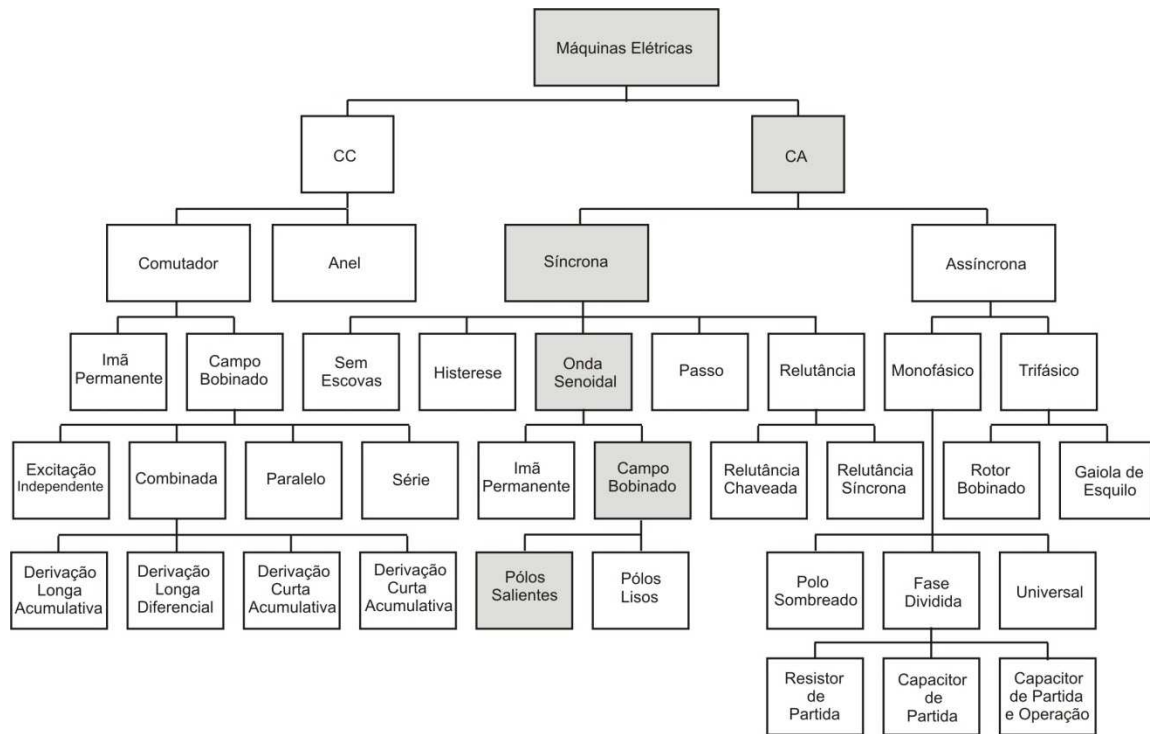


Figura 14: Classificação das máquinas elétricas rotativas (Adaptado de <http://web.eecs.utk.edu/~tolbert/teaching/ece321/handouts/machclass.pdf>)

Inicialmente, as máquinas elétricas rotativas podem ser divididas em dois grandes grupos: máquinas de corrente contínua (DC – *Direct Current*) e máquinas de corrente alternada (AC – *Alternating Current*), podendo, nos casos onde a mesma é reversível, operar como gerador ou motor. Considerando-se apenas as máquinas de corrente alternada, há uma nova subdivisão em máquinas síncronas e máquinas de indução, e assim sucessivamente.

Considerando-se a classificação apresentada, um dínamo, por exemplo, pode ser definido como uma máquina de corrente contínua, que opera como gerador, com comutador e normalmente possui ímãs permanentes para a excitação de campo. Já um alternador veicular pode ser classificado como máquina de corrente alternada síncrona, que opera como gerador, com excitação de campo e polos salientes.

3.2.2 Máquinas elétricas síncronas

Nas máquinas elétricas síncronas, o rotor gira em sincronismo com o campo magnético do estator, não ocorrendo o escorregamento característico das máquinas assíncronas. Este fato garante uma relação direta entre a velocidade angular e a frequência elétrica aplicada, no caso da utilização como motor ou fornecida, quando utilizada como gerador.

Devido às características construtivas, as máquinas síncronas apresentam um maior custo em relação às máquinas de indução assíncronas, sendo normalmente utilizadas como geradores. No funcionamento como motor, as máquinas síncronas são mais utilizadas em potências elevadas, onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores de indução (assíncronos). Por outro lado, as máquinas síncronas com ímãs permanentes têm sido cada vez mais utilizadas para acionamento de baixas e médias potências, especialmente quando se necessita de velocidade variável, alto rendimento, respostas dinâmicas rápidas.

Uma aplicação típica da máquina síncrona funcionando como gerador é o seu uso em usinas de geração de energia elétrica. Praticamente toda a energia elétrica disponível no Brasil é produzida por geradores síncronos. Geradores síncronos também são utilizados para geração de energia elétrica em centrais de pequeno porte e em grupos geradores de emergência. Neste caso, normalmente o gerador não está ligado a um grande sistema de energia, mas sim operando de forma isolada.

Uma máquina síncrona é composta por um estator, que aloja um enrolamento onde será induzida ou aplicada uma tensão, dependendo da utilização, como motor ou gerador, um rotor bobinado conectado ao meio externo, normalmente através de anéis coletores. A Figura 15, ilustra uma típica máquina síncrona com rotor de polos salientes e seus principais componentes.

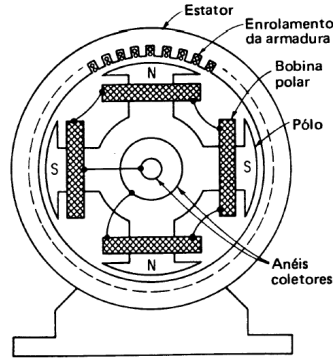


Figura 15 - Máquina síncrona de polos salientes (KOSOW, 2011)

Como define Kosow (2011), a relação entre a tensão nos terminais e a gerada em máquinas síncronas é dada pela Equação 1.

$$\dot{V}_{(f)} = \dot{E}_{(gf)} - I_{(f)}\dot{Z}_{(f)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\dot{V}_{(f)}$: Tensão de saída por fase;

$\dot{E}_{(gf)}$: Tensão gerada por fase;

$I_{(f)}\dot{Z}_{(f)}$: Queda de tensão na impedância síncrona do alternador.

Para um alternador mono ou polifásico, a Equação 1 pode ser reescrita da forma genérica, como mostrado na Equação 2.

$$V_f = \dot{E}_{gf} - \dot{I}_a R_a - \dot{I}_a (jX_a) \mp \dot{E}_{ar} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_f : Tensão nos terminais por fase;

\dot{E}_{gf} : Tensão gerada por fase;

$\dot{I}_a R_a$: Queda de tensão no enrolamento da armadura;

$\dot{I}_a (jX_a)$: Queda de tensão na reatância do enrolamento da armadura;

\dot{E}_{ar} : Efeito da reação magnetizante direta e transversalmente da armadura.

O circuito elétrico equivalente de uma máquina síncrona trifásica, operando como gerador, está apresentado na Figura 16.

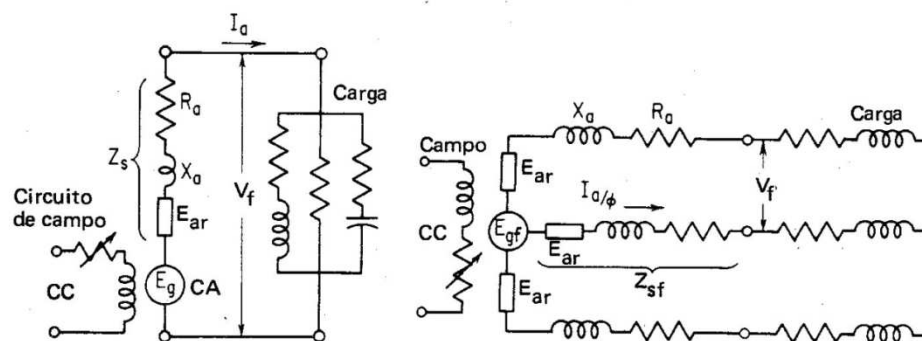


Figura 16 - Circuito elétrico equivalente de uma máquina síncrona trifásica, operando como gerador

O enrolamento de cada uma das fases de um alternador trifásico é representado por uma resistência efetiva de armadura (R_a), uma reatância de armadura (X_a) e uma tensão gerada (E_{gf}). Além disso, se a carga for equilibrada, pode-se imaginar que a queda de tensão devida ao efeito da reação da armadura é a mesma em cada fase; assim, E_{ar} é a queda de tensão devido à reação da armadura, por fase.

3.3 Geração de energia elétrica em veículos

Antes da década de 1970, em geral, eram utilizados dínamos para a geração de energia elétrica em veículos. O dínamo é uma máquina elétrica de corrente contínua do tipo gerador, que converte energia mecânica (na forma de rotação mecânica) em energia elétrica. Os dínamos possuem ímãs permanentes ou um eletroímã para a geração do campo magnético, localizados no estator. A corrente elétrica, nestes dispositivos, é gerada no rotor e através de escovas e anéis coletores. Um processo de evolução tecnológica fez com que os dínamos fossem totalmente substituídos pelos alternadores nas últimas décadas, nas aplicações veiculares convencionais.

O alternador veicular é uma máquina de corrente alternada síncrona, normalmente trifásica, que converte energia mecânica (na forma de rotação mecânica) em energia elétrica. Nos alternadores, o rotor é o responsável pelo campo magnético girante, sendo gerado por uma corrente elétrica (corrente de campo) que circula nos enrolamentos do rotor. Ao contrário

do dínamo, no alternador, a corrente gerada é obtida nos enrolamento do estator, dispensando o uso de escovas para tal propósito, eliminando assim um item de grande desgaste durante o uso do mesmo.

No alternador, apesar de ainda existir a necessidade de escovas em alguns modelos para a excitação, a durabilidade das mesmas é muito elevada, pois as mesmas são submetidas a corrente elétrica pequena (corrente de campo), quando comparado com a corrente circulante pelas escovas de um dínamo. Os alternadores têm inúmeras vantagens em relação aos dínamos, podendo-se destacar o seu menor peso, maior durabilidade, menor custo e possibilidade de controle da tensão gerada.

É notório o crescimento contínuo da demanda de energia elétrica em veículos modernos. Dispositivos que antes eram acionados diretamente pelo motor à combustão ou por motores hidráulicos, passaram a ser acionados através de motores elétricos. Podem-se destacar o acionamento elétrico do sistema de assistência da direção, de ventiladores dos sistemas de refrigeração e circulação de ar, de bombas de água de arrefecimento, compressores de ar para sistema de frenagem, compressores de ar condicionado, etc.

A fim de suportar o crescimento da demanda por energia elétrica em veículos, estão sendo desenvolvidos estudos para a adoção de um sistema elétrico na tensão de 42Vcc em substituição ao de 14Vcc atualmente adotado, reduzindo o consumo de corrente e, conseqüentemente, o tamanho e o custo dos dispositivos semicondutores de potência utilizados nos controles e acionamentos. Shrud et al. (2007) ilustram graficamente o aumento médio de potência e corrente elétrica demandadas em veículo típico, estimando a sua tendência de crescimento nos próximos anos (Figura 17).

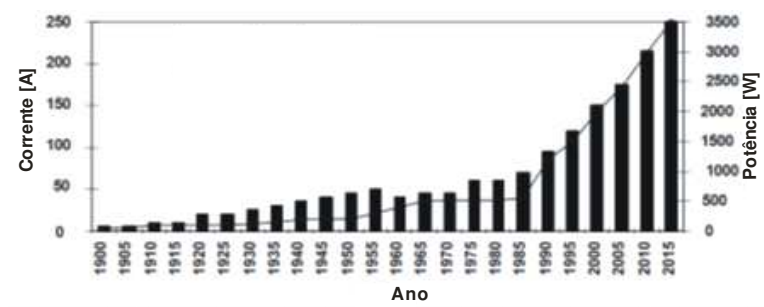


Figura 17 - Evolução da potência elétrica instalada e consumo médio de corrente em um veículo típico, ao longo do tempo (SHRUD, et al., 2007)

3.4 Sistema elétrico veicular

Atualmente, o sistema elétrico de um veículo é constituído de um gerador síncrono (conhecido por alternador), normalmente trifásico, com ou sem escovas. A tensão gerada é retificada por uma ponte semicondutora e aplicada à bateria e aos demais dispositivos elétricos do veículo.

Os alternadores automotivos possuem as mesmas características de uma máquina síncrona operando como gerador, com a adição de uma ponte retificadora e um circuito eletrônico regulador de tensão em corrente contínua, uma vez que os veículos e equipamentos que os utilizam operam com corrente contínua e necessitam de um valor de tensão apropriado para recarregar a bateria e alimentar os dispositivos elétricos do veículo.

Segundo Whaley (2004), nos sistemas elétricos veiculares, em geral, a tensão de saída alternador, após retificação, é mantida em aproximadamente 14Vcc, que é a tensão nominal de carga de uma bateria convencional de 12Vcc, do tipo chumbo-ácida.

Em geral, os alternadores veiculares são projetados para trabalhar em conjunto com uma bateria ou um banco de baterias. A função principal destas baterias é suprir a demanda de corrente solicitada pelas cargas acopladas ao sistema elétrico, enquanto o motor que aciona o alternador estiver parado ou em baixas rotações. Assim, o nível da tensão de saída do sistema de geração é projetado para promover a carga total da bateria (2,45Vcc/elemento), que é um valor superior à tensão elétrica nominal do veículo. Cabe assim à bateria o papel de agente estabilizador da tensão do sistema, e ao regulador de tensão do alternador, limitar a tensão máxima de carga da bateria, evitando danos à mesma e aos demais dispositivos elétricos.

Conclui-se que a bateria é um item essencial no funcionamento do sistema elétrico convencional de um veículo e caso o mesmo venha a operar sem esta, a tensão de todo o sistema elétrico se tornará instável em função da entrada e saída de cargas no sistema, podendo ocorrer sobretensões, com grandes prejuízos a todo o sistema.

Os alternadores de sistemas automotivos têm, portanto, a finalidade de carregar a bateria e fornecer energia aos sistemas elétricos, quando o motor encontra-se em funcionamento.

Em geral, os sistemas elétricos veiculares utilizam alternadores do tipo Lundell, com rotor de polos salientes, possuindo um controlador de excitação e escovas e anéis coletores para a condução da corrente (Figura 18).

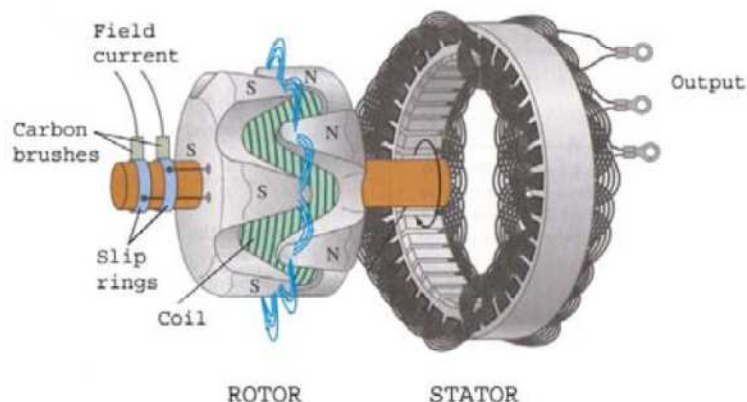


Figura 18 - Visão explodida de um alternador do tipo Lundell (WHALEY, et al., 2004)

Um modelo elétrico genérico de um alternador do tipo Lundell (Figura 19) foi apresentado por Shrud et al. (2007), com as indutâncias de fuga (L_s) e resistências de enrolamento (R_s) conectadas em série.

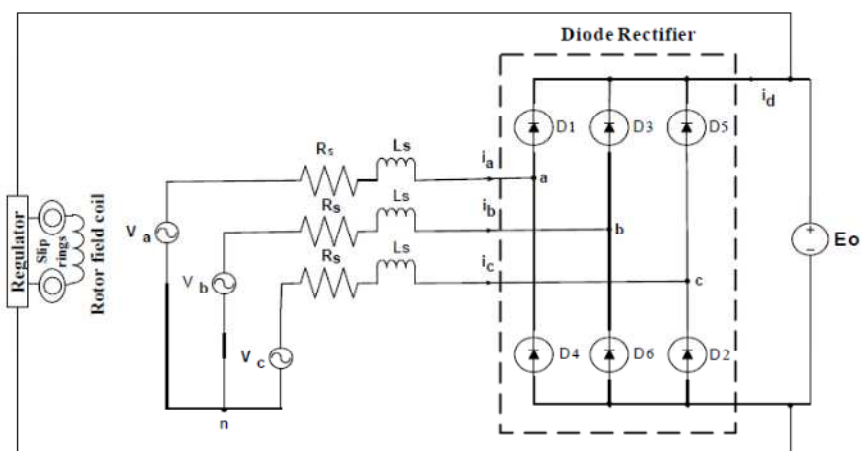


Figura 19 - Modelo elétrico de um gerador do tipo Lundell

Neste modelo, a tensão de saída do alternador é controlada pelo ajuste da corrente de campo e retificada por uma ponte de seis diodos retificadores. A forma de onda obtida, após a retificação em ponte trifásica completa, é mostrada na Figura 20.

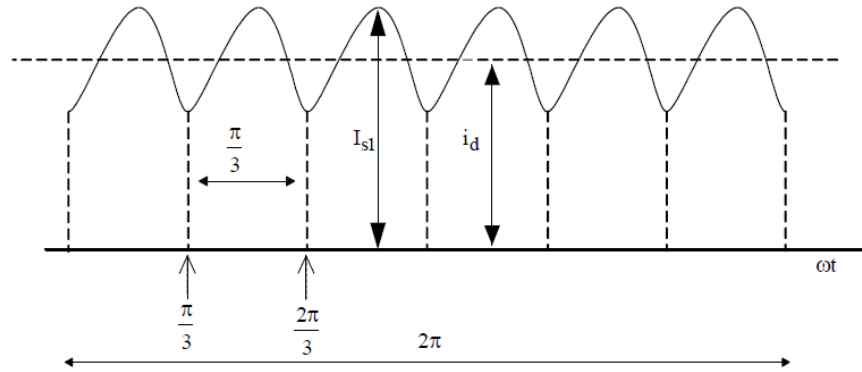


Figura 20 - Aparência da forma de onda de tensão gerada, após retificação (SHRUD et al., 2007)

Segundo o autor, o modelo matemático equivalente para a tensão gerada, considerando-se uma carga constante é o ilustrado pela Figura 21.

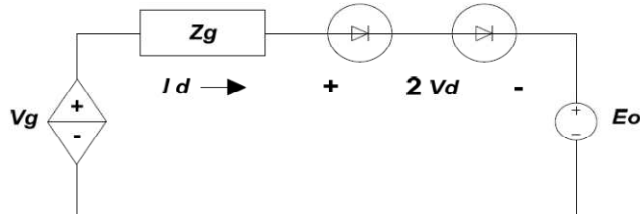


Figura 21 - Modelo do gerador síncrono (SHRUD et al., 2007)

Neste modelo, V_g é a tensão gerada internamente e Z_g é a impedância síncrona total, que podem ser calculadas pela Equação 3, segundo Shrud et al. (2007).

$$\underbrace{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s \cos\left(\phi - \frac{\pi}{6}\right)}_{\tilde{V}_g} = \underbrace{\left[\frac{3R_s}{2} + \frac{\sqrt{3}\omega L_s}{2} \right]}_{Z_g(\omega)} \frac{3}{\pi} I_{s1} + 2V_d + E_o \quad \text{Equação 3}$$

3.5 Alternadores sem escovas (*brushless*)

Os alternadores automotivos tradicionais (tipo Lundell), apesar de largamente utilizados pela indústria veicular, possuem algumas restrições quando se necessita de uma geração de energia em condições adversas de trabalho, tais como: temperaturas extremas, ciclo contínuo de trabalho, altas potências, ambientes agressivos, etc. No Brasil, os alternadores sem

escovas (*brushless*), têm sido utilizados em veículos especiais, e que demandam de uma grande quantidade de energia e confiabilidade de operação. Como exemplo, podem-se citar os veículos militares blindados, embarcações, ambulâncias equipadas com unidade de terapia intensiva (UTIs móveis) e grandes veículos elétricos para mineradoras.

A diferença fundamental entre um alternador convencional (tipo Lundell) e um alternador sem escovas, está na forma de transferir a corrente para a magnetização do rotor. No sistema convencional, o início da geração se dá por um magnetismo residual e, quando a tensão de saída do alternador começa a ser incrementada, esta é aplicada ao rotor através de um conjunto de anéis coletores e escovas de liga de carvão, para possibilitar que a corrente de campo chegue à parte girante e promova a magnetização do rotor. Já no alternador sem escovas, a corrente de excitação chega ao rotor através de um acoplamento eletro magnético, dispensando assim o acoplamento por anéis e escovas de contato.

Talvez, a maior limitação para o uso generalizado deste tipo de alternador não esteja nas suas dimensões, uma vez que estes equipamentos são bastante compactos em relação à potência gerada, mas sim no seu custo, quando comparado a um alternador convencional.

A Figura 22 ilustra o circuito eletromagnético de um alternador automotivo sem escovas. No circuito é possível observar que o acoplamento para geração do campo da excitatriz é puramente magnético. Um circuito regulador de tensão monitora a tensão gerada e envia uma corrente controlada à bobina de campo da excitatriz. Este campo magnético, é induzido nas bobinas excitatrizes da armadura (rotor), e em consequência disto, é gerada uma tensão alternada internamente ao rotor, que após passar pelo conjunto retificador da excitatriz, é aplicada ao enrolamento do campo principal, produzindo o campo magnético da armadura.

Pelo mesmo princípio, o campo principal, quando induzido nas bobinas do estator, produz uma tensão alternada que, após passar pelo retificador principal de saída, é disponibilizada nos bornes de saída do equipamento.

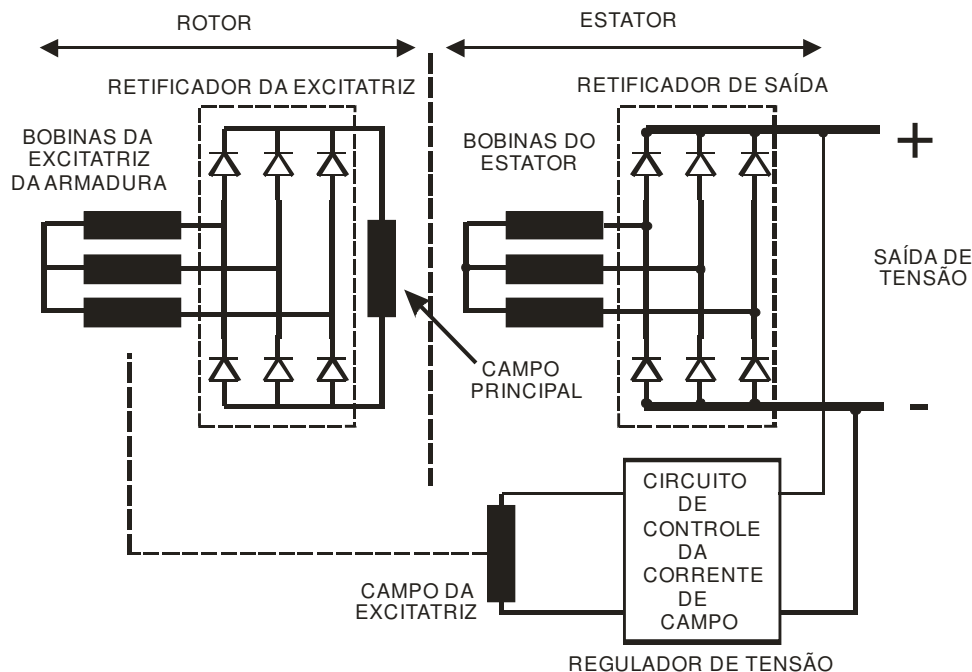


Figura 22 - Circuito eletromagnético de um alternador automotivo sem escovas (Adaptado do Informativo Técnico Delco Remy 1G-500 1998)

3.6 Reguladores automáticos de tensão

Um componente essencial em todo sistema de geração de energia elétrica é o regulador automático de tensão, também conhecido por AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

O controle automático da tensão em geradores sempre foi objeto de estudo desde os primórdios de sua utilização. Em 1947, Stewart (1947) apresentou uma classificação para os reguladores de tensão de geradores, utilizados à época. Existiam os reguladores de ação direta (*direct-acting*) que realizavam tal função variando diretamente uma resistência (reostato) colocada no circuito de excitação de campo. Normalmente, a variação de tal resistência durante a operação se dá através de um reostato, operado por um motor elétrico. Os reguladores do tipo pulso (*pulse*) chaveiam a corrente de campo, modulando a magnitude ou a frequência do sinal, ajustando desta forma o valor da corrente de campo no valor desejado. Finalmente, o autor destaca existência do regulador do tipo quiescente (*quiescent*), que combina os dois tipos de atuação anteriormente descritos. Neste último tipo, a reação a uma

mudança de carga se dá inicialmente através do regulador do tipo pulso, maximizando o efeito corretivo, para em um momento seguinte, atuar no regulador de ação direta, fazendo com que o gerador retorne ao regime permanente.

Schaefer e Kiyong (2001) afirmaram que no passado, o comportamento da resposta de um gerador, utilizando um sistema de excitação analógica era baseado no ajuste de potenciômetros ou ainda, na colocação ou eliminação de resistências e capacitâncias na malha do circuito de controle do regulador de tensão. Esses ajustes podem ser muito demorados porque frequentemente exigem ligar e desligar a excitação muitas vezes para se realizar as modificações, dificultando a operação dos sistemas

Stewart (1947) afirma que toda alteração na tensão gerada, decorrente de uma alteração da carga, altera o equilíbrio do regulador de tensão e a correção da tensão e a correção da tensão é um indicativo de que o regulador reestabeleceu o estado de equilíbrio. Para manter a tensão constante, a excitação do gerador deve ser ajustada para os diferentes valores de carga.

Ainda segundo Schaefer e Kiyong (2001), em um mundo de constantes mudanças, novas tecnologias substituem as antigas muito rapidamente, podendo-se destacar a substituição dos reguladores de tensão eletromecânicos, com resistências variáveis (reostatos) acionadas por motores, por excitadores rotativos, conhecidos popularmente como “Amplidyne”, “Regulex” e “Rototrol”, que aprimoraram o desempenho dos geradores da época. Destacam ainda a transição da tecnologia eletromagnética para a tecnologia analógica de controle da excitação.

Segundo os mesmos autores, em 2001 se observa outra grande mudança tecnológica, com a migração do controle analógico para digital. Nesta ocasião, o sistema de excitação foi reduzido para um único módulo integrado que inclui o regulador automático de tensão (AVR), o regulador da corrente de campo (ajuste manual), os limitadores da excitação e, ainda, os sistemas de proteção.

Segundo Bensmaine et al. (2012), geradores síncronos são utilizados para geração de energia elétrica em vários setores como automotivo, usinas, construção naval, etc. Devido à importância dos geradores síncronos, é essencial se assegurar o seu funcionamento adequado por

meio de leis de controle eficientes. Assim, as estratégias de controle devem atender a certas regras fundamentais, sendo as mais importantes:

- Precisão: a saída do processo tem de ser igual ao valor de referência, independentemente de perturbações ou de modificação que possam ocorrer no processo.
- A dinâmica: as restrições sobre o tempo de resposta em malha fechada devem ser respeitadas.
- A robustez: isto é, a insensibilidade do sistema em malha fechada em relação a variações de seus parâmetros e perturbações de entradas.

A Figura 23 ilustra o diagrama de blocos simplificado de um típico controlador analógico, do tipo avanço-atraso, utilizado em reguladores automáticos de tensão (SCHAEFER e KIYONG, 2001). Neste sistema de controle, durante a operação, o ganho de realimentação (K_F) é ajustado através de um potenciômetro para se obter um desempenho estável.

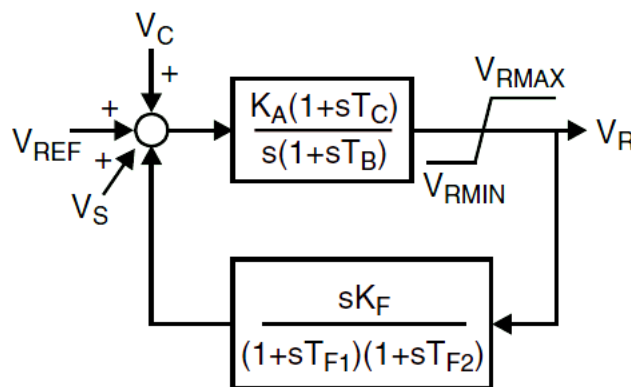


Figura 23 - Diagrama de blocos simplificado de um regulador automático de tensão, implementado de forma analógica, com um controlador do tipo avanço-atraso de fase

A adoção da tecnologia digital em substituição à analógica permitiu a implementação de sistemas de controle mais complexos, havendo a necessidade de novos estudos baseados em modelos matemáticos e estratégias mais adequadas.

A Figura 24 ilustra o diagrama de blocos de um controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo), implementado na forma digital, em um regulador automático de tensão.

O autor discorre sobre como cada uma das ações do PID afeta o desempenho do sistema de controle de tensão e destaca que o efeito combinado das ações PID irá determinar a forma de resposta da excitação do gerador de forma a alcançar o desempenho desejado.

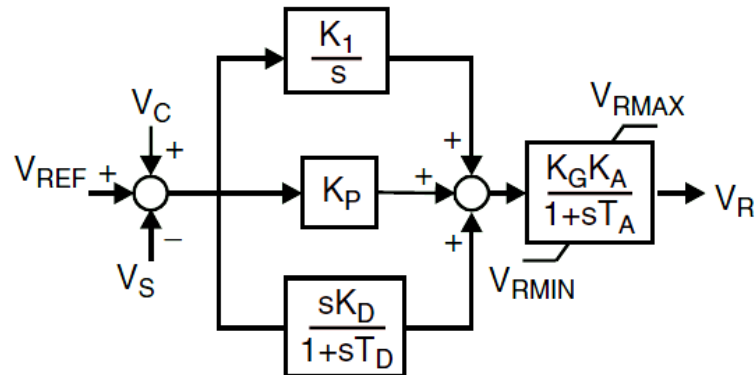


Figura 24 - Controlador PID para um regulador automático de tensão, implementado na forma digital

Segundo Schaefer e Kiyong (2001), em 2001 os sistemas de excitação, baseados em tecnologia digital, forneciam os meios adequados para se alterar facilmente os parâmetros cuja modificação era desafiadora no sistema analógico. O coração da maioria dos controladores digitais de geradores são os microprocessadores embarcados, que são responsáveis por várias ações no sistema de excitação, incluindo regulação automática da tensão, regulação da corrente de campo (ajuste manual), controle do fator de potência, e uma série de limitadores de excitação para regular e manter o gerador dentro dos limites operacionais de segurança da máquina.

No sentido de se aprimorar o funcionamento dos reguladores automáticos de tensão, pesquisadores têm introduzido técnicas de controle avançado como lógica *fuzzy*, controladores não lineares, controle adaptativo, etc., no projeto dos sistemas de controle da excitação de campo.

Os pesquisadores Zhang e Hu (2012) destacaram que o controlador PID tradicional é amplamente utilizado no sistema de excitação de geradores, pois tem as vantagens da estrutura simples e boa robustez. Afirmam ainda que projetos baseados em controle PID inteligente, tais como rede neural PID e controle *fuzzy* PID, se configuram como um avanço do controle PID tradicional. Neste sentido, os autores apresentam Este trabalho apresenta um método não-linear de controle PID, é aplicado ao sistema de controle de excitação de geradores. Este

método de controle é mais simples que o PID com controle de ganho de erro, pois controlador PID não linear tem vantagens da velocidade, alta precisão, sem apresentar sobressinal, podendo alcançar um bom desempenho no controle da tensão gerada.

Moutinho et al. (2008) propuseram o uso de controladores adaptativos em um micro-sistema de geração de energia elétrica, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 25. O sistema micro-gerador de energia é formado por um gerador síncrono de polos salientes, 10kVA, 220Vca, 60Hz, 125,6rad s⁻¹ (1200rpm), que foi acoplado a um motor de corrente contínua de 9kW. O sistema de excitação do gerador é formado por uma ponte retificadora com tiristores, que permite o controle do nível médio de tensão aplicado ao campo do gerador.

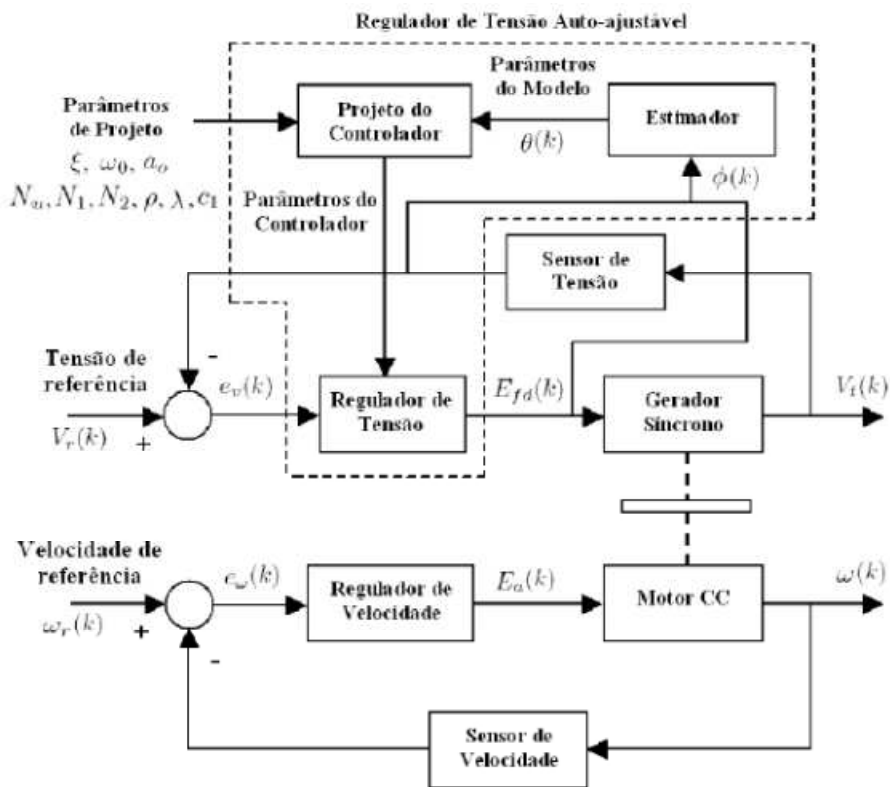


Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema micro-gerador de energia e do controlador de tensão auto-ajustável (MOUTINHO et al., 2008)

No modelo proposto, o sinal $E_{fd}(k)$ representa a variável de controle do nível médio de tensão aplicado ao enrolamento de campo da máquina síncrona e o sinal $E(k)$ a representa a variável de controle da tensão aplicada ao enrolamento de armadura do motor de corrente contínua.

A partir de técnicas de controle auto-ajustável, os autores propõem a utilização dos conceitos de controle preditivo generalizado e técnicas de alocação de polos e concluíram que os controladores adaptativos implementados obtiveram desempenho equivalente ou superior ao dos controladores fixos, considerando as situações analisadas.

A Figura 26 apresenta a estrutura do controlador *fuzzy* para atenção gerada, cuja unidade de lógica *fuzzy* utiliza fuzzificador do tipo “singleton”, máquina de inferência máximo-produto e defuzzificador por centro de gravidade. Neste caso, a sintonia do controlador foi realizada através do ajuste dos ganhos, considerando-se uma perturbação do tipo degrau aplicada na referência de tensão.

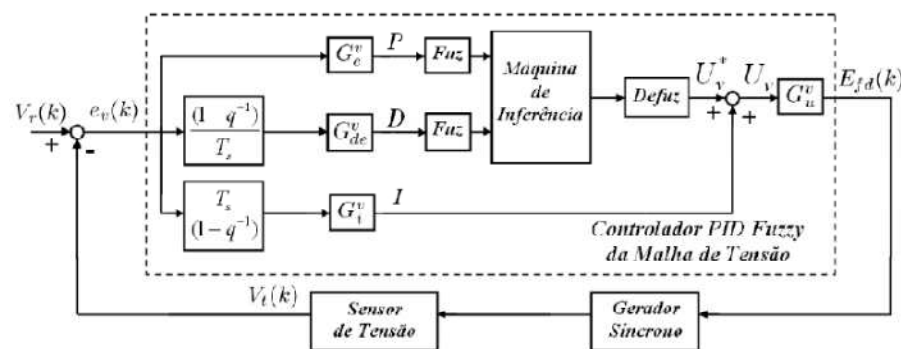


Figura 26 - Estrutura do controlador PID *fuzzy* (MOUTINHO et al., 2008)

Féo (2004), propõe em seu trabalho a utilização de um controlador com lógica nebulosa (*fuzzy*), que apresente características de avanço ou atraso de fase, aplicado a um estabilizador de sistemas de potência para um melhor desempenho frente aos sistemas convencionais de compensação. Os resultados obtidos demonstram o potencial frente a perturbações reais em um sistema elétrico. O controle *fuzzy* proposto possui grande flexibilidade no que se refere frente a simulações e a testes reais em perturbações. Os resultados indicam que estratégias de controle *fuzzy* são bastante promissoras na regulação de tensão nos geradores síncronos.

Elmas e Ustun (2008) apresentam a simulação de um controlador híbrido para o controle da velocidade angular de um motor síncrono de ímã permanente. Neste sistema, um controlador proporcional é ligado em paralelo com um controlador neurofuzzy, com o objetivo de obter uma resposta dinâmica mais rápida e suave. Os resultados apresentados demonstram

uma maior eficiência deste sistema face aos distúrbios mecânicos no eixo, quando comparado aos sistemas convencionais de controle. A Figura 27 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle proposto.

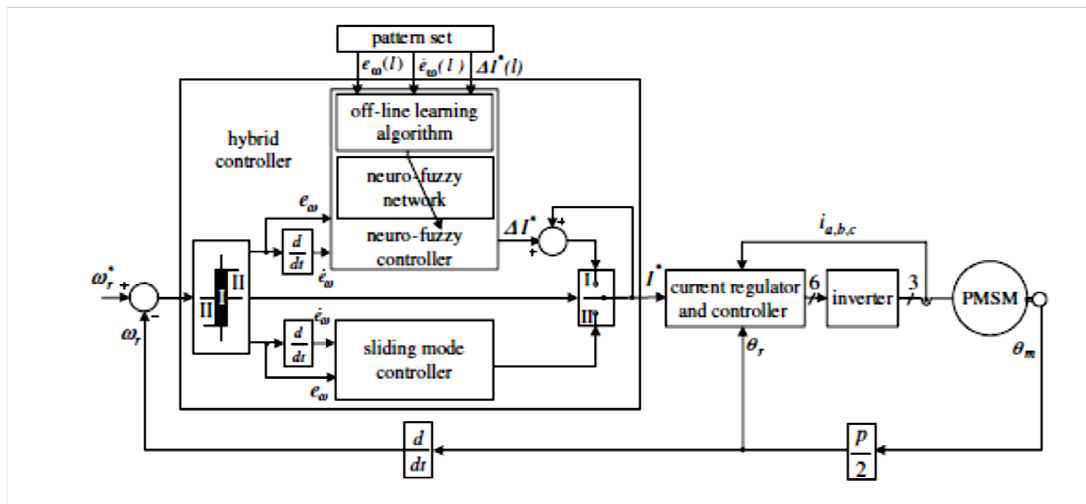


Figura 27 - Diagrama de blocos de um sistema híbrido de controle de um motor síncrono, de ímã permanente

3.7 Reguladores automáticos de tensão para uso veicular

De acordo com Whaley et al (2004), em um sistema elétrico veicular, a tensão é regulada em 14Vcc por um controlador interno ao alternador, que amostra continuamente a tensão da bateria e ajusta a corrente de campo de forma conveniente. A intensidade da corrente de campo é controlada através da variação do ciclo de trabalho da tensão aplicada ao enrolamento de campo, através de modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*). A natureza indutiva do enrolamento de campo age como um filtro passa-baixa e, portanto, o campo magnético gerado é essencialmente contínuo (Figura 28).

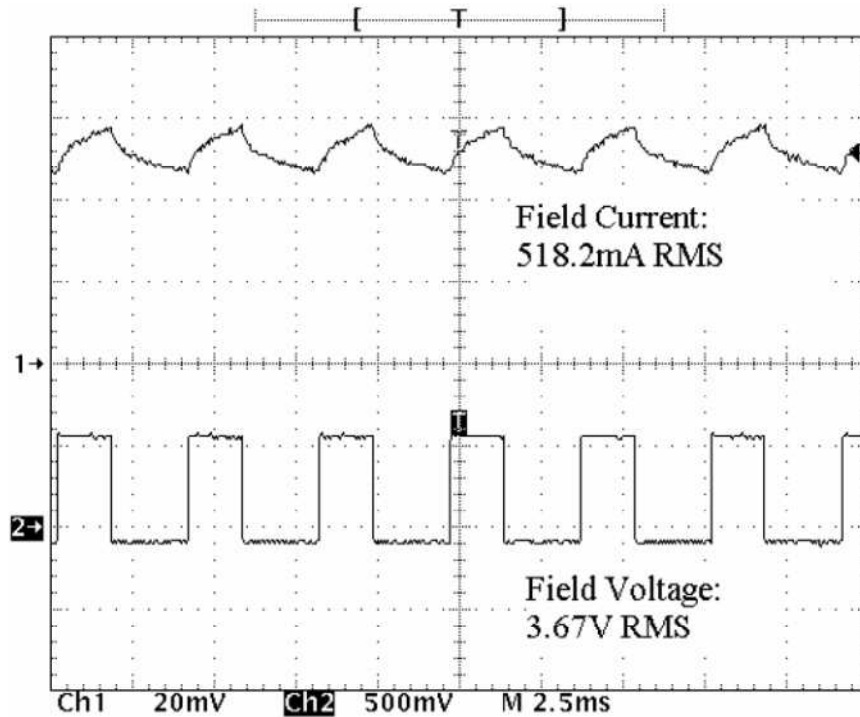


Figura 28 - Corrente de campo e forma de onda da tensão de excitação de um alternador do tipo Lundell (Whaley et al., 2004)

Com o aumento da demanda de potência, mais corrente é fornecida pelo alternador, fazendo com que a tensão de saída apresente uma redução. Nos sistemas veiculares, um AVR controla a corrente de campo do gerador a fim de manter a tensão do sistema em valores adequados à operação dos dispositivos elétricos e para a carga da bateria. No caso de uma diminuição no valor da tensão gerada, o AVR atua de forma a aumentar a corrente de campo (excitação), aumentando consequentemente a tensão gerada. Este aumento se dá através da alteração do ciclo de trabalho do PWM. De forma semelhante, caso haja um aumento da tensão gerada, o AVR deverá atuar no sentido de diminuir a corrente de campo e reduzir consequentemente a tensão gerada.

O sistema de regulação da tensão de saída mais aplicado atualmente pela indústria na fabricação de alternadores veiculares do tipo Lundell é o “liga-desliga”. Este tipo de controle atua diretamente na corrente de excitação para os alternadores, ou por um módulo externo, para os alternadores do tipo *brushless*. Em ambos os casos, o controle é feito por comparação de tensão e utilizam um circuito eletrônico, referenciado por diodo zener para o

estabelecimento da tensão de corte. Este tipo de circuito produz uma histerese de tensão em torno de $0,7V_{cc}$, em torno da tensão de corte.

Para os veículos que operam com tensões nominais de $24V_{cc}$ (bateria com 12 elementos), a tensão de corte da corrente de excitação está em torno de $29V_{cc}$ ($2,45 V/\text{elemento}$). Com esta tensão, pressupõe-se que todos os elementos da bateria estão totalmente carregados e não devem receber mais corrente de carga.

Com o propósito de se aprimorar os alternadores do tipo Lundell, diversos trabalhos foram realizados principalmente com o intuito de melhorar a estabilidade da tensão gerada e aumentar a potência gerada.

Shrud et al. (2007) propuseram o desenvolvimento de uma arquitetura alternativa para geradores do tipo Lundell, que possibilita uma saída dupla de tensão: 12 e $42V_{cc}$. O modelo matemático proposto (Figura 29) permite a simulação computacional através do Simulink do comportamento dinâmico da tensão de saída, corrente de saída e fator de amortecimento em função de uma alteração de carga. Foram realizadas simulações considerando-se uma rotação constante de $62,8\text{rad s}^{-1}$ (6000rpm) e uma corrente de campo constante de $3,6\text{A}$.

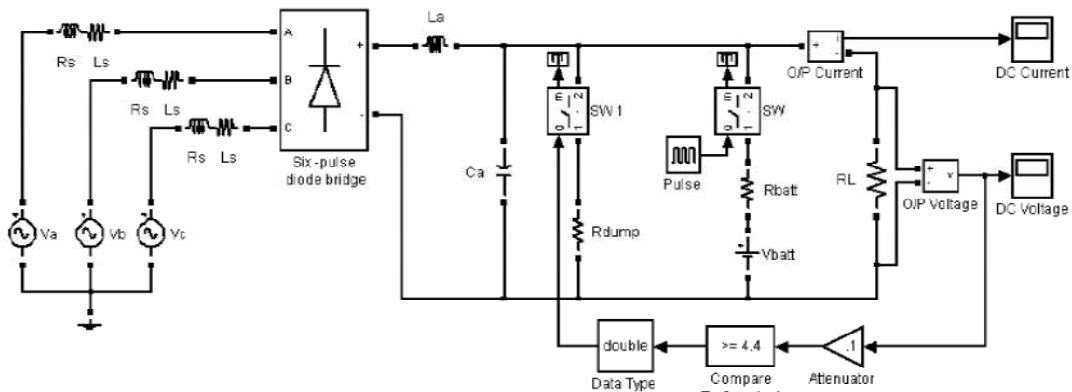


Figura 29 - Modelo implementado em Simulink para geração de $42V_{dc}$ (SHRUD et al., 2007)

Shrud et al. (2007) apresenta o comportamento simulado do alternador quando ligado a uma carga de 4kW e a uma bateria. A Figura 30 (gráfico superior) ilustra a tensão de saída retificada enquanto a Figura 30 (gráfico inferior) ilustra a corrente de carga. Pode-se observar que, no início do ciclo de simulação, a tensão de saída aumenta de aproximadamente $28V_{cc}$ para um valor ligeiramente superior a $44V_{cc}$, durante um intervalo de tempo de

aproximadamente 0,0015ms e apresenta um comportamento estacionário após aproximadamente 0,01ms, gerando 42Vcc na saída. Pelos resultados apresentados pelos autores, verifica-se que a resposta dinâmica da tensão e corrente de saídas é bastante rápida.

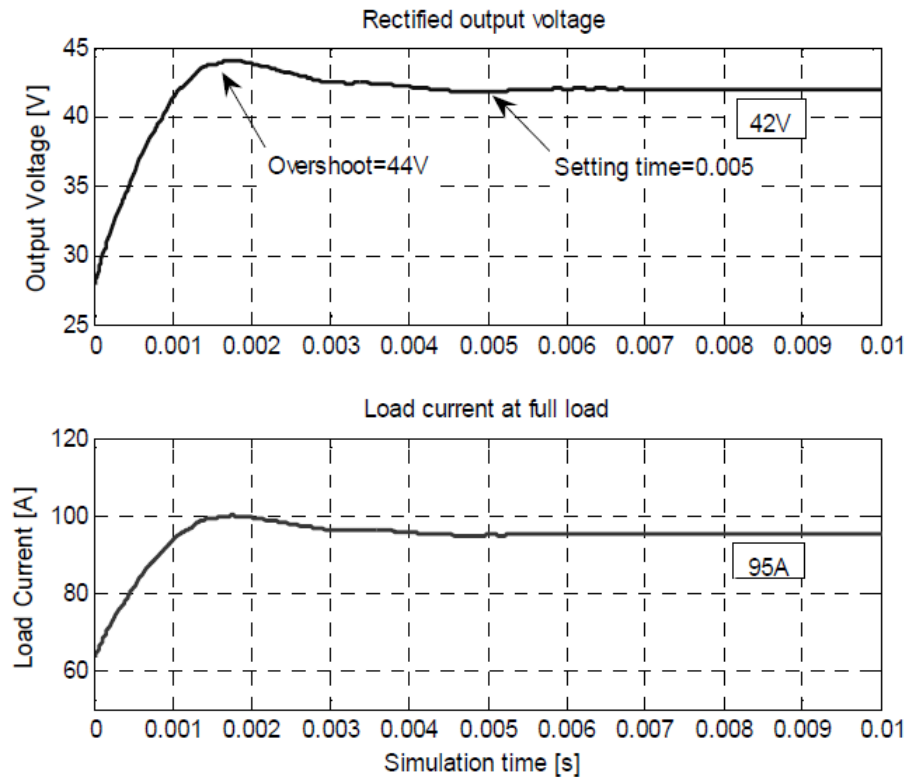


Figura 30 - Tensão de saída e corrente de carga simuladas (SHRUD et al., 2007)

Um parâmetro muito importante no estudo dos sistemas de geração de energia elétrica para uso veicular é a estabilidade da tensão em função da variação de cargas. Durante a operação normal do veículo, as cargas elétricas variam frequentemente em função das condições de condução, utilização diurna ou noturna, temperaturas ambientes, etc. Os resultados apresentados na Figura 31 mostram que, apesar da existência de um regulador automático de tensão, a tensão de saída apresenta uma queda significativa quando há um aumento da carga elétrica. Porém, essa variação observada não compromete o funcionamento dos dispositivos eletroeletrônicos existentes em um veículo. Nota-se também que há evidência do fenômeno da histerese e, novamente, se constata que o comportamento dinâmico da tensão gerada é bastante rápido, verificando-se ainda que uma alteração na carga produz efeito quase imediato na tensão gerada.

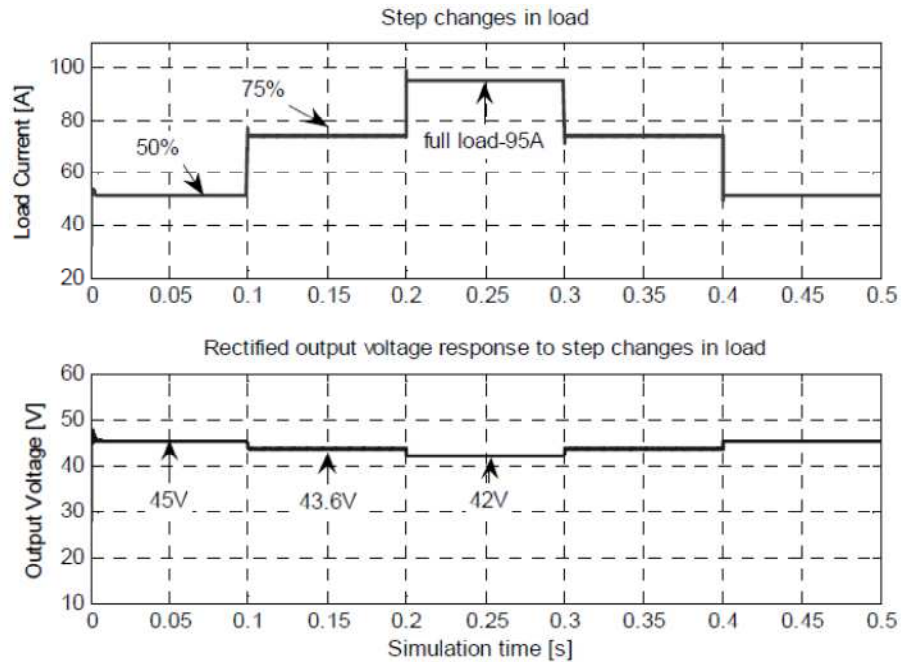


Figura 31 - Resposta dinâmica simulada em função de variações de carga (SHRUD et al., 2007)

Uma observação extremamente importante é que em todos os trabalhos estudados, os sistemas elétricos veiculares consideraram a existência de uma bateria conectada à saída do retificador. Certamente este fato contribui significativamente para a estabilidade da tensão gerada, uma vez que a bateria opera como um “reservatório” energético, filtrando as oscilações de tensão e fornecendo uma alta demanda de corrente para a saída, quando a carga assim exige.

Outra observação que merece destaque é que, nos trabalhos analisados, a rotação de acionamento dos geradores é considerada como constante. Ou seja, não foram encontrados resultados significativos ilustrando o comportamento dinâmico da tensão gerada em função da variação da frequência de acionamento dos geradores.

3.8 Lógica *fuzzy*

A aplicação dos sistemas de controle clássicos está vinculada a linearidade do sistema. Em muitos casos a não linearidade dos processos são fatores limitantes. O

comportamento dinâmico não linear do processo a ser controlado, não pode ser explorado pela aplicação do controle clássico, daí a possibilidade da aplicação da lógica *fuzzy*.

A estratégia de controle naturalmente utilizada pelo ser humano pode ser representada por relações condicionais *fuzzy*, que formam um conjunto de regras de decisão para a representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos.

Babuška e Verbruggen (2003) definem o modelo Mamdani como sendo um modelo que o antecedente (*if*) e a consequente (*then*) são proposições *fuzzy* (Equação 4).

$$R_i : \text{Se } x \text{ é } A_i \text{ então } y \text{ é } B_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad \text{Equação 4}$$

A_i e B_i são os termos linguísticos antecedente e conseqüente, representados por conjuntos em que K é o número de regras no modelo. A linguística no modelo *fuzzy* é útil para representar o conhecimento qualitativo. Quando entrada-saída de dados do sistema em estudo estão disponíveis, as funções de pertinência podem ser construídas ou ajustadas automaticamente.

O controle *fuzzy* utiliza-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever em uma rotina, a experiência humana, intuição e heurística, para controlar um processo (LEITE, 2007). A principal ideia dos algoritmos baseados na lógica *fuzzy* é imitar o raciocínio humano, para controlar processos de difícil modelagem fenomenológica ou de grande transitoriedade (PEREIRA FILHO, 1999). Serra (2005) considera que os sistemas de controle *fuzzy* são usados para formular o conhecimento humano, que por sua vez, podem ser classificados em duas categorias: o conhecimento objetivo, que é o conhecimento usado na formulação de problemas de engenharia definido por meio de equações matemáticas e o conhecimento subjetivo, que é o conhecimento que representa informações linguísticas (regras, informações do especialista, especificações de projeto), geralmente impossíveis de serem descritas de forma quantitativa.

Ainda segundo Serra (2005), a estrutura dos controladores *fuzzy* permite a modelagem de uma larga classe de sistemas dinâmicos. Além do que oferece maior flexibilidade no projeto de controle de alto desempenho, com certo grau de transparência. Isto

se deve às características de incorporar conhecimento do especialista humano, que facilita a interpretação e análise das regras do problema em questão, de forma qualitativa.

Barra Junior et al. (2005) entendem que, do ponto de vista prático, uma das principais justificativas para se utilizar um controlador inteligente, do tipo *fuzzy*, reside na possibilidade de se fazer uso de sua capacidade de generalização, ou seja, da capacidade do controlador em gerar um número de respostas que exceda ao repertório de respostas produzidas individualmente pelos controladores locais, armazenados na base. Se o projetista selecionar funções de pertinência que apresentem um grau de superposição demasiadamente reduzido, esta capacidade de generalização do controlador poderá ser drasticamente diminuída, o que implicaria na necessidade de se ter um número maior de controladores locais na base.

Garcia (2011) desenvolveu um sistema de controle *fuzzy*, em malha fechada, da taxa de aplicação de fertilizantes. Para isso desenvolveu um modelo matemático que representa o comportamento do mecanismo dosador, um sensor para medir o fluxo de fertilizante e, por fim, o projeto de um controlador do tipo *fuzzy* para controle da taxa de aplicação de fertilizantes. A Figura 32 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle desenvolvido.

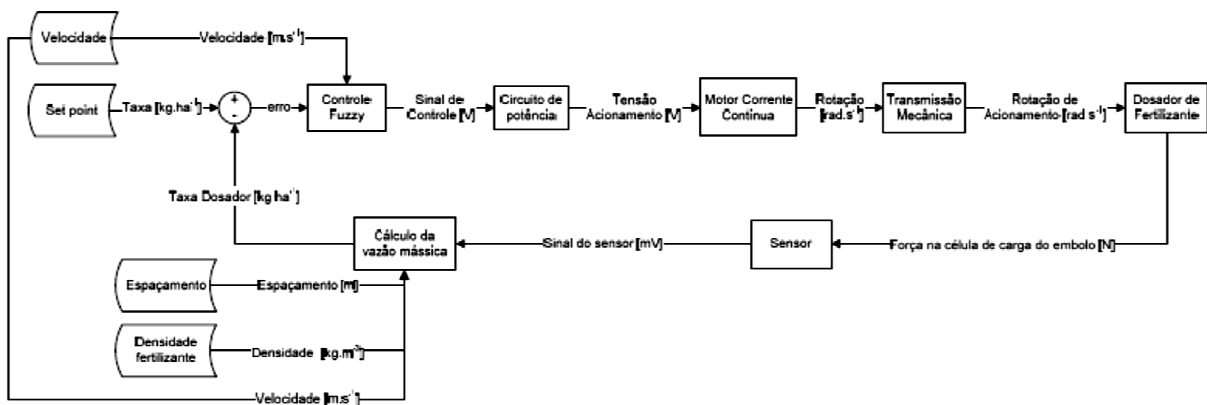


Figura 32 - Diagrama de blocos do sistema de controle desenvolvido por Garcia (2011)

Em seu trabalho, Garcia (2011) conclui que a simulação do sistema de controle se mostrou relevante para a configuração e melhoria da estratégia de controle proposta, uma vez que por meio das simulações podem-se alterar tais parâmetros e visualizar a influência de cada um destes no resultado final. O sistema de controle implementado foi capaz de reduzir a

característica oscilatória do mecanismo dosador, bem como acompanhar mudanças do ponto de operação ao longo do tempo.

Para Eminoğlu & Altaş (1998), os efeitos do número de regras empregadas em um sistema lógico de controle *fuzzy* aplicados às máquinas elétricas tornam-se mais evidentes para distúrbios superiores a $\pm 30\%$ e, portanto, as tabelas das regras de decisão dependem do sistema a ser controlado. Uma vez que as funções de pertinência são determinadas, elas devem satisfazer o funcionamento estável do sistema controlado.

Romanini (2009), em seu estudo aplicado a avicultura, conclui que o controle *fuzzy* é o mais adequado, para processos que apresentam não-linearidades e comportamento transiente, uma vez que descrevem numa rotina, a experiência humana para controlar o processo, propondo uma arquitetura de automação composta por um sistema de controle *fuzzy*, para proporcionar um controle mais preciso das variáveis de interesse na incubação.

Meneghetti (2009), em seu trabalho para a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de refrigeração, estudou a viabilidade da substituição de um sistema originalmente concebido para operar com velocidade angular fixa do compressor, por um sistema de velocidade angular variável. Como parte da definição da estratégia de controle foram realizadas simulações de modelos matemáticos com o objetivo de identificar a estratégia de controle mais adequada. Nas simulações foram implementados controle de temperatura liga-desliga, controlador PID e controle *fuzzy*. Os estudos apontaram que apenas o controle *fuzzy* obteve economia no consumo de energia elétrica, chegando a redução de 5,4% quando comparado aos demais.

Seyab e Cao (2007) desenvolveram um estudo para a identificação de um sistema não linear para controle preditivo de um processo de evaporação utilizando a tecnologia das redes neurais. Este trabalho demonstra a confiabilidade das redes neurais para controle de processo. Os resultados mostram que a escolha da forma de rede é muito importante para se obter um modelo com desempenho estável.

4 MATERIAL E MÉTODOS.

Na concepção deste projeto, considerou-se que o alternador, responsável pela geração de energia elétrica, seria montado no implemento e acoplado através de um sistema de polias e correias ou por uma caixa de transmissão, ao eixo da tomada de potência do trator agrícola. Para um trator com tomada de potência de $104,7 \text{ ad s}^{-1}$ (1000rpm), relação de transmissão deverá ser de 1:4, obtendo-se uma rotação nominal de 419 rad s^{-1} (4000rpm) no eixo do alternador.

A Figura 33 ilustra o acoplamento descrito, podendo-se observar (a), que o sistema proposto não impede o acoplamento de outros sistemas mecânicos, eventualmente presentes no implemento.

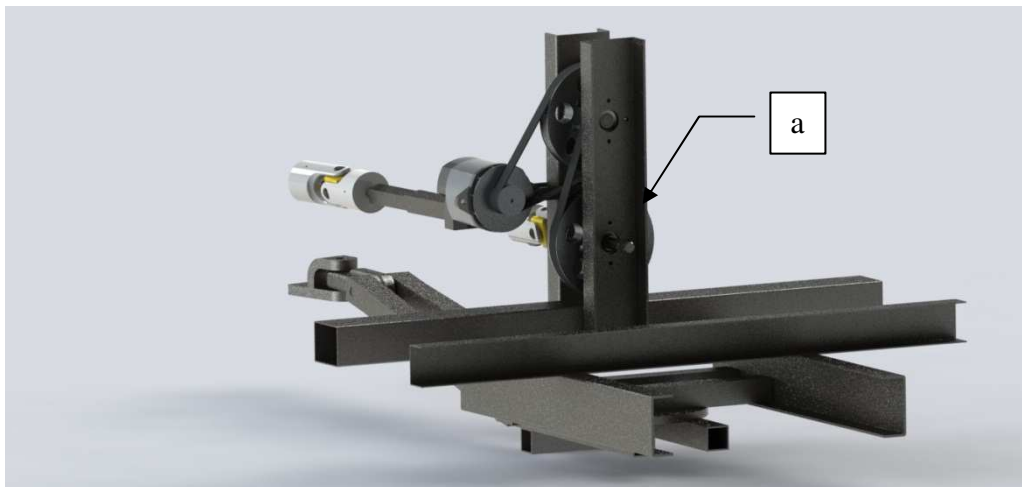


Figura 33 - Abstração sobre o sistema de acoplamento do alternador

A premissa básica do projeto é que o sistema de geração de energia elétrica deve ser capaz de manter constante a tensão gerada, por meio da atuação na corrente de excitação de campo do alternador, considerando-se distúrbios de potência elétrica – mediante variações da corrente de carga – e distúrbios na velocidade angular do eixo de acionamento do alternador, decorrentes da variação da rotação do motor do trator agrícola.

4.1 Bancada experimental

Foi utilizada uma bancada experimental da empresa Castell Motores Ltda para a realização de ensaios preliminares (Figura 34). Nesta bancada, as medições da corrente de saída, tensão gerada, temperatura ambiente e temperatura do estator do alternador, foram obtidas por meio de sucessivas leituras, com intervalo de 360s. Para isso, utilizou-se um amperímetro de painel, do tipo bobina móvel da marca Hartman&Brown, com fundo de escala de 150A, um voltímetro de painel da marca Hartman&Brown, com fundo de escala de 50Vcc, um tacômetro digital estroboscópico, marca Instrutherm, modelo ST-707, e um termômetro digital, marca Instrutherm, modelo TH 1300.

Nestes mesmos ensaios experimentais, para o levantamento do comportamento térmico do alternador, utilizou-se como carga um banco de resistências, com derivações comutáveis, ajustados para dissipar uma potência de 1,8kW, a uma velocidade angular de 400rad s^{-1} (3820rpm).

Para os ensaios foram utilizados: um motor propulsor de corrente contínua, do tipo campo-série, de 6kW de potência; um banco de baterias tracionárias, do tipo chumbo-ácida, com tensão nominal de 24Vcc, na condição descarregada (densidade da solução ácida em 1150g l^{-1}) e com capacidade de 375Ah, atuando como carga. Nestas condições, o sistema de controle da corrente de excitação (do tipo liga-desliga) opera constantemente na condição ligado, uma vez que a tensão de saída permanece inferior a 29,5Vcc, que é a tensão de comparação do controlador da corrente de excitação. Isto garante a máxima corrente de saída em função da velocidade angular do eixo do alternador.



Figura 34 - Bancada de ensaios de alternadores da empresa Castell

Outra bancada experimental, mais aperfeiçoada, foi desenvolvida para a realização dos demais ensaios. Esta bancada possui a capacidade de simular as variações na velocidade angular no eixo do alternador e as variações das cargas elétricas acopladas, possibilitando o estudo do comportamento dinâmico da tensão gerada. Nesta bancada, foi incorporada uma balança de torque, para a medição do torque de acionamento do alternador, com o objetivo de se determinar o rendimento do mesmo.

Para a aquisição e controle dos sinais relativos à tensão, carga elétrica, velocidade angular e corrente de excitação da bancada, utilizou-se a plataforma LabVIEW da National Instruments® na versão 8.5 em conjunto com o hardware de aquisição, modelo NI USB 6009, do mesmo fabricante. A Figura 35 ilustra os principais componentes da bancada de testes desenvolvida.

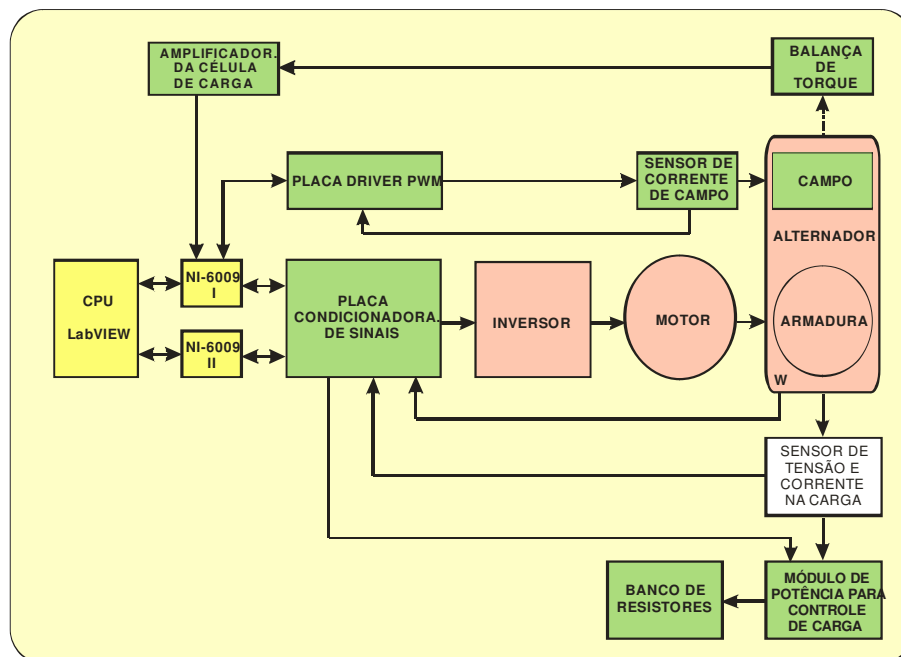


Figura 35 - Diagrama de blocos da bancada de testes

A velocidade angular aplicada ao eixo do alternador foi monitorada por intermédio da saída “W” do alternador. Esta saída é normalmente utilizada para enviar pulsos elétricos aos conta-giros que equipam veículos movidos a diesel e disponibiliza um sinal de tensão, em corrente alternada, antes da ponte retificadora. A frequência deste sinal é diretamente proporcional à velocidade angular do eixo e ao número de pares de polos do alternador.

Para simular as cargas elétricas, utilizou-se um conjunto de resistência, acopladas ao sistema por um módulo transistorizado, capaz de controlar a corrente por meio de um sinal PWM. Com o uso deste dispositivo, pode-se variar a carga elétrica acoplada ao alternador, por meio de um sinal de comando proveniente de um programa de aquisição e controle, elaborado na plataforma LabVIEW.

A velocidade angular de acionamento do alternador pode ser variada por meio do programa desenvolvido em LabVIEW. O aplicativo fornece um sinal de saída analógico, para ser usado como sinal de atuação no inversor de frequência que por sua vez controla a velocidade angular do motor de indução que aciona o alternador.

A tensão gerada, após ser atenuada na razão de dez vezes pela Placa Condicionadora de Sinais (PCS), foi aplicada à entrada analógica 0 (AI-0), terminal 2 do primeiro módulo NI-

6009, que foi configurada para ler sinais analógicos entre 0 e 5Vcc, com aquisição selecionada tipo “*on demand*”, o que possibilita uma taxa de aproximadamente 350 leituras por segundo. O valor da tensão gerada foi disponibilizado na tela supervisorio e na forma de uma planilha no formato Excel.

A corrente elétrica gerada pelo alternador foi monitorada por intermédio de um resistor *shunt*, calibrado para fornecer uma tensão de 60mV quando submetido a uma corrente de 150A. Este sinal, relativo à carga, foi enviado à PCS para ser amplificado, de modo que uma corrente de 150A corresponda a uma tensão de 5Vcc, para então ser enviada à entrada analógica 1 (AI-1), terminal 5 do primeiro módulo NI USB 6009, configurada para ler sinais analógicos entre 0 e 5 Vcc, com aquisição selecionada tipo “*on demand*”.

O sinal relativo à velocidade angular aplicada ao eixo do alternador foi do tipo tensão alternada e foi coletado na saída “W” do mesmo. O sinal gerado foi aplicado à PCS para que seja convertido da forma senoidal para a forma quadrática, para então ser aplicado ao conversor frequência/tensão, que fornece de 0 a 5Vcc, para uma variação da velocidade angular de 0 a 500rad s⁻¹ (4775rpm). Esta tensão foi aplicada à entrada analógica 2 (AI-2), terminal 8 do primeiro módulo NI USB 6009, configurada para ler sinais analógicos entre 0 e 5Vcc, com aquisição selecionada tipo “*on demand*”.

A leitura da corrente de excitação foi realizada por intermédio de um resistor do tipo *shunt*, localizado no Módulo Driver de Controle da Corrente de Excitação (MDCCE), ligado em série com a bobina de excitação do campo. Este sinal foi amplificado no próprio MDCCE para se obter um sinal de saída que varie de 0 a 5Vcc, quando submetido a uma variação na corrente de excitação de 0 a 5A. Em seguida este sinal foi enviado para a entrada analógica 3 (AI-3), terminal 11 do primeiro módulo NI USB 6009, configurada para ler sinais analógicos entre 0 e 5Vcc, com aquisição selecionada tipo “*on demand*”.

Os sinais de controle da velocidade angular, carga e corrente de excitação são gerados nos módulos NI USB 6009, a partir do software de controle. Esses sinais são do tipo analógico, com níveis de tensão variáveis entre 0 e 5Vcc.

O sinal de comando velocidade angular, disponibilizado na saída analógica 0 (AO-0), terminal 14 do primeiro módulo NI USB 6009, foi enviado à PCS para ser amplificado, com um ganho dois (gerando um sinal de 0 a 10Vcc), para então ser aplicado como referência de

rotação ao inversor de frequência, que por sua vez alimenta o motor de indução trifásico, que aciona o alternador.

O sinal de comando da carga elétrica, disponibilizado na saída analógica 1 (AO-1), terminal 15 do primeiro módulo NI USB 6009, foi enviado à PCS para ser convertido em um sinal PWM. Este sinal foi enviado para o Módulo de Potência para Controle da Carga (MPCC), que controlará a corrente aplicada ao banco de resistores conforme o sinal de atuação.

4.2 Adaptação de um alternador veicular

Os implementos agrícolas necessitam de inúmeros acionamentos que, em sua maioria, demandam pequenas potências para os acionamentos rotativos e lineares. Dentre esses implementos, podem-se citar os dosadores de fertilizantes como um dos que mais demandam acionamentos rotativos. Esses equipamentos possuem aproximadamente vinte e uma linhas de aplicação que, segundo Garcia (2011), em seu estudo para desenvolvimento de dosadores helicoidais de fertilizantes, quando projetados para acionamento elétrico, utilizam motores elétricos de 144W. Considerando-se a condição de operação de 58% da potência nominal, resulta uma potência total para os acionamentos das vinte e uma linhas de 1,76kW, que devem ser somada à potência consumida pelo módulo eletrônico de controle que, na maioria dos equipamentos é inferior a 100W. Buscou-se um alternador capaz de fornecer uma potência nominal superior a 2kW, com tensão nominal de saída de 24Vcc, em corrente contínua, apto para operar em ambiente agrícola.

A escolha da tensão de operação em 24Vcc, deve-se ao fato de que os dispositivos eletrônicos de controle e aplicação, comercialmente disponíveis, operam com esse nível de tensão. Para se auferir maior confiabilidade e menor frequência de manutenção, utilizou-se um alternador do tipo sem escovas (*brushless*). Com base nas especificações anteriormente descritas, buscou-se no mercado nacional um alternador adequado para esse tipo de operação.

Para atender a estas especificações foi escolhido o alternador marca Castell, modelo C0024120, com capacidade de gerar 2,4kW, em 24Vcc. Com a finalidade de melhorar o sistema original de refrigeração do alternador, foi usinada uma galeria para a passagem do ar

fresco entre o estator e a carcaça externa, evitando, assim, que o ar contaminado com poeira, comum no ambiente agrícola, afetasse o enrolamento elétrico do alternador.

Originalmente, o alternador operava com controle do tipo liga-desliga para a corrente de excitação, sendo o mesmo modificado para suportar o modo de operação comandado por sinal PWM. Para tanto, foi isolada a ligação dos terminais da bobina de campo e disponibilizando-se os terminais da mesma diretamente a um conector, para possibilitar a ligação de um controle externo do campo.

4.3 Determinação do modelo matemático experimental em malha aberta

Para a determinação do modelo matemático de ordem zero foi utilizado um planejamento experimental fatorial composto central 2^3 . As variáveis independentes, ou fatores, escolhidas nesta análise foram: corrente de carga (X_{CA}), velocidade angular do eixo do alternador (X_{VA}) e corrente de excitação de campo do rotor do alternador (X_{EX}), enquanto que a variável dependente, ou resposta, foi a tensão gerada pelo alternador (Y_{TE}), após retificação (corrente contínua). A Figura 36 apresenta o diagrama de blocos do modelo proposto para o alternador.

A resposta dinâmica de um sistema análogo, estudado por Shrud et al. (2007), mostrou que a resposta transitória da tensão gerada, frente a um distúrbio de corrente de carga é muito rápida e pode, neste caso, ser desprezada para propósitos práticos.

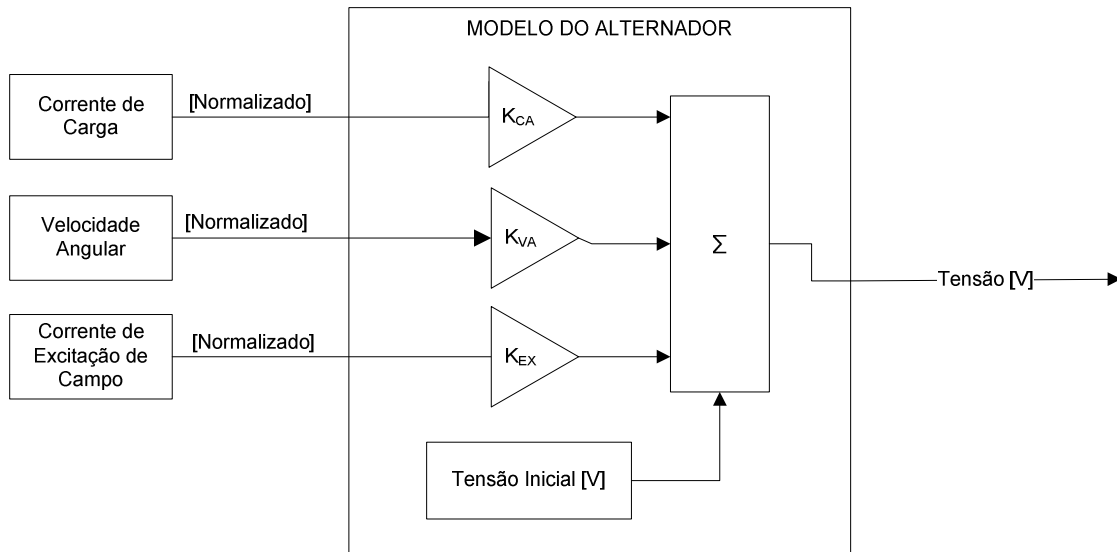


Figura 36 - Diagrama de blocos do modelo do alternador

Segundo OGATA (2006), para sistemas ditos lineares, pode-se aplicar o princípio da superposição, onde a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções diversas é a soma das duas respostas individuais. Então, para um sistema linear, a resposta a diversas entradas pode ser calculada tratando-se uma entrada de cada vez e somando-se os resultados.

O planejamento experimental fatorial proposto estipula oito ensaios, variando-se concomitantemente as grandezas estudadas. Este planejamento requer variação em dois níveis (nível -1 e nível +1) para cada variável. Estes pontos fatoriais são utilizados para avaliar os efeitos das variáveis independentes. Para um planejamento completo deve-se ainda avaliar o erro puro, incluindo então, mais cinco ensaios como repetições do ponto central (nível 0), responsáveis pela avaliação do erro aleatório. Além disso, foram utilizados os rotacionados para cada variável (nível -1,682 e nível +1,682). Neste caso, o número total foi de 19 ensaios. Tabela 1 apresenta os níveis e valores absolutos dos fatores para o planejamento central composto utilizado. Nela pode-se observar que os níveis 1e 1,682 representam variações de 10% e 16,82% em torno dos valores adotados de 60A para a carga, 419rad s⁻¹ para a velocidade angular e 2A para a corrente de excitação. A Tabela 2 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial 2³, com suas variáveis independentes codificadas.

Tabela 1 - Níveis e valores absolutos dos fatores do planejamento central composto

Valores	X_{CA} [A]					X_{VA} [rad s ⁻¹]					X_{EX} [A]				
Níveis	-1,68	-1	0	+1	+1,68	-1,68	-1	0	+1	+1,68	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Absolutos	49,9	54	60	66	70	394	404	419	433	443	1,66	1,8	2	2,2	2,34

Tabela 2 - Planejamento experimental fatorial composto central 2³, para obtenção do modelo matemático do alternador

Ensaio	X_{CA}	X_{VA}	X_{EX}
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1
9	-1,682	0	0
10	+1,682	0	0
11	0	-1,682	0
12	0	+1,682	0
13	0	0	-1,682
14	0	0	+1,682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0

Os níveis das variáveis dependentes foram determinados a partir das características e limitações impostas pelo alternador utilizado.

O planejamento composto central com três variáveis permite a obtenção de um modelo linear. Contudo, há situações onde o modelo linear não descreve adequadamente o modelo estudado, com isso, torna-se necessário realizar um modelo experimental do tipo quadrático, conforme se observa na Equação 5. Neste estudo, o modelo quadrático foi obtido

utilizando-se o programa estatístico Statistica 7.0. Durante a obtenção do modelo, verificaram-se quais variáveis foram significativas para o modelo, sendo que, as variáveis não significantes foram excluídas do modelo final.

$$Y(X_{CA}, X_{VA}, X_{EX}) = X_{CA}^2 + X_{VA}^2 + X_{EX}^2 + X_{CA} + X_{VA} + X_{EX} + X_{CA} \cdot X_{VA} + X_{CA} \cdot X_{EX} + X_{VA} \cdot X_{CA} \quad \text{Equação 5}$$

Com o modelo proposto foi possível montar a tabela de análise de variância, que dá informações sobre quão adequado foi o ajuste. A Tabela 3 apresenta as equações utilizadas para a análise da variância para o ajuste do modelo encontrado.

Tabela 3 - Análise da variância para o ajuste do modelo linear, pelo método de mínimos quadrados, sendo: n_i = número de repetições no nível i ; m = número de níveis distintos da variável independente; $n = \sum n_i$ = número total de observações; p = número de parâmetros do modelo

Fonte de Variação	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = \frac{SQ_R}{p - 1}$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = \frac{SQ_r}{n - p}$
Falta de ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = \frac{SQ_{faj}}{m - p}$
Erro puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = \frac{SQ_{ep}}{n - m}$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	
% de variação explicada			$\frac{SQ_R}{SQ_T}$
% de variação explicável			$\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T}$

A validação do modelo experimental foi realizada por meio de análise de variância, análise dos resíduos da estimativa e pelo coeficiente de determinação do modelo. O método utilizado para avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo foi a avaliação do coeficiente de determinação.

A análise foi realizada pelo cálculo da estatística “F” considerando-se a razão entre a média quadrática da regressão MQ_R , e a média quadrática dos resíduos MQ_r . A estatística “F” calculada foi comparada com a tabelada para os graus de liberdade de MQ_R e de MQ_r , adotado um nível de significância estatística. Se for verificado que “F” calculado é maior que “F” tabelado. Desta forma, tem-se a evidência estatística suficiente para admitir a existência de uma relação entre as variáveis. Segundo Barros Neto et al. (2002), quanto maior for o “F” calculado em relação ao “F” tabelado, melhor será a evidência estatística. Como regra prática, para fins de previsão, o valor de “F” calculado deve ser pelo menos cerca de 10 vezes o valor de “F” tabelado.

Posteriormente, foram realizados testes experimentais para a validação do modelo obtido. Nestes testes foram escolhidos, de maneira aleatória, 10 combinações de valores das três variáveis independentes. Nos testes, aplicou-se como entrada cada uma das 10 combinações e observou-se a resposta do sistema em cada um dos casos. Para o cálculo do desvio relativo médio, em função da variação dos sinais de entrada, utilizou-se a Equação 6.

$$DRM = 100 \frac{|Y_E - Y_M|}{Y_E} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

DMR : desvio médio relativo [%];

Y_E : tensão gerada obtida experimentalmente [V];

Y_M : tensão obtida por meio do modelo proposto [V].

A partir dos dados obtidos pelos ensaios na bancada de testes, obtiveram-se os parâmetros do modelo matemático do alternador. O levantamento da função de transferência representativa do sistema de geração é de fundamental importância para a análise do sistema, pois ela possibilita realizar simulações do comportamento da tensão de saída do alternador,

frente aos distúrbios causados pelas variações na carga e na velocidade angular no eixo de acionamento.

4.4 Projeto do controlador *fuzzy*

Optou-se pela implementação de um sistema *fuzzy* de controle, dado que o conjunto proposto é um sistema com múltiplas entradas (velocidade angular, erro de tensão e corrente de carga) e uma saída (corrente de excitação de campo), do inglês (MISO – *Multiple Inputs – Single Output*), o que inviabiliza o uso de um sistema PID convencional.

A lógica de controle *fuzzy*, para a implementação de um controlador da tensão de saída do alternador, frente às variações da carga e da velocidade angular no eixo, foi implementada no programa MATLAB. As informações de erro de tensão, velocidade angular e carga, foram normalizadas para serem usadas como entradas do controlador *fuzzy*. A arquitetura do controlador considerou como variável manipulada a corrente de excitação do campo e a estratégia de atuação foi do tipo Proporcional-Integral (PI), conforme mostrado na Figura 37.

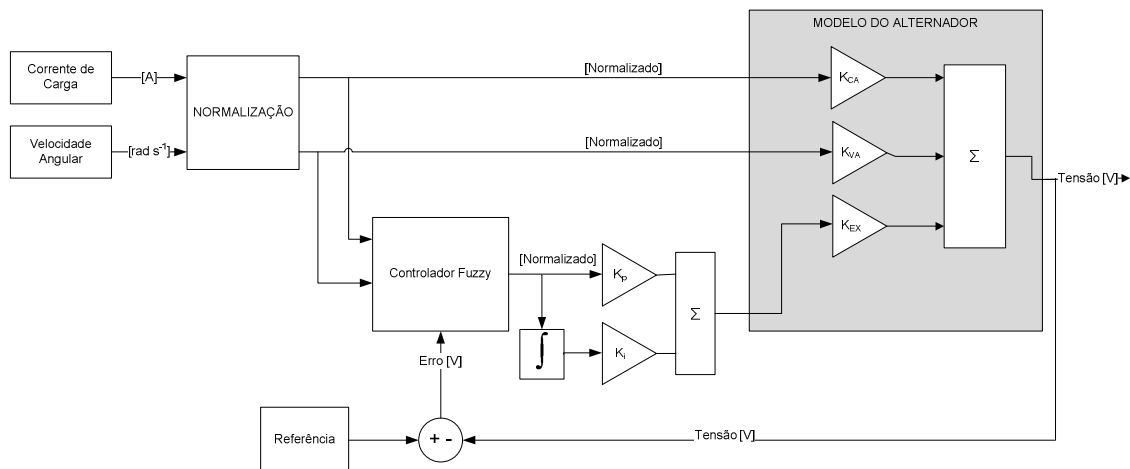


Figura 37 - Diagrama de blocos do sistema de controle *fuzzy* proposto

Com o objetivo de buscar uma lógica de controle que possa garantir que a tensão de saída do alternador mantenha-se dentro dos limites toleráveis (23,0 a 29,5Vcc), como os verificados quando o mesmo opera conectado ao banco de baterias, e que ao mesmo tempo,

possibilite uma melhor resposta do sistema quando submetido a variações bruscas na carga aplicada, no sentido de manter a tensão de saída o mais próximo possível do centro da faixa, optou-se pela utilização da lógica *fuzzy*. Um sistema de controle *fuzzy*, como parte dos chamados sistemas inteligentes, é capaz de fornecer respostas apropriadas a situações específicas do problema, em função de uma determinada entrada.

Apesar de existir uma vasta literatura sobre máquinas síncronas, com modelos matemáticos validados de forma robusta, a quase totalidade desses modelos foi ajustada para máquinas de grande porte, e não foram encontrados estudos na literatura corrente relativos às máquinas de pequeno porte, especificamente na forma de um alternador automotivo. Desta forma, estabeleceu-se uma implicação *fuzzy* entre as variáveis de entrada; erro da tensão, corrente de carga e velocidade angular e a variável de controle, denominada corrente de excitação. A Figura 38 ilustra o sistema proposto.

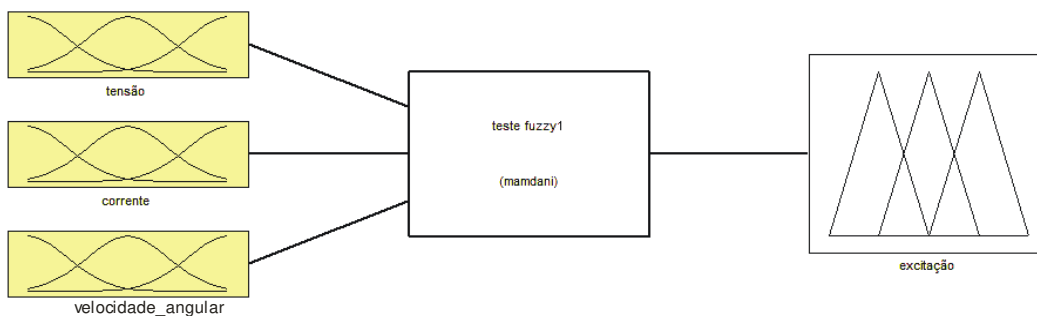


Figura 38 - Estrutura do sistema *fuzzy* utilizado para controle da corrente de excitação

O desenvolvimento do projeto *fuzzy*, anteriormente citado, considerou a proposição de Mamdani. O modelo dos controladores desenvolvidos foi baseado em regras linguísticas, condição que permitiu a incorporação das informações disponibilizadas na base de conhecimento do processo, de forma similar ao pensamento humano.

Na sequência, ocorreu a definição dos conjuntos *fuzzy*, pela determinação das funções de pertinência correspondentes ao intervalo, que os valores das variáveis de entrada e saída do sistema poderiam assumir. O passo seguinte consistiu na escolha do tipo apropriado de operação do sistema de controle *fuzzy*, especificamente da aplicação dos conectivos lógicos e dos operadores de implicação, além da definição de um conjunto de regras. A base de conhecimento do sistema *fuzzy* utilizado foi estabelecida por meio do uso do conhecimento

prévio, que se obteve do modelo obtido experimentalmente e, de forma complementar, com conhecimento especialista.

O método de defuzzificação utilizado no controlador foi o do centro de gravidade, devido principalmente à sua propriedade em fornecer saída *fuzzy* que provoque ações de controle que venham a manter a tensão de saída dentro dos limites toleráveis.

Por se tratar de uma tarefa complexa, devido aos múltiplos ajustes simultâneos necessários, o conjunto de regras do sistema de controle *fuzzy* foi desenvolvido baseado no conhecimento especialista.

À medida que foi identificado um desempenho insatisfatório no controle da tensão gerada, as regras foram alteradas com a finalidade de adequá-lo aos requisitos de operação. Cada alteração provocada na configuração dos controladores foi seguida por uma simulação, para se observar do novo comportamento do processo, frente ao novo conjunto de regras considerado.

4.5 Implementação do controlador *fuzzy*

A implementação do controlador *fuzzy*, para ser utilizado em conjunto com a bancada experimental, foi realizada utilizando-se a ferramenta *Fuzzy System Designer*, versão 2010, da National Instruments. Esta ferramenta permitiu criar as variáveis linguísticas, a base de regras e especificar o método de defuzzificação. Com isto foi possível montar a estratégia de controle conforme projetada no MatLab.

Foram consideradas cinco variáveis linguísticas (muito alto, alto, zero, baixo e muito baixo) para cada variável de entrada (corrente de carga, velocidade angular e erro da tensão), como apresentado na Figura 39.

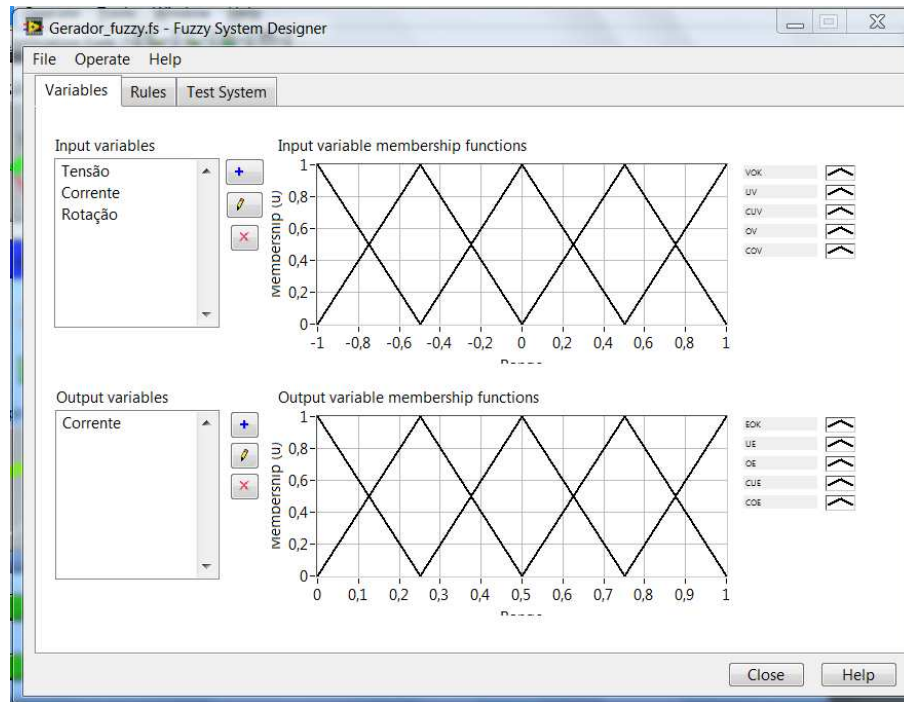


Figura 39 - Tela de configuração da ferramenta *Fuzzy System Designer*

Foram utilizadas 125 regras, abrangendo todas as combinações das funções de pertinências (5^3) para as três entradas consideradas. Para a determinação do valor da variável de saída (corrente de excitação de campo) foi utilizado o método centroide de defuzzificação.

O resultado obtido com a ferramenta *Fuzzy System Designer* foi utilizado em um aplicativo desenvolvido em LabVIEW, versão 2010, para interação com a bancada experimental, conforme Figura 40.

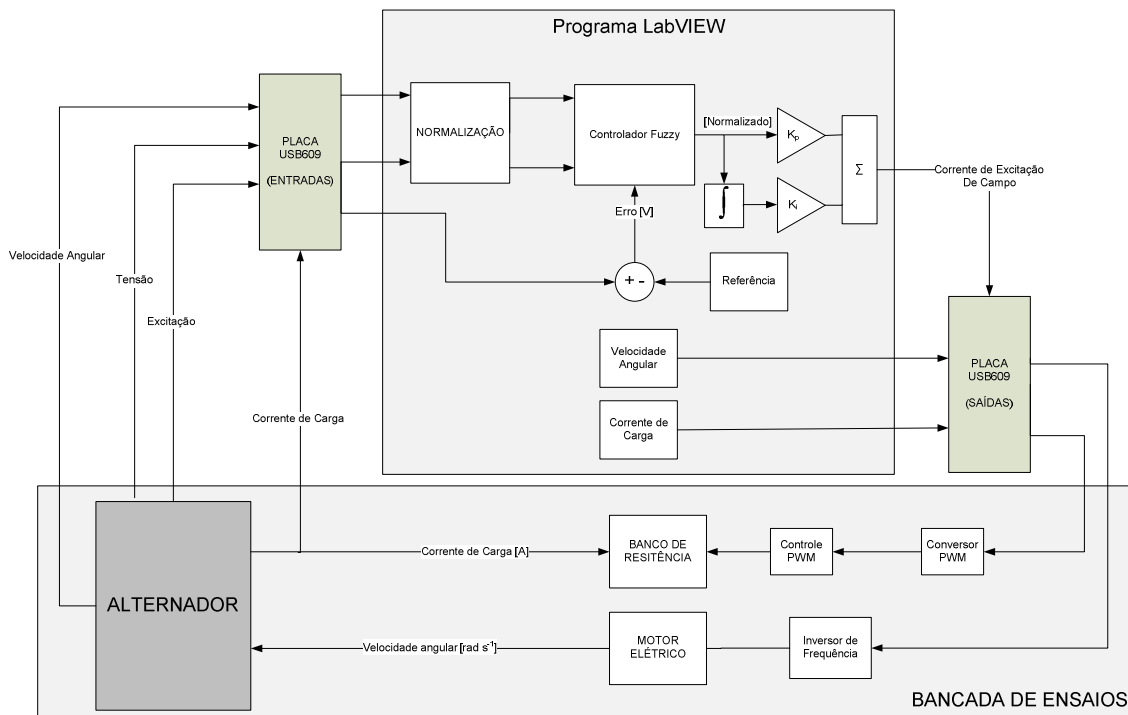


Figura 40 - Diagrama de blocos do sistema de controle de tensão de saída do alternador

4.6 Avaliação de desempenho do controlador *fuzzy*

A avaliação do sistema de controle *fuzzy* do alternador foi realizada mediante a aplicação de sinais de distúrbio de velocidade angular e de corrente de carga estabelecidos e comparados com o desempenho do controlador liga-desliga, sob as mesmas condições experimentais.

Os distúrbios de carga foram realizados mediante a aplicação de sinais do tipo degrau e rampa, e o distúrbio de velocidade angular, mediante um sinal senoidal (Figura 41). Os distúrbios do tipo degrau (Figura 41a) foram aplicados com seguintes amplitudes: 90% a 75%, 90% a 50% e de 90% a 0, para a faixa considerada de corrente de carga do modelo (54 a 66A). Por sua vez, os distúrbios de rampa (Figura 41b), com taxa de 2 A s^{-1} , foram realizados em duas etapas, com correntes entre 54 e 60A e entre 60 e 66A.

O distúrbio de velocidade considerado foi do tipo senoidal (Figura 41c), com frequência de 0,15Hz e amplitude de 7% em torno do valor nominal de $418,9\text{ rad s}^{-1}$

(4000rpm), ou seja, $14,7\text{rad s}^{-1}$ (3,5%) acima e abaixo do valor nominal, considerando a faixa de variação de velocidade angular do motor, normalmente encontrada em operações agrícolas.

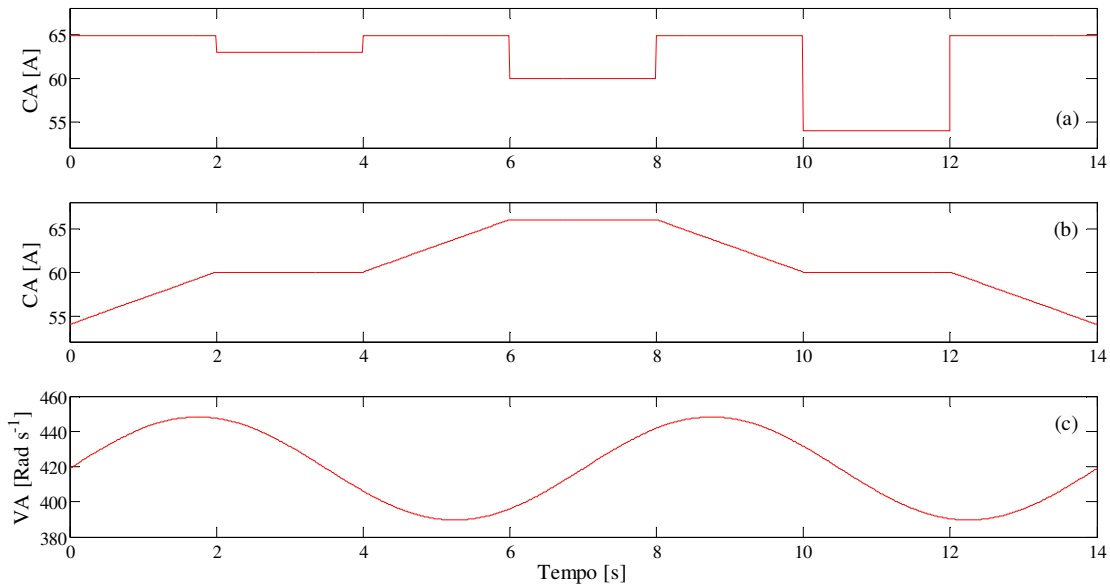


Figura 41 - Formas de onda dos sinais de teste utilizados para a avaliação de desempenho do controlador *fuzzy*:
 (a) degraus de corrente de carga; (b) rampas de corrente de carga; (c) sinal senoidal de velocidade angular do alternador

Os métodos utilizados para a avaliação do desempenho de um controlador foram: integral do erro, variabilidade (dobro do desvio padrão do erro dividido pela média da variável do processo), a variância na saída do controlador, percentual do tempo fora do modo automático, percentual do tempo com o controle saturado.

No método Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (ITAE), o erro absoluto é ponderado pelo tempo, implicando para um erro inicial, que geralmente é grande, em uma pequena ponderação, enquanto que para um erro que ocorre num tempo maior, o índice é mais penalizado. Define-se o ITAE matematicamente pela Equação 7.

$$I_{ITAE} = \int_0^n t|e(t)|dt \quad \text{Equação 7}$$

O método da Integral do Erro Quadrático (ISE) gera ponderações proporcionais para erros maiores e menores. Matematicamente obtém-se o ISE a partir da Equação 8.

$$I_{ISE} = \int_0^n e^2(t) dt \quad \text{Equação 8}$$

O índice Integral Absoluta do Erro (IAE) utiliza o módulo do erro, sendo muito utilizado em simulações, sendo de fácil implementação prática, podendo ser determinado pela Equação 9.

$$I_{ISE} = \int_0^n |e(t)| dt \quad \text{Equação 9}$$

O índice Média do Erro Quadrático (MSE) reflete todas as variações e desvios em relação à referência, sendo matematicamente definido Equação 10.

$$I_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (e(t)^2) \quad \text{Equação 10}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Bancada de testes desenvolvida

A Figura 42 mostra a bancada de testes desenvolvida. Utilizou-se em toda a estrutura, perfilados de aço quadrados de 50mm de seção (a), para garantir rigidez ao conjunto. Uma plataforma móvel suporta o motor elétrico (b) e possibilita o ajuste da tração da correia (c), que transmite potência para o alternador (d). Para simular a velocidade angular no ponto da tomada de potência e o conjunto de polias multiplicadoras de velocidade angular, foram utilizados um motor de indução trifásico, marca Kohlbach, com potência de 3,68kW (5cv), com dois pares de polos e velocidade angular de $182,73\text{rad s}^{-1}$ (1745rpm), acionado por um inversor de frequência WEG (e), modelo CFW-08, capaz de uma variação na frequência de 3 a 90Hz. O motor foi acoplado ao eixo do alternador por um par de polias com diâmetros de 170mm e 75mm no motor e alternador respectivamente, perfazendo uma relação de multiplicação de 1:2,27. Isto possibilita uma velocidade angular máxima de 622rad s^{-1} (5940rpm) no alternador, o que ocorre quando o motor elétrico de acionamento é alimentado com uma frequência de 90Hz. Observa-se que neste regime de rotação do alternador a corrente gerada atinge um patamar onde não há mais incrementos significativos na corrente gerada em função do aumento da velocidade angular.

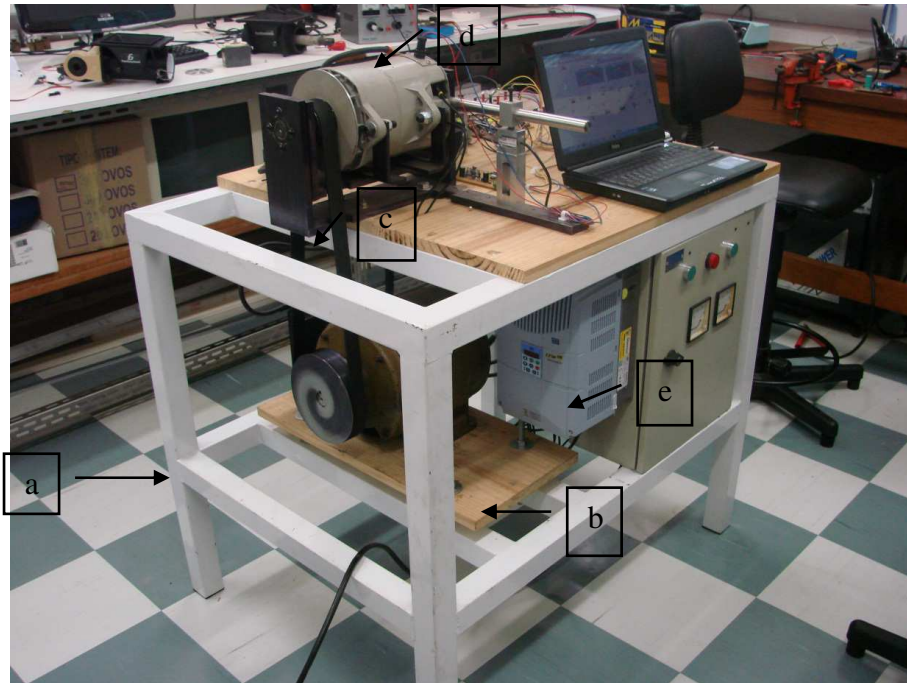


Figura 42 - Bancada de testes desenvolvida.

O alternador foi fixado ao conjunto de acionamento por meio de um berço móvel, ancorado por um braço de aço carbono, de comprimento variável (ajustado nos testes para 200mm) entre o centro de giro e o ponto de aplicação de força. Neste ponto de aplicação de força foi instalada uma célula de carga do tipo “S”, marca R&S, modelo SB, capacidade de 49,05N (5,0kgf) e sensibilidade $1,9989\text{mV V}^{-1}$, permitindo a medição do torque mecânico aplicado ao alternador. A Figura 43 mostra o mecanismo para a medição do torque mecânico aplicado ao eixo do alternador (no detalhe apenas o alternador utilizado).

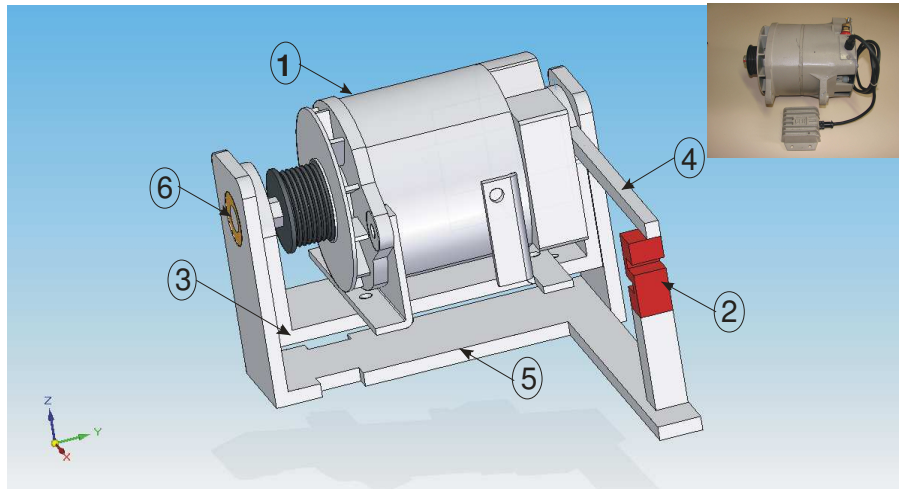


Figura 43 - Projeto da balança de torque desenvolvida: (1) alternador CEN; (2) célula de carga R&S; (3) berço móvel da balança; (4) braço de força; (5) base de fixação e (6) rolamento axial

O sinal obtido pela célula de carga foi condicionado por um amplificador diferencial para instrumentação (INA122), desenvolvido pela Burr-Brown, com ganho de 500 vezes, ajustado para fornecer um sinal de saída que varia de 0 a 5Vcc, para uma variação de 0 a 50N na força aplicada à célula de carga. A Figura 44 ilustra o circuito eletrônico utilizado para amplificar o sinal da célula de carga.

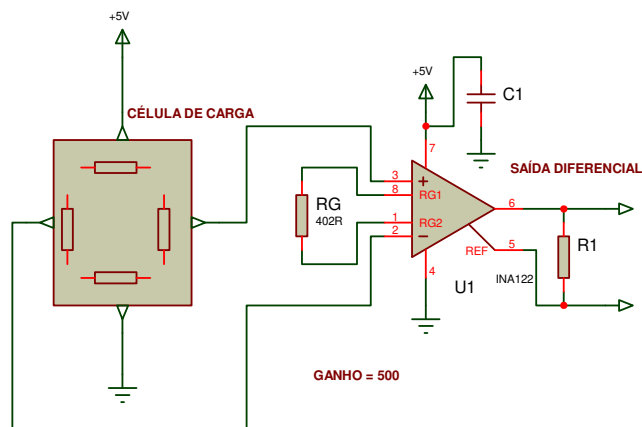


Figura 44 - Circuito amplificador da célula de carga

A calibração do torque foi obtida com a aplicação de pesos aferidos diretamente no ponto de apoio do braço da balança. Desta forma, ajustou-se o ganho do sistema de aquisição

de forma a se indicar o valor torque, uma vez que o braço de aplicação de força tem o comprimento constante.

Na bancada desenvolvida, a tensão gerada foi aplicada em um conjunto de resistências, com capacidade de dissipação de 5kW, operando sob ventilação forçada, por intermédio de um controlador eletrônico de carga comandado por sinal do tipo PWM, dimensionado para uma corrente máxima de 400A. Desta forma, uma carga resistiva controlada foi aplicada ao alternador, conforme um sinal externo de referência de controle. A Figura 45 ilustra o banco de resistências de carga, podendo-se observar o sistema de ventilação forçada para facilitar a dissipação do calor gerado.

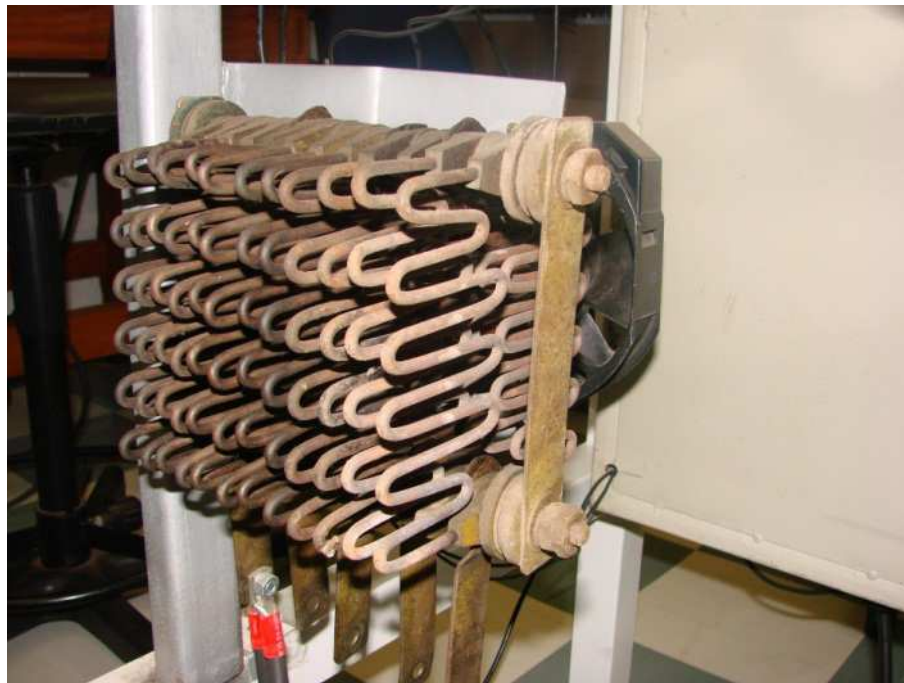


Figura 45 - Banco de resistores para dissipação de energia

A Figura 46 ilustra o circuito eletrônico do Módulo de Potência para Controle da Carga (MPCC) desenvolvido. Nela pode-se observar que foram utilizados transistores de efeito de campo (MOSFETs), da família IRFZ44, com capacidade para 48A cada. Desta forma, o circuito pode suportar, com um conjunto de 20 transistores, transientes de até 980A. Para garantir uma corrente de disparo que possibilite uma rápida comutação dos transistores, foi utilizado o circuito integrado IR2110 (*gate driver*). Os dois grupos de diodos de comutação rápida 15ETH06 possibilitam que esse circuito possa trabalhar com cargas resistivas e ou

indutivas. O circuito do Módulo de Potência foi acondicionado em um gabinete de alumínio aletado, para melhor dissipação de calor.

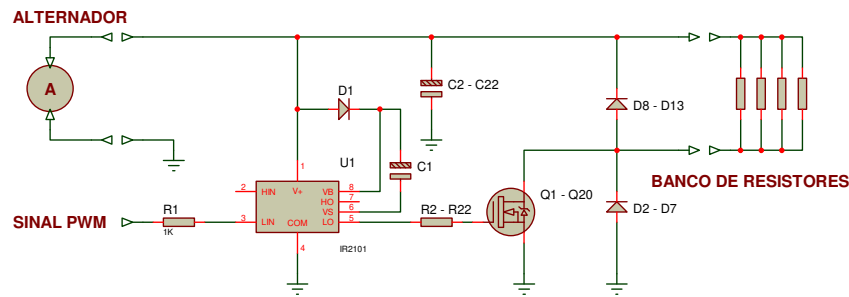


Figura 46 - Circuito eletrônico do Módulo de Potência para o Controle da Carga

A Placa Condicionadora de Sinais (PCS), desenvolvida para a bancada de testes, tem por finalidade adequar os sinais de comando e leitura de carga e velocidade angular para serem enviados ao sistema de aquisição de dados. Ela é composta por um circuito conversor do sinal de controle da carga, circuito amplificador do sinal de referência de velocidade angular e o circuito condicionador do sinal de velocidade angular.

O circuito conversor do sinal de controle da carga converte um sinal analógico de 0 a 5Vcc, em um sinal modulado em largura de pulso (PWM) e tem por finalidade receber o sinal de referência de controle da carga, para que o mesmo possa ser enviado ao MPCC. A Figura 47 ilustra o circuito eletrônico de conversão de um sinal analógico para um sinal modulado em largura de pulso. Nela pode-se observar que o sinal analógico de comando é aplicado à entrada analógica AN0 do microcontrolador PIC 16F819 que, através do software residente, desenvolvido na linguagem C, converte o sinal analógico recebido em um sinal PWM, na frequência de 20kHz e amplitude de 5Vcc. Em seguida, este sinal tem a sua amplitude convertida para 12Vcc pelo circuito comparador de saída.

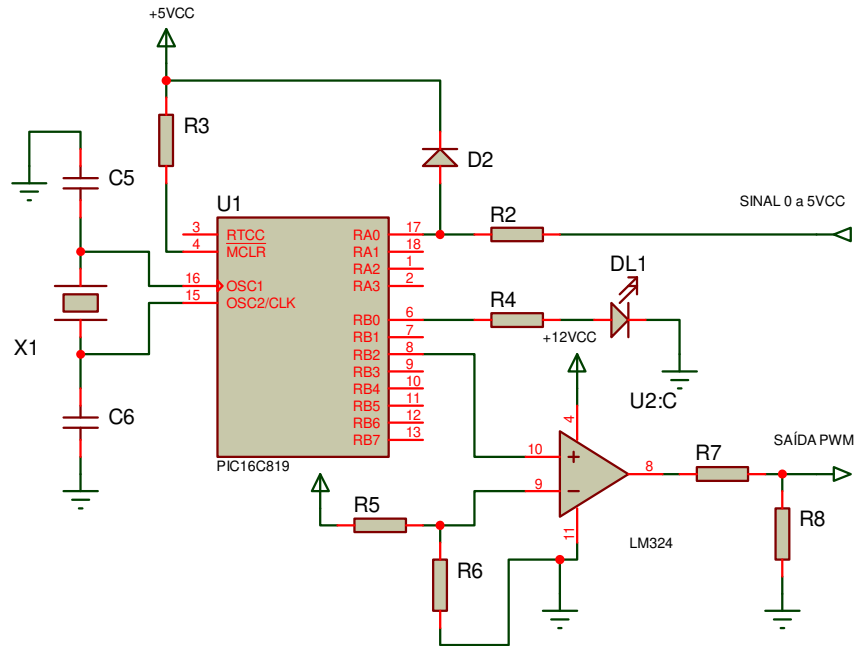


Figura 47 - Circuito conversor Analógico / PWM

O circuito amplificador do sinal de referência de velocidade angular é responsável por adequar o sinal de comando de velocidade angular para valores de tensão adequados ao inversor de frequência. Neste circuito, o sinal de comando de velocidade angular, com amplitude de 0 a 5Vcc, gerado na Saída Analógica 0 (Terminal 14 do Módulo NI DAQ6009) é amplificado com ganho igual a 2, para então ser aplicado à entrada de referência do inversor de frequência, que então ajusta a velocidade angular do motor de indução. A Figura 48 mostra o circuito amplificador do sinal de comando de velocidade angular.

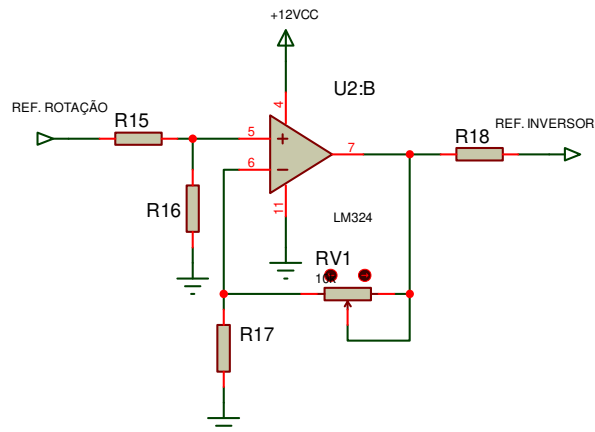


Figura 48 - Amplificador do sinal de comando de velocidade angular

O sinal de monitoramento da velocidade angular é obtido a partir da saída “W” do alternador. Este sinal senoidal tem uma frequência diretamente proporcional à velocidade angular do eixo do alternador. Para que este sinal possa ser enviado ao circuito de conversão frequência/tensão (marca DLG, modelo TRM800), é necessário que o mesmo seja convertido para um sinal quadrado com amplitude limitada a 5Vcc. Isto resultará em um sinal analógico, com tensão variável entre 0 e 5Vcc, para variações da velocidade angular entre 0 e 523rad s⁻¹ (5000rpm). Na Figura 49 pode-se observar a utilização de um circuito Comparador por Laço de Histerese, que tem a função de eliminar interferências de ruídos causados por harmônicas de ordens superiores e foi utilizado para condicionar o sinal da saída “W” do alternador.

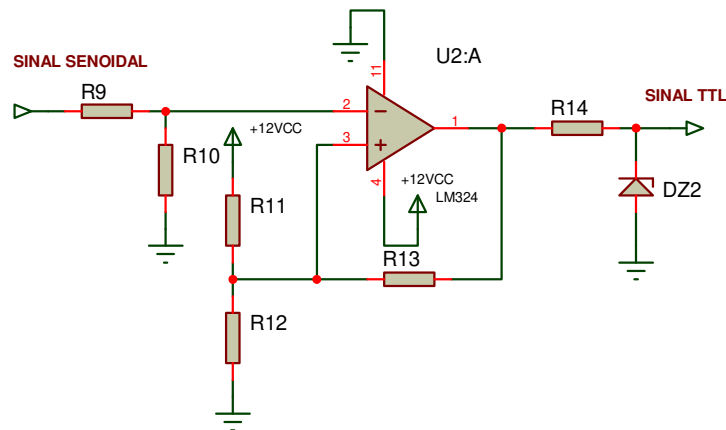


Figura 49 - Circuito condicionador do sinal de velocidade angular

A Figura 50 ilustra a placa de circuito impresso desenvolvida. A fonte de alimentação para os circuitos, dimensionada para operar com a tensão nominal de 24Vcc em corrente contínua, é conectada à entrada denominada +VCC.

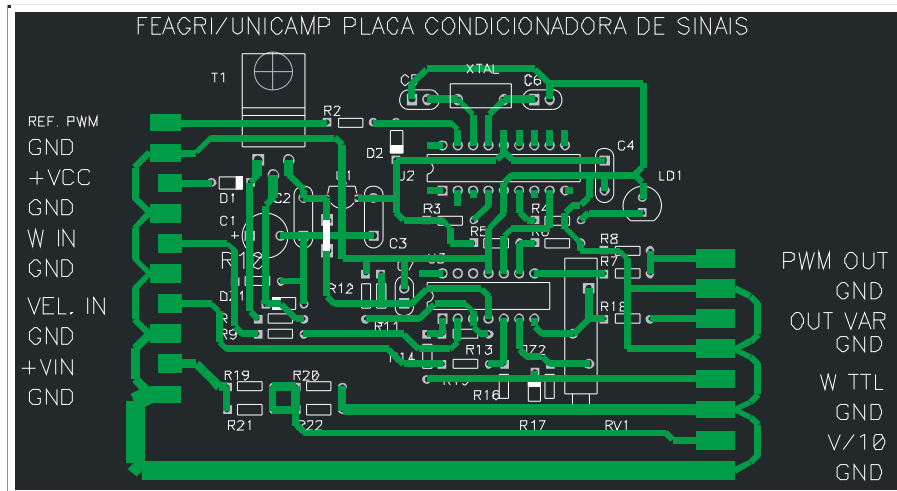


Figura 50 - *Layout* da Placa Condicionadora de Sinais

O circuito PWM de controle da corrente de excitação tem por finalidade substituir o controle original da corrente de excitação do alternador, do tipo (liga-desliga), por um sistema de controle mais elaborado, uma vez que, por não se utilizar o banco de baterias acoplado ao alternador, a estabilização da tensão de saída torna-se crítica. A Figura 51 ilustra o circuito desenvolvido.

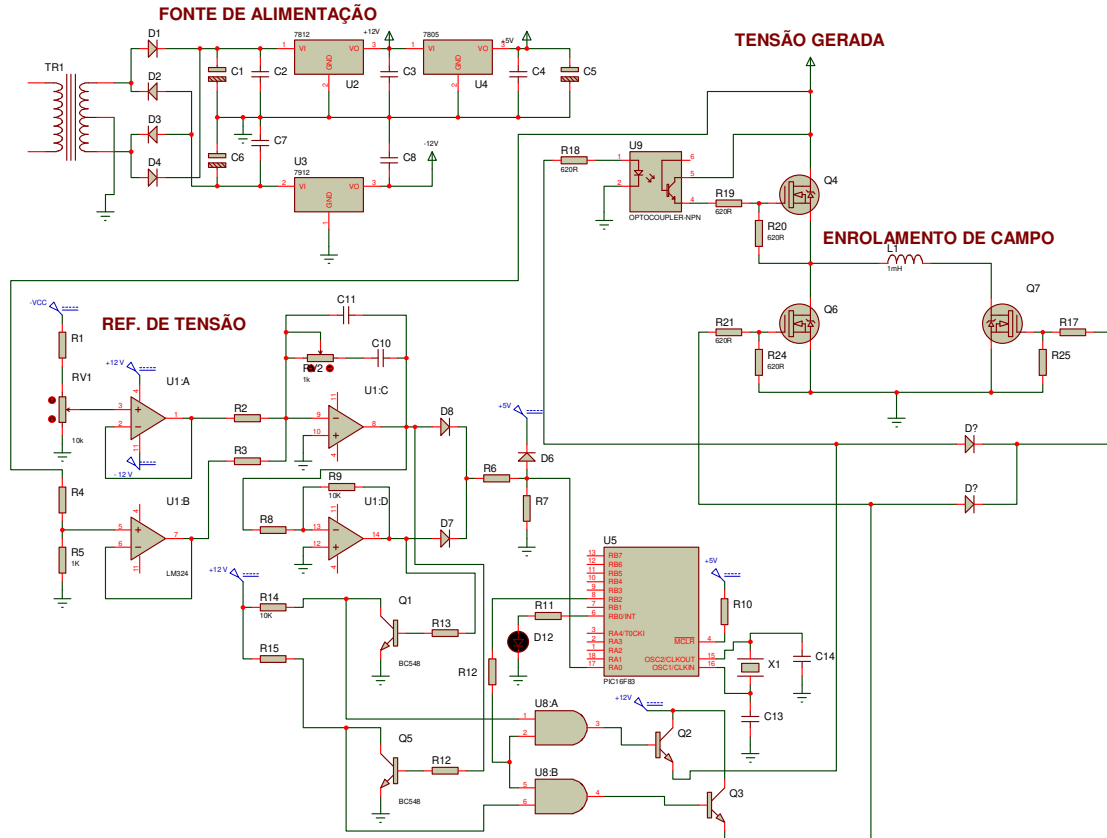


Figura 51 - Circuito de controle da corrente de excitação de campo

No circuito eletrônico pode-se observar que a corrente de excitação de campo é controlada por uma ponte de três transistores. O transistor Q4 é acionado para incrementar a corrente de campo, sendo que os transistores Q6 e Q7 são acionados para curto-circuitar o enrolamento de campo.

Distúrbios de corrente de carga podem provocar um surto na tensão de saída, que é normalmente absorvido pelo banco de baterias acoplado, tornando-se crítico na ausência dele, uma vez que a tensão pode alcançar valores superiores ao limite de 2,45Vcc por elemento de bateria, ou seja, para um banco de bateria com doze elementos, uma tensão máxima permissível de 29,4Vcc.

Através do potenciômetro RV1, uma tensão de referência negativa de 0 a -10Vcc é ajustada. Esta tensão é amplificada com ganho um pelo amplificador U1A, para então ser somada com a tensão de saída dividida por três pelo amplificador U1C, configurado com um

ganho ajustável entre -1 e -100. Como resultado dessa soma, pode-se obter um valor entre -12 e +12Vcc, dependendo do valor da tensão de saída, em relação a tensão de referência. Essa mesma tensão tem a sua polaridade invertida pelo amplificador U1D. Assim, independente da polaridade da tensão de saída do circuito somador, uma tensão positiva será aplicada à entrada analógica do microcontrolador U5 que, através de um software residente, desenvolvido na linguagem C, tem a função de converter uma tensão entre 0 e 5Vcc em um sinal PWM, com ciclo de trabalho entre 0 e 100%, na frequência de 10kHz.

O circuito de controle externo da corrente de excitação foi desenvolvido com a finalidade de se monitorar e controlar a corrente de excitação a partir de uma referência externa. Com isso, foi possível implementar uma plataforma computacional de controle e aquisição, em tempo real, do valor da corrente de excitação aplicada. A Figura 52 mostra o circuito eletrônico desenvolvido.

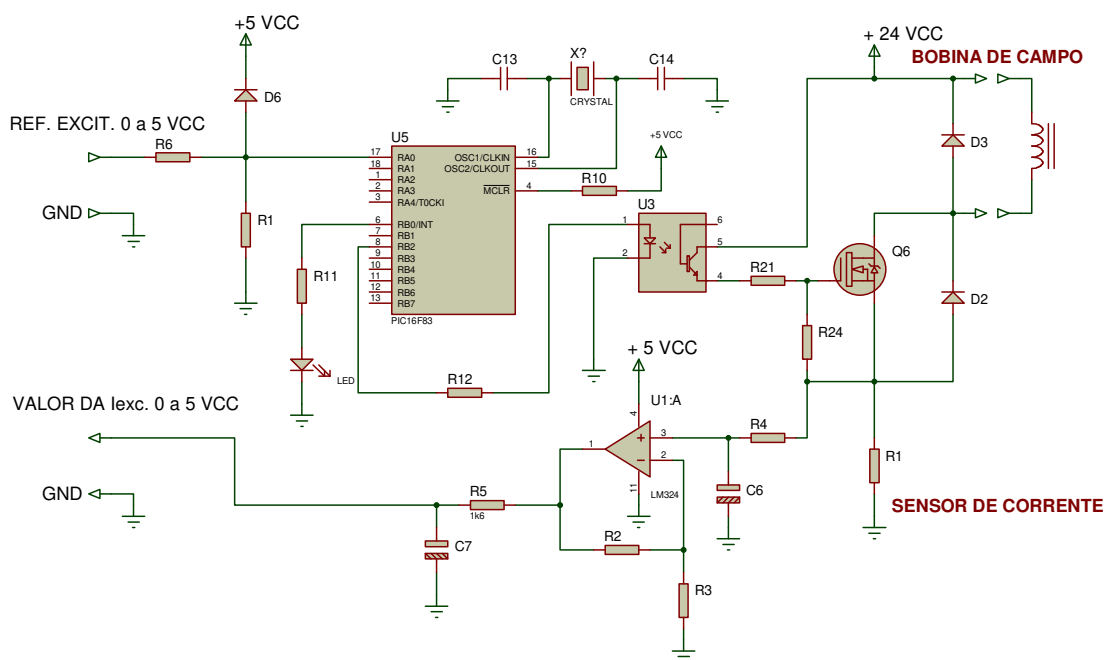


Figura 52 - Driver PWM de controle e aquisição da corrente de excitação

No circuito elétrico do *driver* PWM, pode-se observar que a intensidade da corrente que flui pelo enrolamento de campo depende do sinal de referência externa aplicada. Esta corrente passa pelo resistor R1 (sensor de corrente), provocando uma queda de tensão, que

após o estágio de amplificação, gera um sinal de 0 a 5Vcc, para uma corrente de excitação de 0 a 5A.

5.2 Aquisição de sinais e controle

O aplicativo desenvolvido em LabVIEW permite a aquisição dos sinais, a atuação na corrente de carga, na velocidade angular e na corrente de excitação de campo, além de processar e armazenar os resultados.

Na Figura 53 pode-se observar um campo denominado "Arquivo". Este campo é composto por um nome, data e hora em que a aquisição foi iniciada. Esta composição determina o nome do arquivo onde será armazenada a planilha de dados referente ao ensaio.

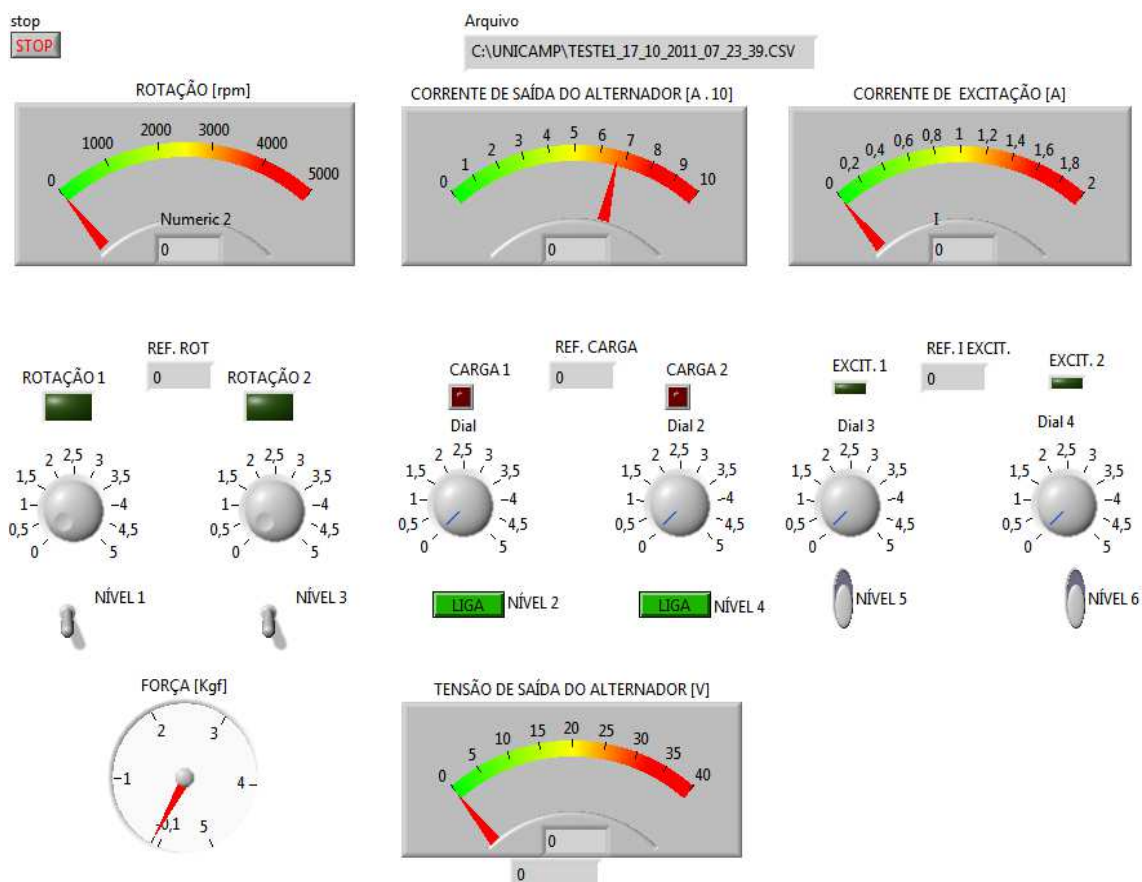


Figura 53 - Interface gráfica desenvolvida com o auxílio do LabVIEW

O aplicativo permite selecionar dois níveis de ajuste para a velocidade angular, carga elétrica e corrente de excitação do campo. Com isso, é possível se aplicar variações desses parâmetros na forma de um degrau, para análise do comportamento dinâmico do sistema. Como opção, para outros tipos de sinais de teste, o aplicativo dispõe de uma funcionalidade para importação de arquivos de testes.

A Figura 54 mostra o programa desenvolvido na plataforma LabVIEW, que dá suporte à interface gráfica mostrada na Figura 53. Como se pode observar, as grandezas coletadas são amplificadas para que os seus valores sejam numericamente representativos aos sinais coletados.

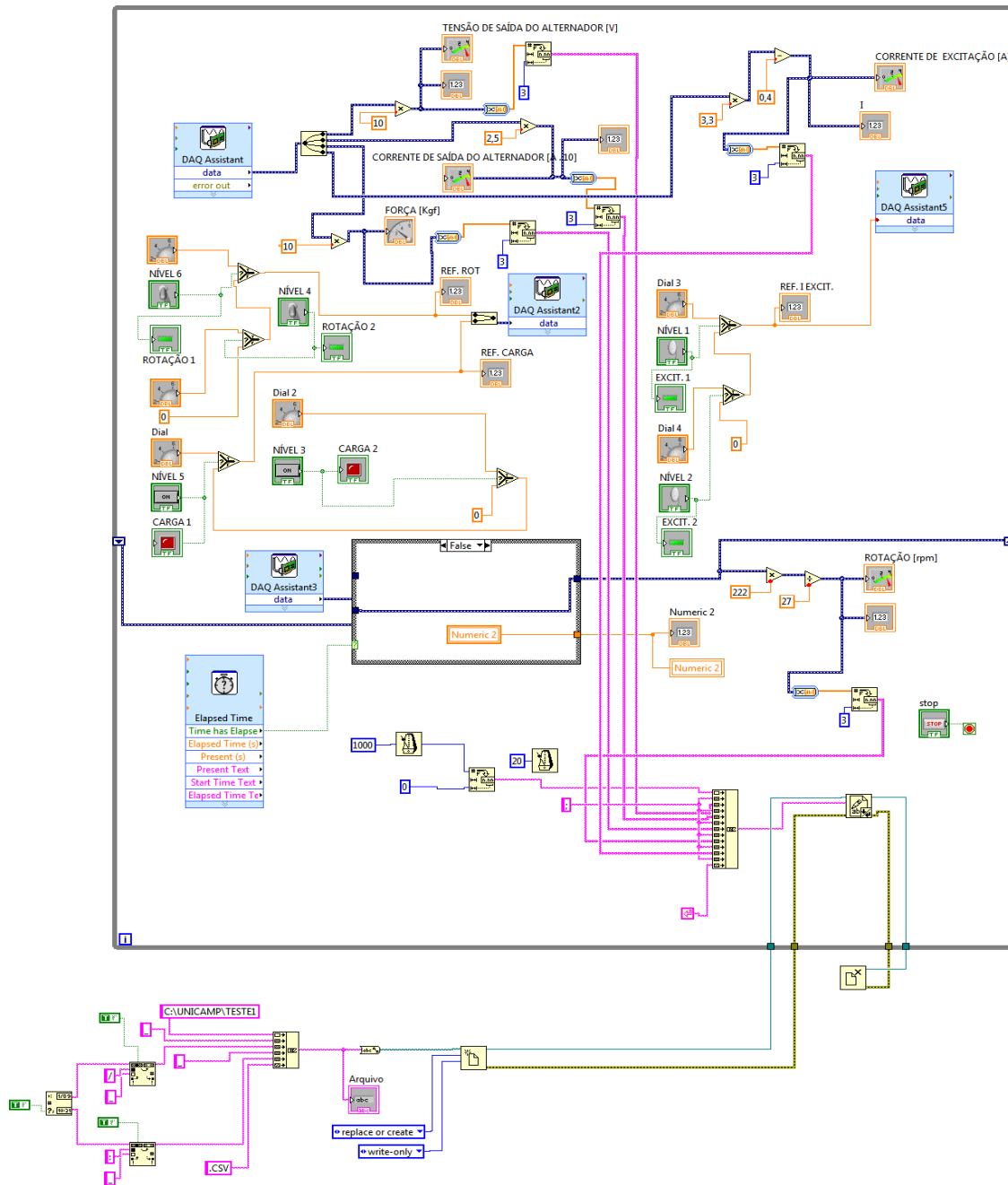


Figura 54 - Aplicativo em linguagem LabVIEW para aquisição, controle e gravação de sinais

Este aplicativo possibilitou a aquisição de sinais a uma taxa máxima de 250 amostras por segundo, considerada adequada em relação à dinâmica do sistema.

5.3 Adaptação do alternador

O protótipo do alternador foi construído em conjunto com a empresa Castell Motores Ltda. O alternador adaptado foi do tipo sem escovas, com tensão e corrente nominal de 24Vcc e 120A, respectivamente, para uma velocidade angular de $418,9\text{rad s}^{-1}$ (4000rpm). Este projeto teve como base um alternador veicular, anteriormente produzido por esta empresa, para equipar veículos militares. Neste alternador foi instalada uma entrada independente para circuito de excitação, indicado por (a) na Figura 55, o que possibilita o controle da tensão de saída de forma autônoma. Para que este equipamento pudesse trabalhar exposto ao tempo, o sistema de arrefecimento foi alterado para o tipo ventilação forçada por fluxo externo, indicado por (b) na Figura 55, que garante proteção contra a entrada de partículas sólidas nos enrolamentos de excitação e do estator (Figura 55).

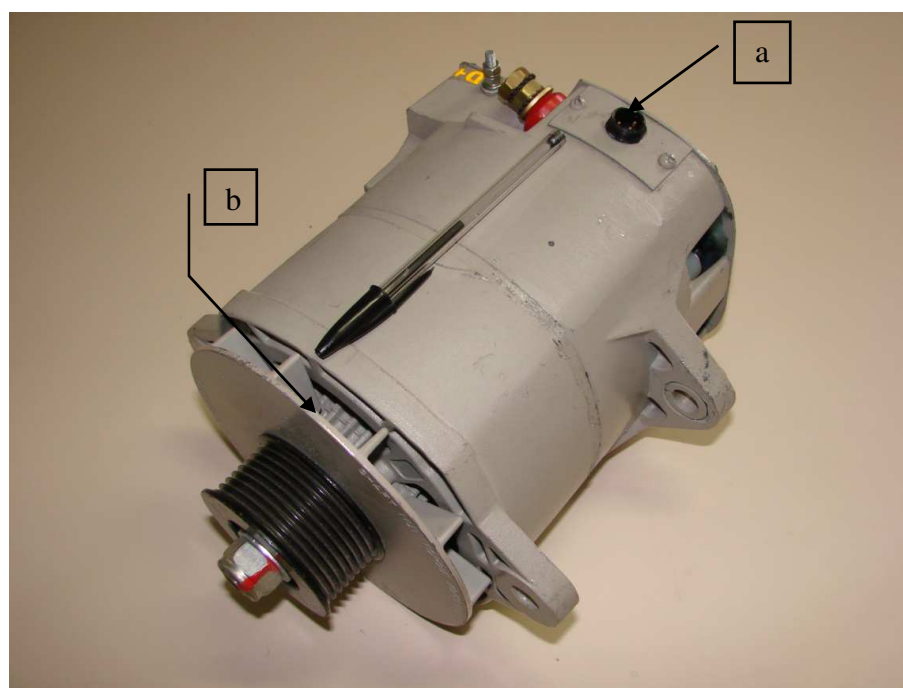


Figura 55 - Gerador síncrono de 2,8 kW adaptado em parceria com a empresa Castell Ltda

Como resultado dos testes iniciais com o alternador, obteve-se a curva de resposta da corrente gerada em função da velocidade angular, conforme apresentado na Figura 56. Observa-se que a potência gerada depende da velocidade angular aplicada no eixo do

alternador, e que, para uma velocidade angular entre 350rad s^{-1} (3344rpm) e 450rad s^{-1} (4297rpm), a corrente máxima mantém-se próxima a 120A, resultando em uma potência máxima gerada de 3,5kW a 29,5V. Segundo Garcia (2011), este valor equivale à potência consumida pelos motores e controladores eletrônicos de uma máquina semeadora-adubadora equipada com vinte e uma linhas. Para a realização dos ensaios, utilizou-se um sistema de excitação de campo com controle eletrônico do tipo liga-desliga, ajustado para uma tensão de saída de 29,5Vcc.

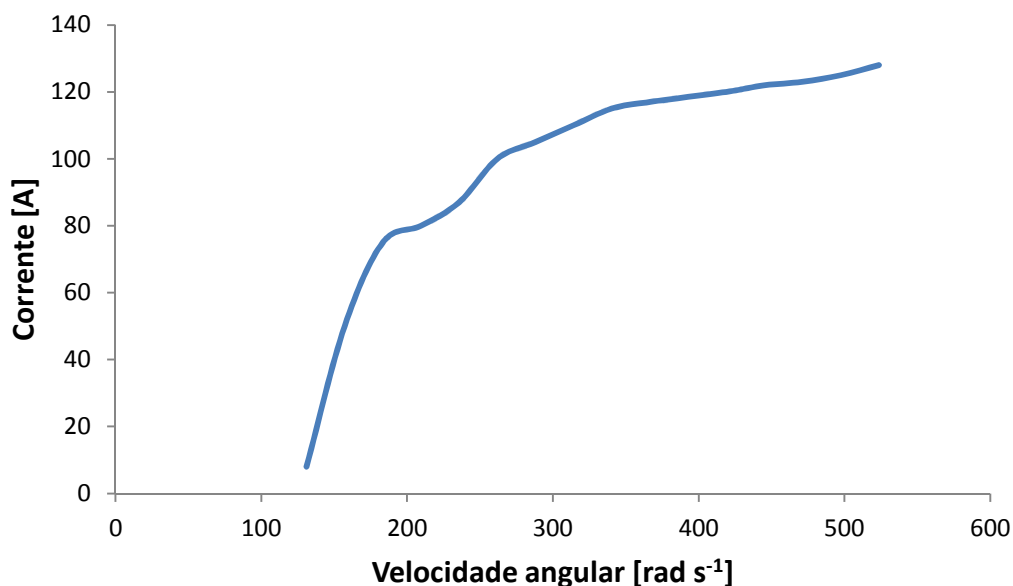


Figura 56 - Curva de resposta da corrente gerada em função da velocidade angular do alternador

A Figura 57 ilustra o comportamento, ao longo do tempo, das temperaturas no estator do alternador e da temperatura ambiente no local do ensaio. Nesta mesma figura é possível observar que após uma hora de ensaio, a temperatura medida junto ao estator do alternador alcança a estabilidade em torno de 61°C . Esta temperatura de trabalho está dentro da faixa permissível para operação do alternador, que tem o seu valor máximo admissível em 75°C .

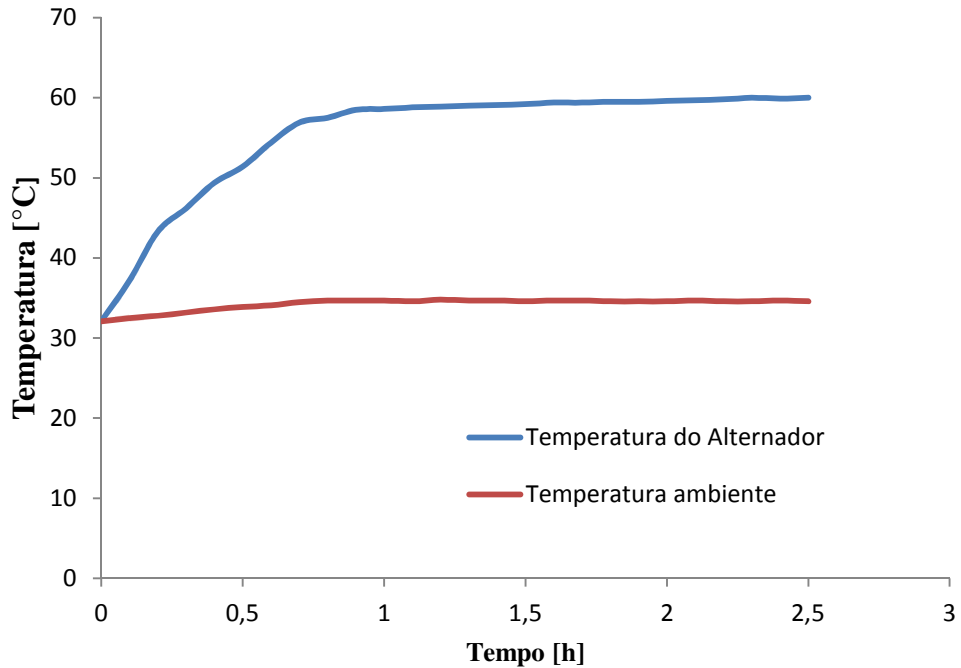


Figura 57 - Curva do comportamento térmico do gerador síncrono desenvolvido

O rendimento de uma máquina síncrona, operando como gerador, é a relação entre a potência elétrica gerada e a potência mecânica aplicada ao eixo. Para a determinação do rendimento do alternador desenvolvido, adotou-se o ponto de operação como sendo aproximadamente 50% da potência nominal do mesmo (1350W), para uma velocidade angular no eixo do alternador de $474,8 \text{ rad s}^{-1}$ (4534rpm), e corrente de excitação de campo de 1,3A.

O rendimento observado foi aproximadamente de 72% o que se aproxima-se de 75%. Este, segundo Cogo et al. (1986), é o rendimento característico para máquinas síncronas de pequeno porte. Conforme Kosow (1972), o rendimento em uma máquina síncrona não é constante, e nas máquinas de grande porte, alcança o seu valor máximo entre 80% e 100% da potência nominal.

5.4 Alternador atuando com controle de excitação tipo liga-desliga

Nos alternadores veiculares convencionais, o controlador da tensão de saída (variável controlada) atua na corrente de excitação (variável manipulada), na forma liga-desliga, com uma histerese de $0,7V_{cc}$ em torno do valor nominal de $29,0V_{cc}$. Estes valores possibilitam a plena carga do banco de baterias, que por sua vez atua como estabilizador da tensão de saída, impedindo que a tensão de saída ultrapasse $29,5V_{cc}$ e venha danificar equipamentos eletroeletrônicos acoplados.

Neste tipo de controlador a tensão de saída é comparada com uma tensão de referência igual a $29,5V_{cc}$, permitindo um fluxo máximo de corrente de excitação, sempre que a tensão de saída for menor que a de referência, ou então, interrompendo totalmente o fluxo de corrente, toda vez que o valor da tensão for superior a de referência. A Figura 58 ilustra o circuito de controle da corrente de excitação do tipo liga-desliga, onde pode-se observar que quando a tensão gerada ultrapassa os $29,5V_{cc}$, o transistor Q2 é desligado e a excitação do campo é interrompida.

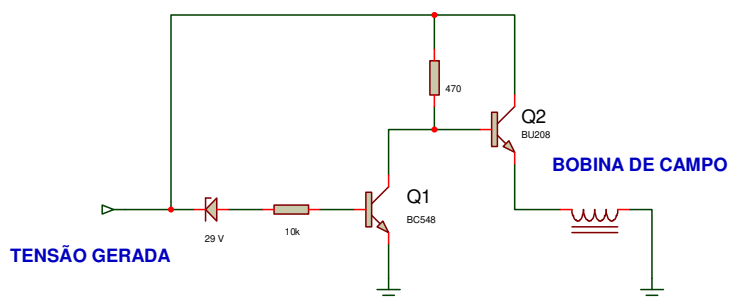


Figura 58 - Circuito de controle da corrente de excitação do tipo liga-desliga

Na bancada de testes foram realizados ensaios para levantamento da tensão gerada para o alternador operando com o controlador liga-desliga da corrente de excitação, originalmente instalado no mesmo. Inicialmente aplicou-se um distúrbio do tipo rampa na corrente de carga Figura 59.

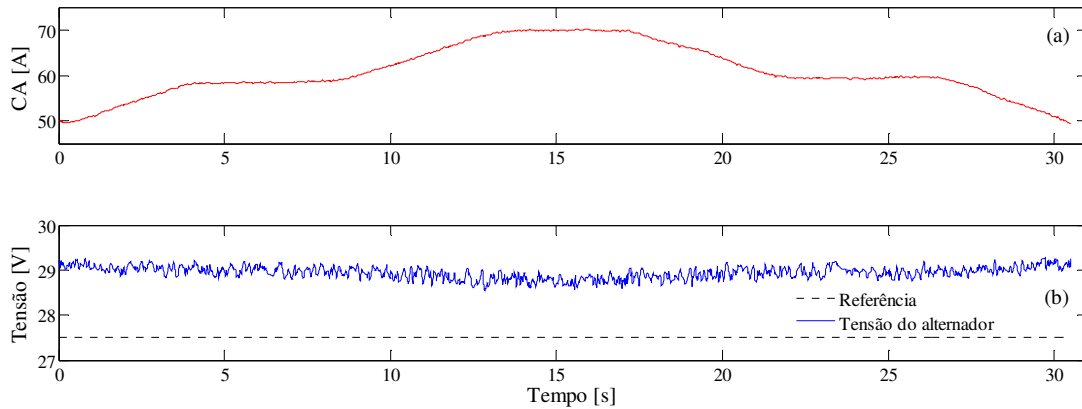


Figura 59 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador com controlador liga-desliga, frente a um distúrbio do tipo rampa na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Observou-se que a tensão gerada se manteve em um patamar superior ao valor de referência, estabilizando-se em um valor aproximado de 29Vcc.

A Figura 60 apresentada os resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo variação senoidal da velocidade angular, obtidos nos testes realizados na bancada experimental, para o controlador liga-desliga da corrente de excitação de campo.

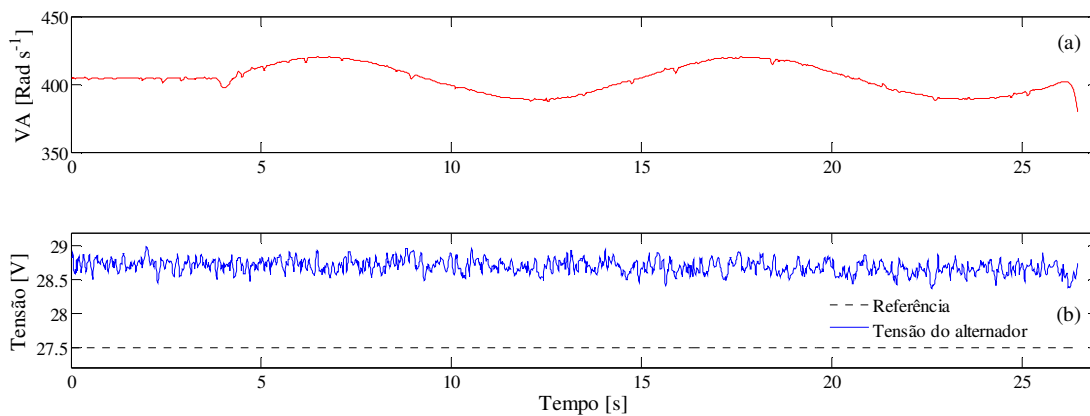


Figura 60 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador com controlador liga-desliga, alternador frente a um distúrbio do tipo senoidal na velocidade angular do eixo de acionamento do alternador; (a) distúrbio de velocidade angular; (b) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Foram realizados testes complementares a fim de avaliar o comportamento da tensão gerada na ocorrência de perturbações de grande amplitude na corrente de carga, com amplitudes entre 6 e 32A (Figura 61).

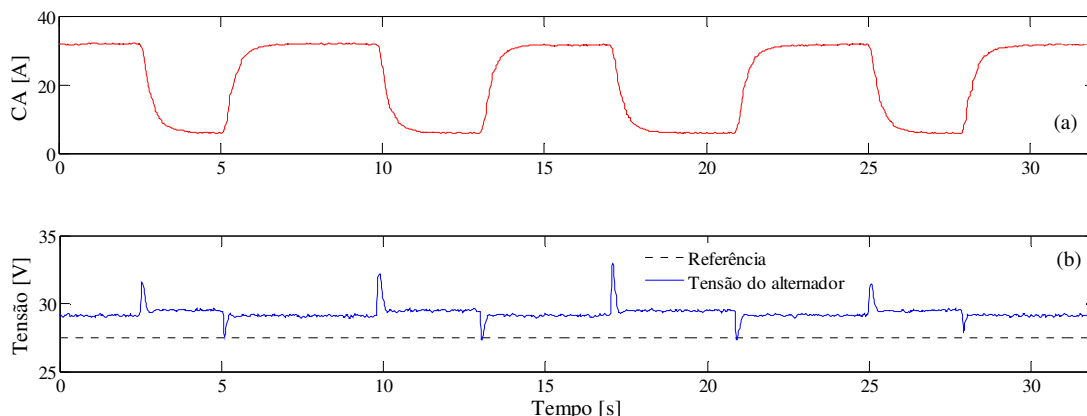


Figura 61 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador com controlador liga-desliga, frente a um distúrbio do tipo degrau de grande amplitude na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Os resultados obtidos para o controlador do tipo liga-desliga confirmam o seu desempenho insatisfatório no controle da tensão de saída, quando operado na ausência de baterias. Na Figura 61 pode-se observar que os picos de tensão, acima do limite máximo estabelecido, estão presentes durante um intervalo de tempo que inviabiliza o uso de supressores de transientes. Este fato aponta para a necessidade da utilização de um sistema mais elaborado para o controle da tensão de saída, frente aos distúrbios causados pela variação da carga aplicada ao alternador.

A Tabela 4 apresenta os valores dos índices de desempenho para a tensão de saída, frente aos diferentes distúrbios de corrente de carga e velocidade angular de acionamento do alternador, para o controlador liga-desliga da corrente de excitação de campo.

Tabela 4 - Índices de desempenho para os resultados experimentais para a tensão gerada frente aos distúrbios de corrente de carga, tipo rampa e degrau, e distúrbio senoidal de velocidade angular de acionamento

Distúrbios	IAE	ISE	ITAE	MSE
Rampa de carga	4969,65	7234,82	44,00	2,10
Degrau de carga	5104,57	7132,09	44,45	1,93
Velocidade angular	3541,78	4271,52	31,71	1,44

5.5 Identificação do modelo matemático

Os dados utilizados na identificação dos modelos foram obtidos por meio da bancada experimental em conjunto com os sistemas de supervisão e atuação, como descritos anteriormente. Os dados coletados foram tratados por meio de um programa desenvolvido na linguagem MATLAB. Neste programa, obteve-se a tensão média gerada pelo alternador para cada ensaio, bem como, o seu desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A Tabela 5 apresenta os resultados das tensões geradas para o planejamento fatorial central composto 2^3 .

Tabela 5 - Tensões geradas pelo alternador em função das variáveis consideradas no planejamento fatorial central composto 2^3

Ensaio	X_{CA}	X_{VA}	X_{EX}	Repetição			Média	Desvio	CV
				1	2	3			
1	-1	-1	-1	28,69	28,96	28,29	28,69	0,34	1,17
2	1	-1	-1	22,00	20,97	21,49	21,49	0,52	2,40
3	-1	1	-1	30,49	30,65	31,13	30,65	0,33	1,09
4	1	1	-1	22,42	21,65	20,58	21,65	0,92	4,27
5	-1	-1	1	32,67	32,15	30,96	32,15	0,88	2,73
6	1	-1	1	26,28	26,66	24,05	26,28	1,41	5,37
7	-1	1	1	34,87	33,82	34,12	34,12	0,54	1,59
8	1	1	1	27,79	27,97	27,91	27,91	0,09	0,33
9	-1,682	0	0	33,05			33,05		
10	1,682	0	0	20,54			20,54		
11	0	-1,682	0	22,82			22,82		
12	0	1,682	0	32,95			32,95		
13	0	0	-1,682	20,87			20,87		
14	0	0	1,682	31,01			31,01		
15	0	0	0	28,34			28,34		
16	0	0	0	28,19			28,19		
17	0	0	0	28,06			28,06		
18	0	0	0	27,99			27,99		
19	0	0	0	28,14			28,14		

A Tabela 6 mostra os coeficientes de regressão obtidos por meio do programa Statistica.

Tabela 6 - Coeficientes de regressão para o planejamento fatorial central composto da tensão gerada pelo alternador

Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	-90% Limite de confiança	+90% Limite de confiança
28,10	0,73	38,69	0,00*	26,45	29,74
-3,62	0,44	-8,21	0,00*	-4,62	-2,62
-0,25	0,44	-0,56	0,59	-1,25	0,76
1,67	0,44	3,78	0,00*	0,67	2,66
0,14	0,44	0,32	0,75	-0,86	1,15
2,57	0,44	5,83	0,00*	1,57	3,57
-0,55	0,44	-1,24	0,24	-1,55	0,45
-0,27	0,58	-0,47	0,65	-1,57	1,03
0,52	0,58	0,90	0,39	-0,79	1,82
0,19	0,58	0,32	0,76	-1,12	1,49

* valores estatisticamente significativos a 95% de ($p < 0,05$)

Tabela 7 - Tabela ANOVA para o planejamento experimental da tensão gerada pelo alternador

Fonte de Variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F_{Calculado}	F_{Tabelado} 95%;(3,15)
Regressão	305,68	3	101,89	47,61	3,29
Resíduos	32,07	15	2,14		
Falta de ajuste	32,00	11	2,90		
Erro puro	0,07	4	0,01		
Total	337,75				
	% de variação explicada			90,50	
	% de variação explicável			99,97	

Observa-se na Tabela 6 que somente os termos dos coeficientes lineares da regressão foram estatisticamente significativos para 95% de confiança. Os resultados da Tabela 9 foram obtidos desprezando-se os coeficientes não significativos. Na mesma tabela observa-se que o valor do teste F calculado foi de 47,61, cerca de 14 vezes maior do que o valor de F tabelado 3,29, indicando que o modelo obtido linear foi estatisticamente significativo e preditivo, para as variáveis estudadas. Desta forma, a tensão gerada pelo alternador pode ser predita em função da corrente de carga, velocidade angular e corrente de excitação de campo, por meio da Equação 11.

$$Y = 27,63 - 3,62 X_{CA} + 1,67 X_{VA} + 2,57 X_{EX}$$

Equação 11

A variação explicada pelo modelo (R^2) apresentou valor de 90,50%, indicando que o modelo obtido é adequado para representar o processo. O baixo valor do erro puro (0,07) indica que o sistema apresenta boa repetibilidade. A partir do modelo foram obtidas as superfícies de resposta para análise da influência das variáveis na resposta (Figura 62, Figura 63 e Figura 64).

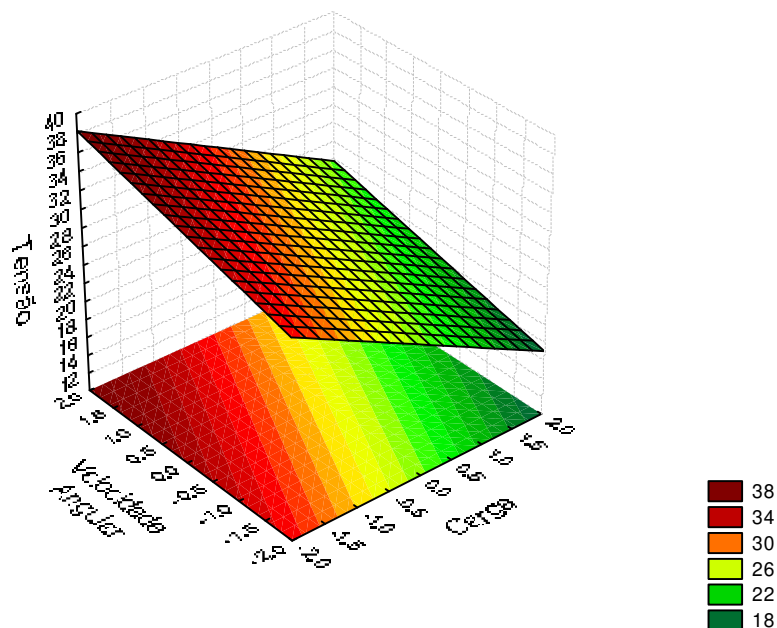


Figura 62 - Superfície de resposta da tensão gerada em função da velocidade angular e da corrente de carga

A superfície de resposta (Figura 62) mostra que a corrente de carga exerce maior influência na tensão gerada, enquanto que a variação da velocidade angular, dentro da faixa estabelecida, pouco influencia a resposta. A variável corrente de carga exerce influência negativa na resposta, de modo que menores valores de corrente de carga causam maiores valores de tensão gerada.

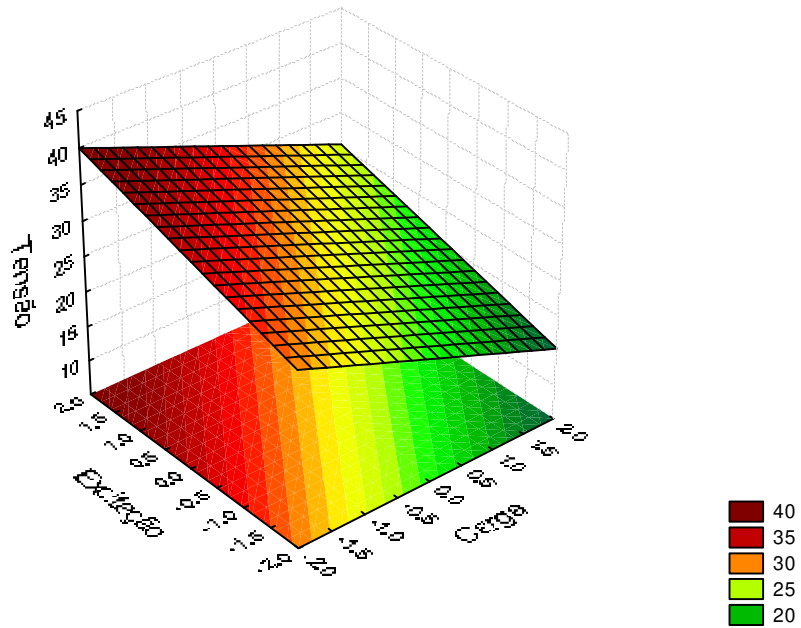


Figura 63 - Superfície de resposta da tensão gerada em função corrente de excitação e da corrente de carga

Semelhante situação pode ser observada (Figura 63) quando se analisa o efeito das variáveis, corrente de carga e corrente de excitação, na tensão gerada. Menores valores de corrente de carga são responsáveis por maiores valores de tensão gerada. A corrente de excitação, por sua vez, exerce menor influência na resposta.

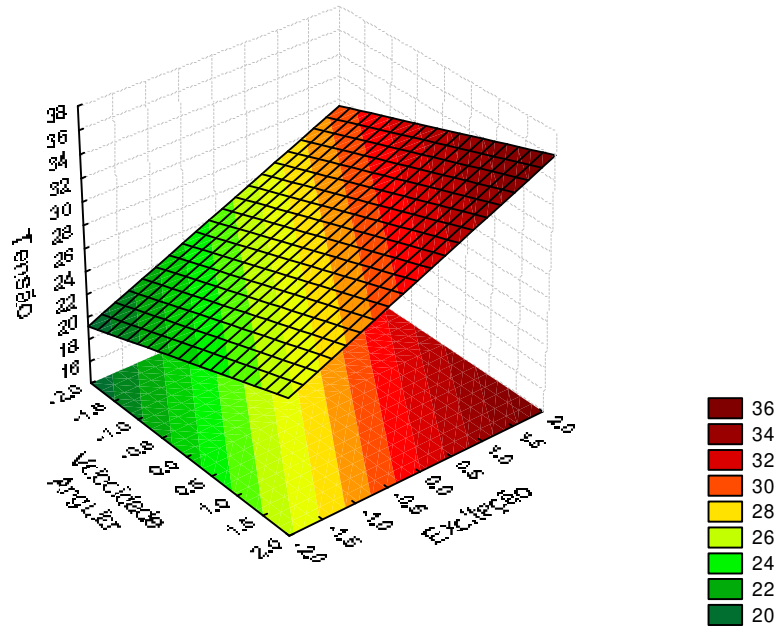


Figura 64 - Superfície de resposta da tensão gerada em função da velocidade angular e da corrente de excitação

Pode-se observar, por meio da superfície de resposta (Figura 64), uma tendência linear do efeito positivo da corrente de excitação na resposta da tensão gerada, independente dos valores de velocidade angular, dentro da faixa estudada.

5.6 Validação experimental do modelo

O modelo matemático de ordem zero obtido para o alternador foi validado por meio da comparação dos resultados obtidos na simulação computacional, com os resultados mensurados por meio da bancada experimental. Para a simulação computacional, foi utilizado um aplicativo desenvolvido em Simulink, mostrado na Figura 65.

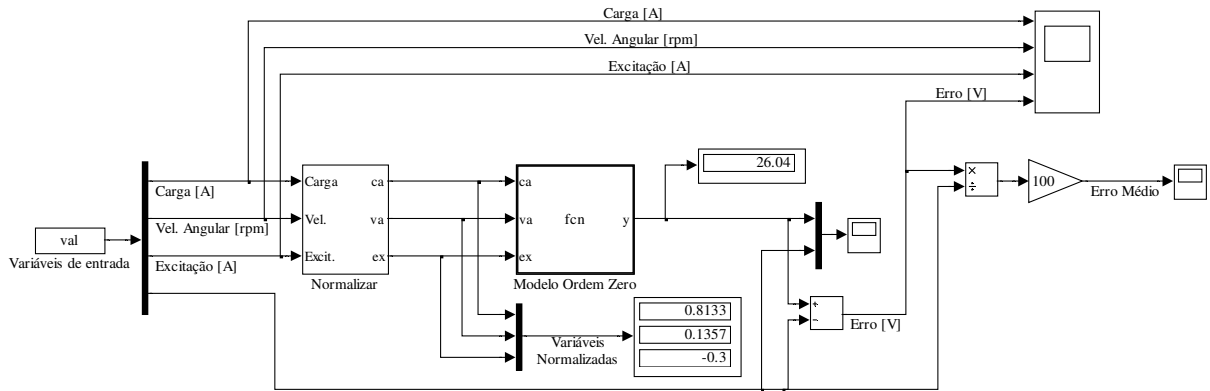


Figura 65 – Diagrama de blocos do programa em Simulink para validação do modelo matemático do alternador

A Tabela 8, apresenta os resultados simulados e experimentais da tensão gerada, para condições específicas de corrente de carga, velocidade angular de acionamento do gerador e corrente de excitação de campo. São apresentados também, a diferença percentual entre os valores gerados pelo modelo e os valores reais medidos em bancada.

Tabela 8- Resultados simulados e experimentais da tensão gerada em função das condições especificadas de corrente de carga (CA), velocidade angular de acionamento do gerador (VA) e corrente de excitação de campo (EX)

Absoluto			Normalizado			Tensão [Vcc]			DRM [%]
CA [A]	VA [rad s ⁻¹]	EX [A]	CA	VA	EX	Experimental	Modelo	Erro	
55,1	416	1,84	-0,83	-0,22	-0,80	30,09	29,9	0,1	0,5
54,7	431	1,85	-0,88	0,79	-0,75	31,09	32,0	-0,9	2,9
58,0	415	2,05	-0,33	-0,29	0,25	31,52	31,0	0,5	1,6
59,5	419	2,15	-0,08	-0,02	0,75	31,83	32,0	-0,2	0,6
59,0	431	1,96	-0,17	0,84	-0,20	31,17	31,1	0,1	0,4
59,6	430	2,04	-0,06	0,76	0,20	31,55	31,7	-0,1	0,5
61,6	417	1,85	0,27	-0,15	-0,75	26,56	26,3	0,3	1,2
62,3	431	1,85	0,39	0,83	-0,75	26,71	27,5	-0,7	2,8
64,6	416	1,94	0,76	-0,17	-0,30	25,61	25,7	-0,1	0,4
64,9	421	1,94	0,81	0,14	-0,30	25,52	26,0	-0,5	2,0

Os resultados obtidos permitem concluir que o modelo matemático obtido estimou adequadamente os valores de tensão frente às entradas de corrente de carga, velocidade angular de acionamento do gerador e corrente de excitação de campo. Os erros resultantes foram inferiores a 2,9%, considerando-se entradas com valores dentro da faixa de trabalho do modelo, para as os 10 pontos considerados na validação. O desvio relativo médio (DRM), considerando-se os pontos validados, foi de 1,3%.

5.7 Simulação do controlador liga-desliga

A fim de verificar o funcionamento do modelo matemático, desenvolveu-se um aplicativo em Simulink para a simulação do controle de tensão de saída do alternador, quando operado por meio de uma estratégia liga-desliga da corrente de campo. A Figura 66 ilustra o diagrama de blocos do controlador de tensão do tipo liga-desliga, implementado.

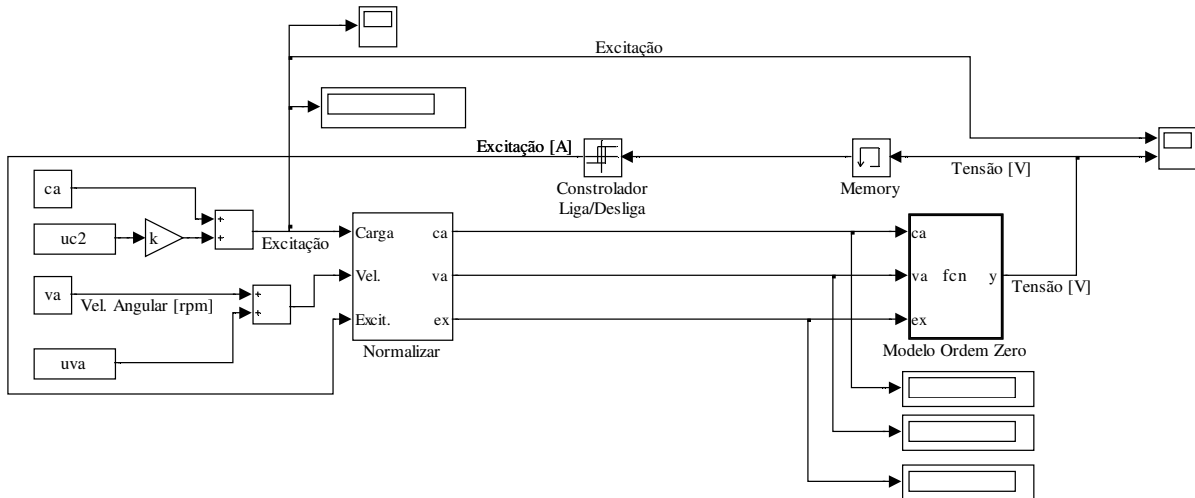


Figura 66 - Digrama de blocos do aplicativo Simulink para o controlador liga-desliga

Foram realizadas simulações da tensão de saída frente a perturbações de corrente de carga e velocidade angular de acionamento do gerador. O controlador a partir do valor ajustado para a tensão de saída e das entradas de carga e rotação, ligou ou desligou a excitação de campo de modo a manter a tensão de saída dentro dos valores toleráveis. Nestes testes consideraram-se, novamente, perturbações do tipo degrau e rampa na corrente de carga e senoidal na velocidade angular de acionamento do alternador. A Figura 67 apresenta os resultados das simulações para o controlador de tensão do tipo liga-desliga.

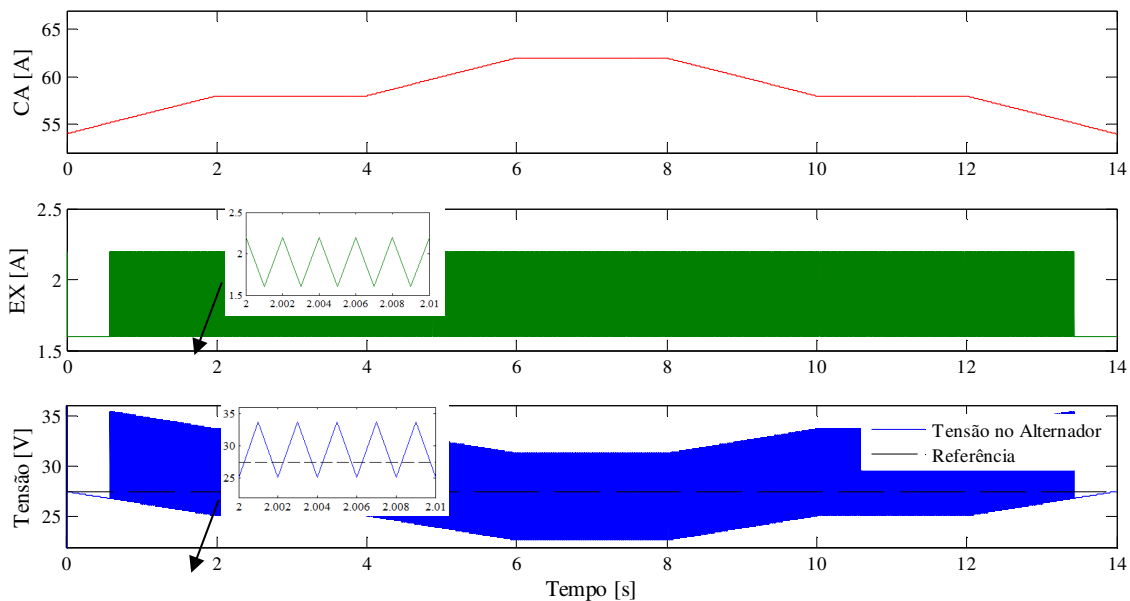


Figura 67 - Simulações para o controlador de tensão do tipo liga-desliga

Nota-se, pelos resultados das simulações, que a tensão de saída gerada apresentou uma variação cíclica, no formato triangular, com uma amplitude de oscilação de aproximadamente $8V_{cc}$. Tal oscilação decorre do fato do sistema operar sem o banco de baterias, normalmente encontrado nas aplicações veiculares. Neste caso, os valores da tensão gerada excederam o limite superior especificado para o projeto.

Os resultados obtidos, por simulação computacional, foram comparados com resultados reais, obtidos nos testes realizados na bancada experimental, com o alternador operando com o controle liga-desliga originalmente existente no mesmo, e foi possível confirmar a necessidade de um sistema de controle mais eficiente para a tensão de saída.

5.8 Controlador *fuzzy*

O controlador *fuzzy* foi implementado segundo descrito na etapa metodológica. As configurações das funções de pertinência correspondem aos valores de entrada do sistema, normalizadas para um intervalo do universo de discurso de -1 a 1. Tais configurações se ajustam as recomendações de Yager e Filev (1994) e Jager (1995), para uso de universos de discurso normalizados, para fins de simplificação e unificação do projeto. Para cada variável de entrada, foram adotadas cinco regiões de pertinências, que segundo Eminoğlu e Altaş (1998), possibilitam uma “sintonia fina” para a variável controlada. Isto resultou em uma base de regras composta por 125 condições. A Figura 68 ilustra o diagrama de blocos do controlador *fuzzy* proposto.

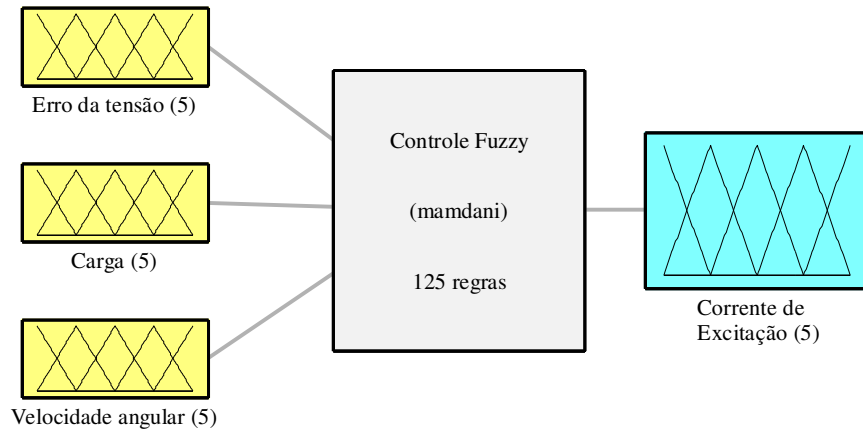


Figura 68 - Diagrama de blocos do controlador *Fuzzy*

Para a obtenção das funções de pertinências relativas ao erro da tensão, os valores foram normalizados entre -1 e 1, com cinco regiões de domínio, na forma triangular. A Figura 69 ilustra as distribuições e suas pertinências.

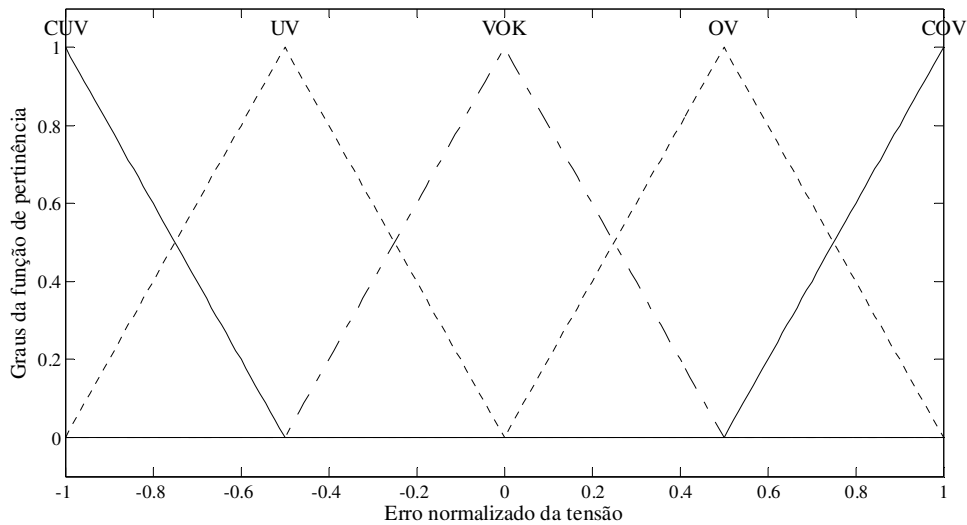


Figura 69 - Funções de pertinência relativas ao erro normalizado da tensão

Na implementação do controlador *fuzzy*, as variáveis linguísticas empregadas para o erro da tensão de saída foram:

CUV (*Completely Under Voltage*): tensão muito abaixo da referência;

UV (*Under Voltage*): tensão abaixo da referência;

- VOK** (*Voltage OK*): tensão próxima à referência;
- OV** (*Over Voltage*): tensão acima da referência;
- COV** (*Completely Over Voltage*): tensão muito acima da referência.

De forma similar à variável tensão de saída, os valores relativos à variável corrente de carga foram normalizados entre -1 e 1, com cinco regiões de domínio na forma triangular. A Figura 70 ilustra as distribuições e suas pertinências.

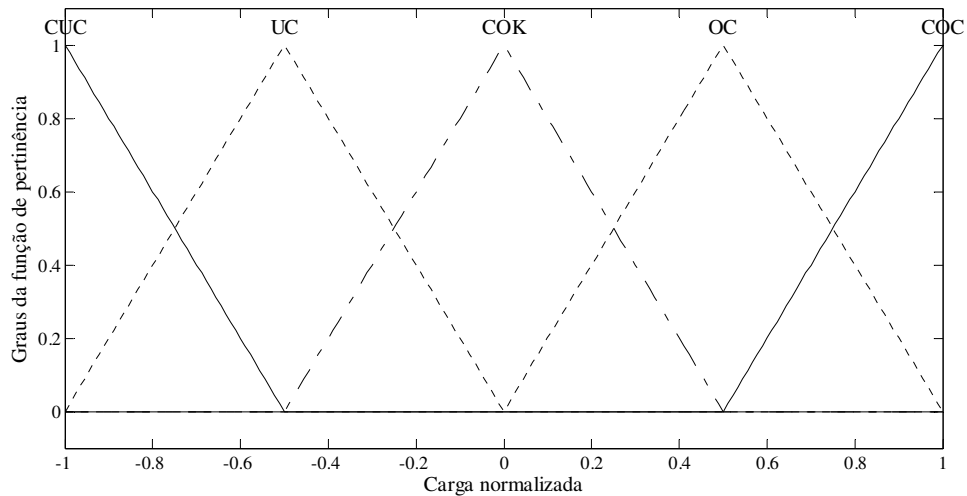


Figura 70 - Funções de pertinência relativas à variável corrente de carga normalizada

Na implementação do controlador *fuzzy*, foram empregadas as seguintes variáveis linguísticas para a corrente de carga:

- CUC** (*Completely Under Current*): corrente muito abaixo da referência;
- UC** (*Under Current*): corrente abaixo da referência;
- COK** (*Current OK*): corrente próxima à referência;
- OC** (*Over Current*): corrente acima da referência;
- COC** (*Completely Over Current*): corrente muito acima da referência.

As pertinências relativa à variável velocidade angular, assim como as demais, tiveram seus valores normalizados entre -1 e 1 e foram dividida em cinco funções de pertinência triangular. A Figura 71 apresenta as distribuições e as respectivas funções de pertinência.

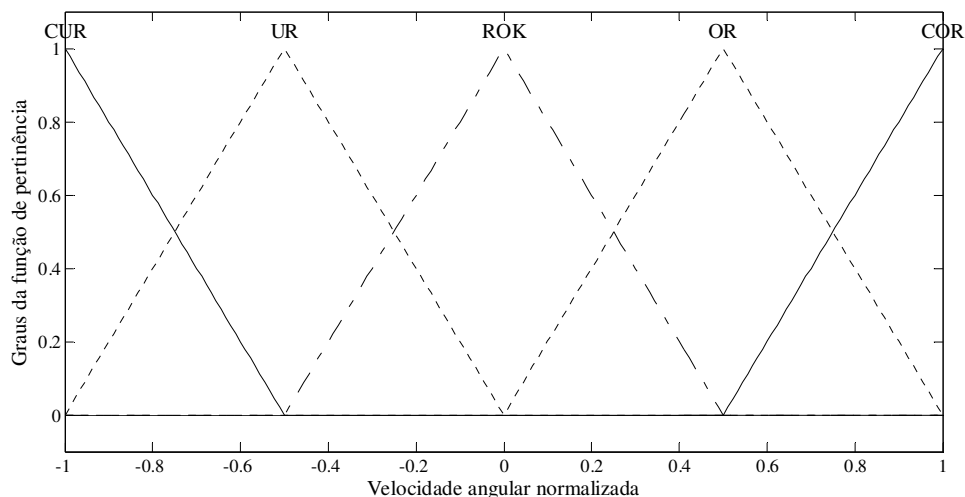


Figura 71 - Funções de ppertinência relativas à variável velocidade angular normalizada

Na implementação do controlador *fuzzy*, as variáveis linguísticas empregadas para a velocidade angular do alternador foram:

CUR (*Completely Under Rotation*): velocidade angular muito abaixo da referência;

UR (*Under Rotation*): velocidade angular abaixo da referência;

ROK (*Rotation OK*): velocidade angular próxima à referência;

OR (*Over Rotation*): velocidade angular acima da referência;

COR (*Completely Over Rotation*): velocidade angular muito acima da referência.

As funções de pertinências relativas à variável controlada, denominada corrente de excitação, foram distribuídas em cinco regiões de domínio, com os seus valores normalizados entre 0 e 1, distribuídas regularmente na forma triangular, como mostra a Figura 72.

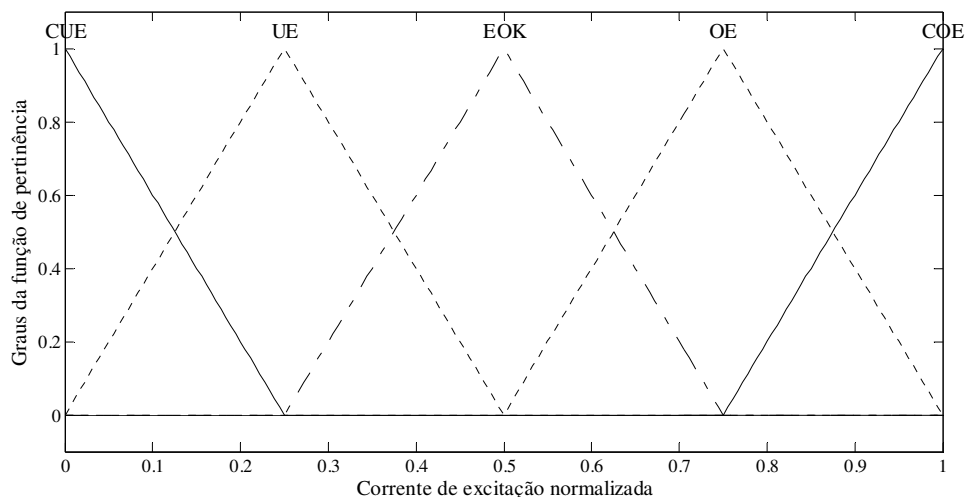


Figura 72 - Funções de pertinência relativas à variável corrente de excitação normalizada

Na implementação do controlador *fuzzy*, foram empregadas as seguintes variáveis linguísticas para a variável controlada, corrente de excitação de campo:

CUE (*Completely Under Excitation*): excitação muito abaixo da referência;

UE (*Under Excitation*): excitação abaixo da referência;

EOK (*Excitation OK*): excitação próxima à referência;

OE (*Over Excitation*): excitação acima da referência;

COE (*Completely Over Excitation*): excitação muito acima da referência.

A Tabela 9 apresenta matriz da base de regras que fundamentou a tomada de decisão, utilizando o sistema *fuzzy*. Nela pode-se observar que a variável controlada foi regida por 125 regras de controle *fuzzy*, de domínio triangular.

Tabela 9 - Base de regras do sistema *Fuzzy* para a corrente de excitação, onde CA é a corrente de carga, VA é a velocidade angular de acionamento

CA	VA	Erro da Tensão Gerada				
		CUV	UV	VOK	OV	COV
CUC	CUR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	UR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	ROK	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	OR	COE	COE	EOK	EU	CUE
	COR	COE	COE	EOK	EU	CUE
UC	CUR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	UR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	ROK	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	OR	COE	COE	EOK	EU	CUE
	COR	COE	COE	EOK	EU	CUE
COK	CUR	COE	OE	EOK	EU	CUE
	UR	COE	OE	EOK	EU	CUE
	ROK	COE	OE	EOK	EU	CUE
	OR	COE	COE	EOK	EU	CUE
	COR	COE	COE	EOK	EU	CUE
OC	CUR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	UR	COE	OE	EOK	CUE	CUE
	ROK	COE	OE	EOK	EU	CUE
	OR	COE	COE	EOK	EU	CUE
	COR	COE	COE	EOK	EU	CUE
COC	CUR	COE	OE	EOK	EU	CUE
	UR	COE	OE	EOK	EU	CUE
	ROK	COE	OE	EOK	EU	CUE
	OR	COE	COE	EOK	EU	CUE
	COR	COE	COE	EOK	EU	CUE

A base de regras foi estabelecida a partir do conhecimento especialista, podendo-se destacar, por exemplo, algumas considerações. Na operação em situações de demandas elevadas de carga, o sistema somente poderá estar sujeito a um alívio da mesma. Desta forma, foi previsto na base de regras que a tensão gerada nesta situação deve ficar próxima ao valor mínimo tolerado, evitando que um possível alívio de carga cause uma sobretensão no sistema. Uma operação análoga é realizada no caso inverso, quando o sistema opera em situações de baixa demanda de carga. Para o estabelecimento das regras que regem a tensão de saída frente

às variações da velocidade angular do alternador, considerou-se também a mesma “inteligência”.

A Figura 73 ilustra a superfície de resposta do sistema *fuzzy*, estabelecendo a corrente de excitação normalizada, em função do erro da tensão e velocidade angular normalizadas (a) e em função do erro da tensão e corrente carga normalizadas (b).

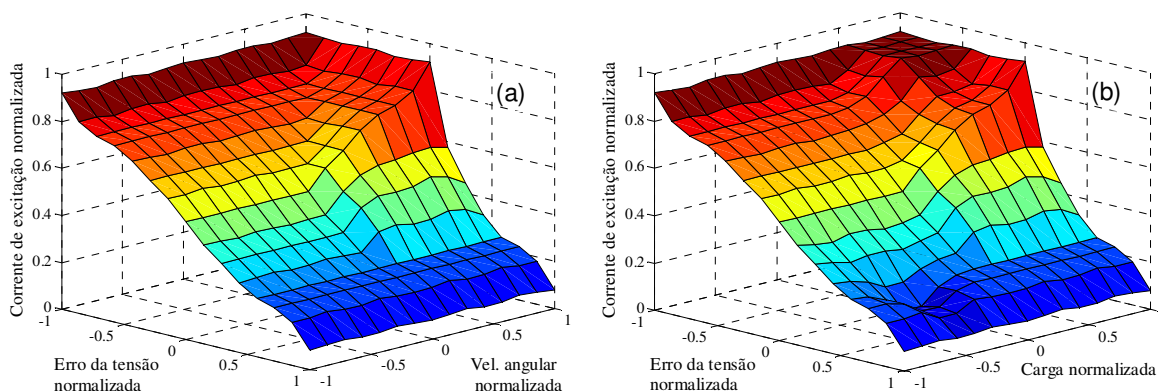


Figura 73 - Superfície de resposta do sistema de inferência *fuzzy*.
(a) velocidade angular normalizada. (b) carga normalizada

Pode-se observar que as superfícies de resposta obtidas não possuem descontinuidades, apresentando características lineares nas regiões centrais e não lineares nas regiões de borda. Isto é consequência da característica antecipativa presente nas regras. Assim, pode-se tomar como exemplo a condição em que o sistema opera a plena carga. Nesta condição, as regras preparam o sistema para receber um alívio de carga, ajustando a tensão de referência para um valor próximo ao limite inferior da faixa tolerada.

A Figura 74 apresenta o programa em linguagem Simulink do controlador *fuzzy*, cuja implementação utiliza uma estratégia do tipo PI (Proporcional-Integral) para fins minimização do erro em regime permanente da tensão gerada. Os valores dos parâmetros PI foram ajustados por meio de simulação computacional, adotando-se $K_p = 3,5$ e $K_i = 0,025$. Na simulação utilizou-se um bloco funcional para limitação da corrente de excitação de campo em 2,2A. Um filtro do tipo passa-baixa, tipo “butterworth”, de primeira ordem, com frequência de corte de 10Hz, foi empregado para condicionar a corrente de excitação, minimizando eventuais erros de simulação numérica.

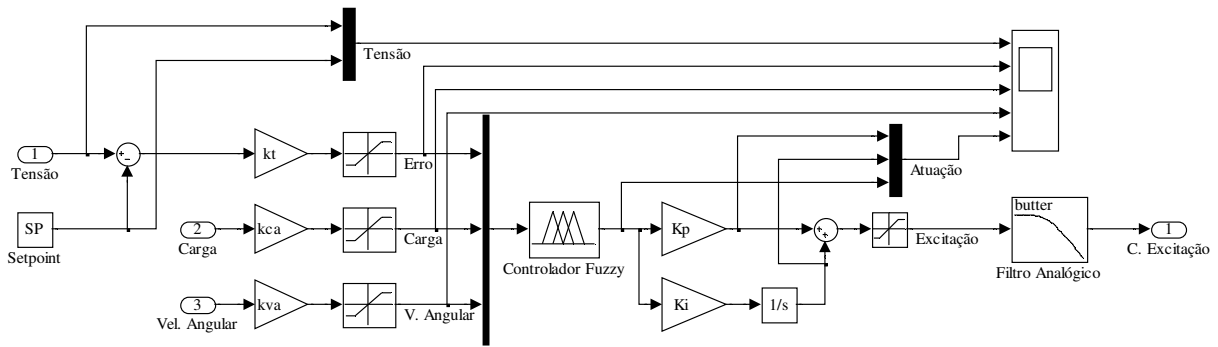


Figura 74 - Programa em linguagem Simulink do controlador *Fuzzy*

Na Figura 75, a estratégia de controle *fuzzy* foi incorporada ao modelo do alternador. A variável manipulada foi a corrente de excitação de campo, correspondente à saída do subsistema de controle *fuzzy*. As variáveis de entrada do modelo são normalizadas no subsistema “Normalizar”, juntamente com a variável manipulada. O subsistema “Modelo de Ordem Zero” contém o modelo matemático do alternador e fornece a tensão de saída a partir das variáveis corrente de carga, velocidade angular e corrente de excitação, normalizadas.

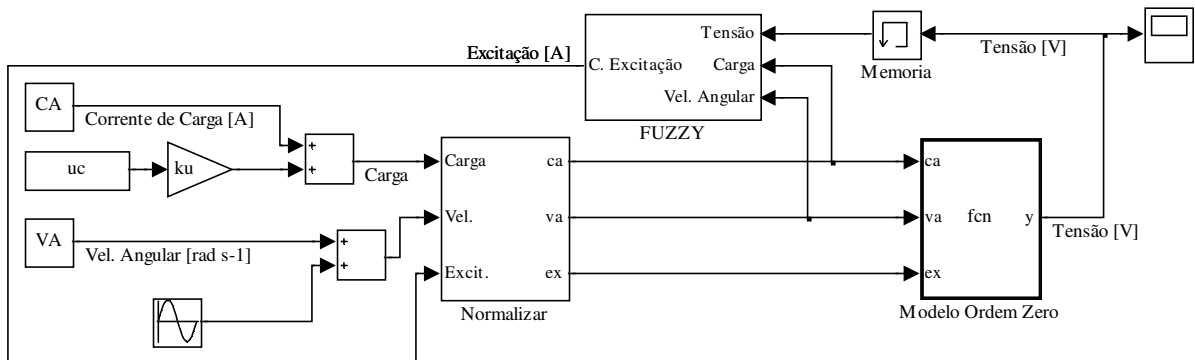


Figura 75 - Programa em linguagem Simulink do sistema de controle *fuzzy* acoplado ao modelo do alternador, com entradas de referência e distúrbios

A Figura 76 apresenta o resultado da simulação da tensão de saída do alternador, quando o mesmo é submetido a uma variação da corrente de carga, na forma de uma rampa (com taxa de $2A s^{-1}$), aplicada em duas etapas, entre 54 e 60A e entre 60 e 66A.

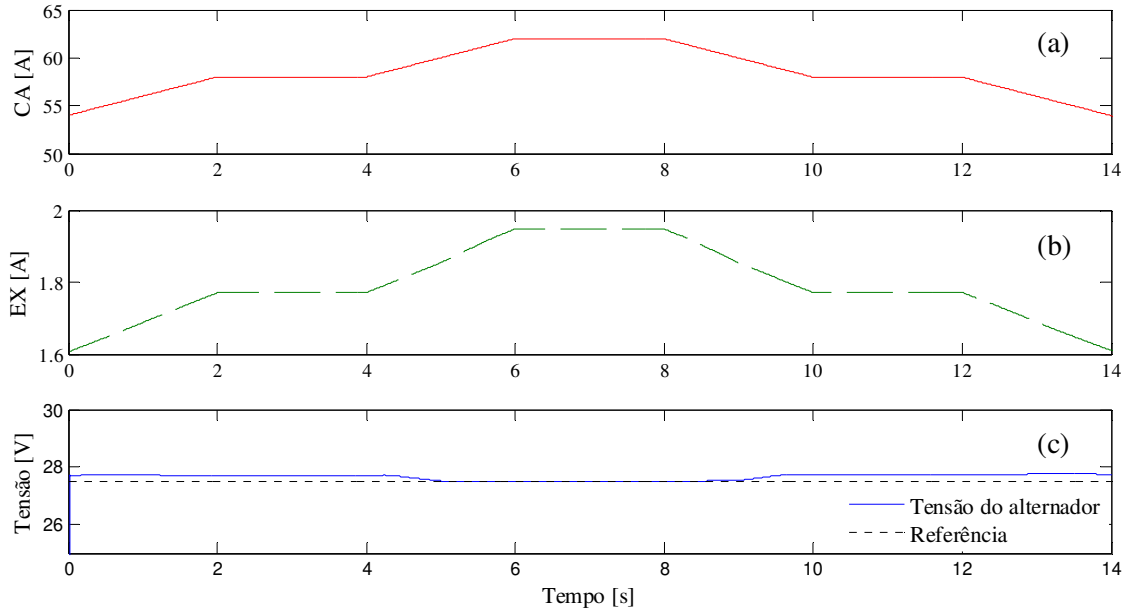


Figura 76 - Resposta da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo rampa na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Nos testes com distúrbio tipo rampa, observou-se que a tensão de saída gerada praticamente não sofreu variações em função da variação da corrente de carga. A saída apresentou uma pequena redução da tensão nominal, na ocorrência de elevação da corrente de carga. Tal comportamento da saída foi programado nas regras do controlador *fuzzy* já que, pelo conhecimento especialista, quando o sistema opera com cargas elevadas, há possibilidade somente de redução da mesma, o que provocaria um acréscimo da tensão gerada, com risco de danos aos dispositivos elétricos.

Observa-se também a atuação do controlador *fuzzy* sobre a corrente de excitação de campo, no sentido de manter a tensão gerada dentro dos limites definidos para o controlador.

A Figura 77 apresenta o resultado da simulação da tensão de saída do alternador quando o mesmo é submetido a uma variação da corrente de carga na forma degraus, crescentes e decrescentes, com amplitudes de 1,8; 4,8 e 10,8A, consecutivamente.

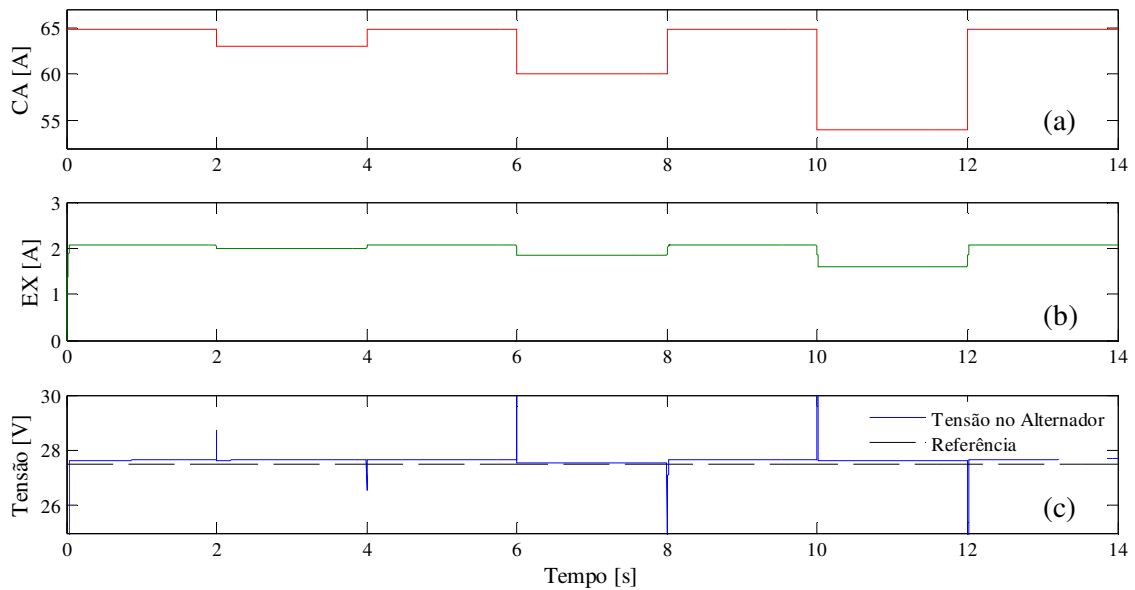


Figura 77 - Resposta da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo degrau na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Nos testes com distúrbio tipo degrau, observou-se que a tensão de saída gerada praticamente não sofreu variações em função da variação da corrente de carga. Nota-se ainda que, nos momentos onde ocorreram alívios repentinos da carga, a tensão de saída simulada apresentou surtos, cuja magnitude atingiu até $2V_{cc}$. Entende-se que tal comportamento decorre do fato de se utilizar um modelo de ordem zero, portanto sem dinâmica, ocasionando respostas instantâneas às solicitações de entrada.

Finalmente, simulou-se a tensão de saída gerada em função de variações senoidais na velocidade angular de acionamento do alternador, de forma a considerar flutuações da velocidade angular da tomada de potência de um trator agrícola. A Figura 78 ilustra os resultados da simulação frente a distúrbios senoidais da velocidade angular de acionamento do alternador.

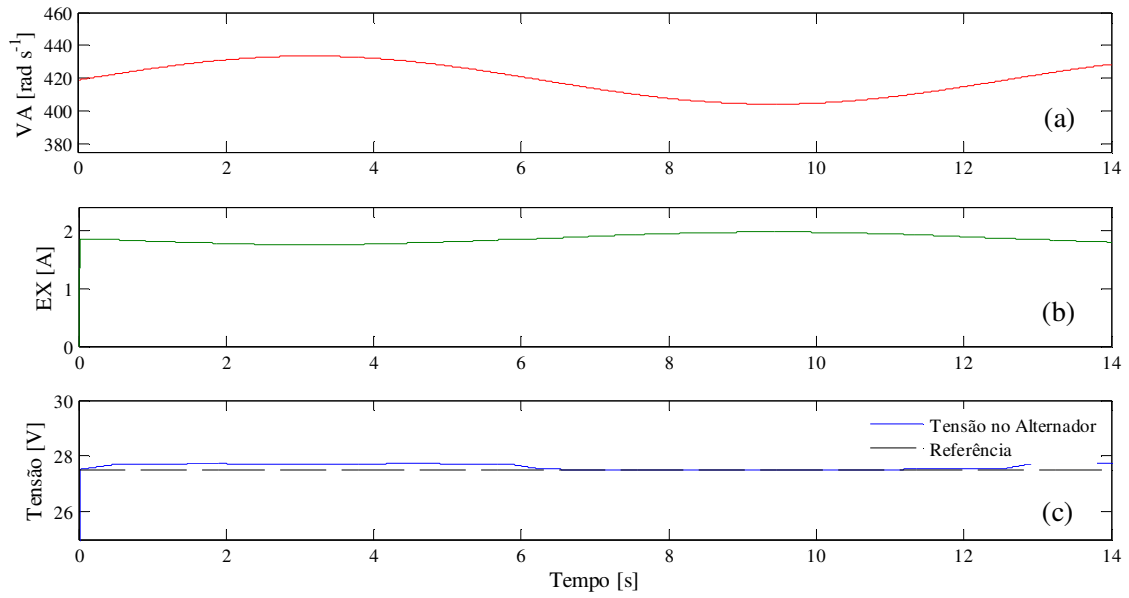


Figura 78 - Resposta da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo senoidal na velocidade angular do eixo de acionamento do alternador: (a) distúrbio de velocidade angular; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Observa-se, neste caso, que a tensão de saída gerada sofreu pequenas variações, podendo-se verificar ainda que o controlador *fuzzy* incrementa, convenientemente, a corrente de excitação de campo, de forma à manter a tensão gerada nos níveis estipulados para o funcionamento do mesmo.

5.9 Implementação do controlador *Fuzzy*

A Figura 79 apresenta os resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo rampa na corrente de carga, obtidos nos testes realizados na bancada experimental.

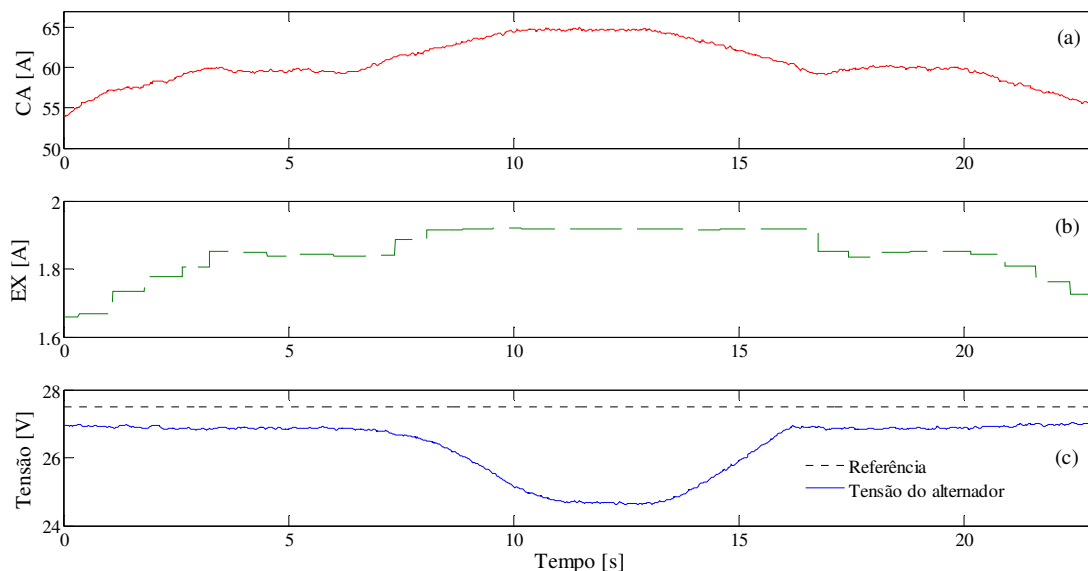


Figura 79 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo rampa na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

O comportamento da tensão gerada foi similar ao obtido na simulação. Observou-se, porém, que houve uma queda mais acentuada da tensão para o patamar superior da corrente de carga. Tal comportamento pode ter sido causado por eventuais não linearidades decorrentes da saturação magnética do rotor, não contempladas no modelo matemático. Contudo, a tensão gerada manteve-se dentro dos limites previamente estabelecidos para o sistema.

Na Figura 80 podem-se verificar os resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio aleatório na corrente de carga, obtidos nos testes realizados na bancada experimental.

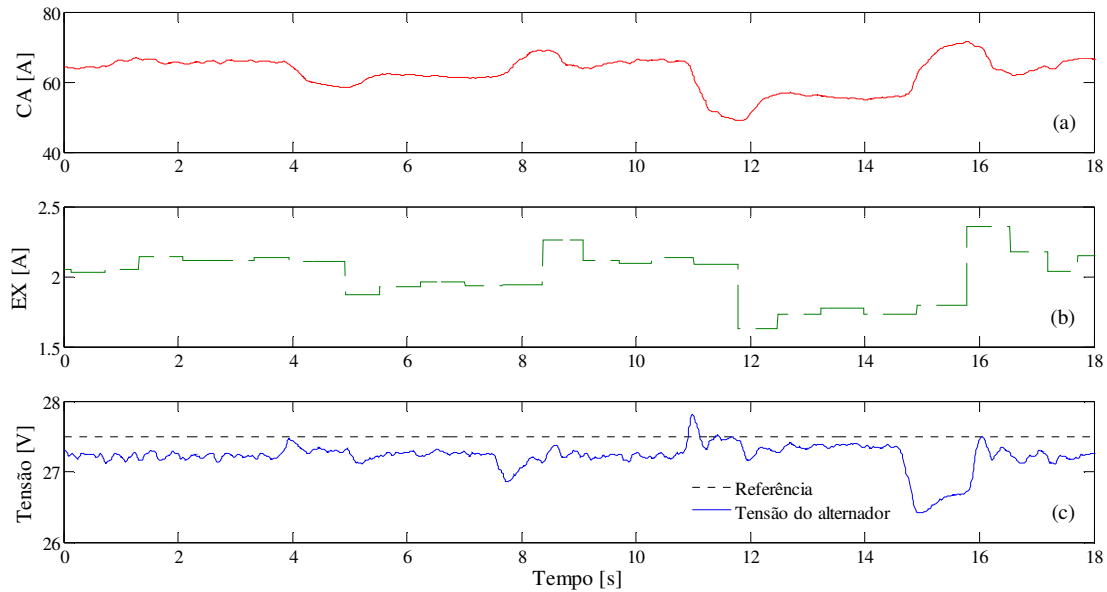


Figura 80 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio aleatório na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Analisando-se os resultados, verifica-se que a tensão gerada manteve-se dentro dos limites de tensão estabelecidos, sob a ocorrência de variações abruptas da corrente de carga. Observa-se ainda um atraso na resposta do sistema quanto à correção da corrente de excitação de campo, o que implica em variações momentâneas da tensão de saída. Este atraso é decorrente do tempo de processamento computacional do controle *fuzzy*, podendo ser minimizado com utilização de equipamentos com maior capacidade de processamento ou ainda com sistemas dedicados para controle *fuzzy*.

Na Figura 81 são apresentados os resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo variação senoidal da velocidade angular, obtidos nos testes realizados na bancada experimental.

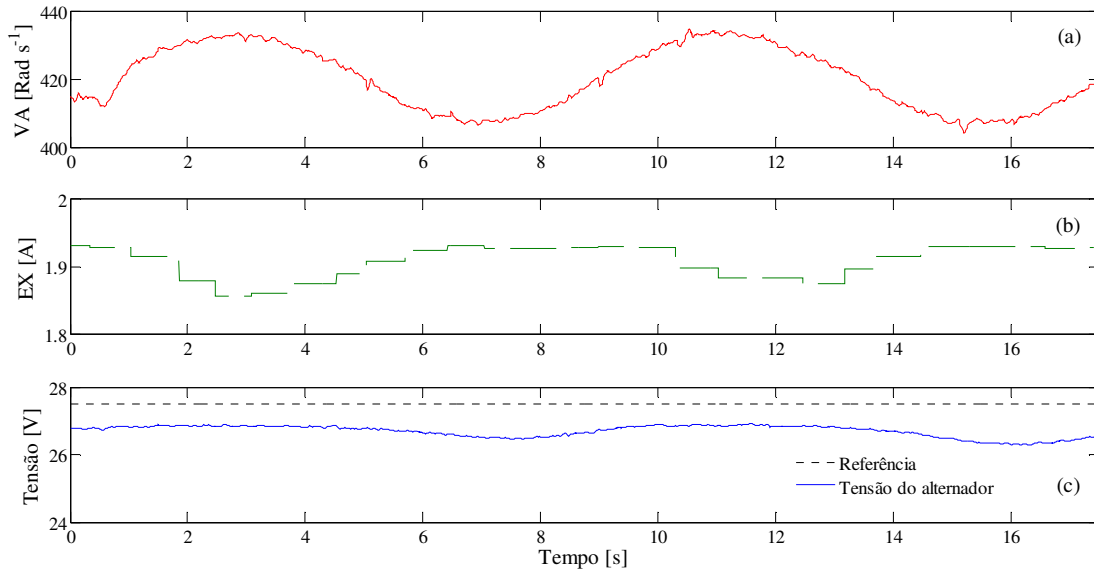


Figura 81 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a um distúrbio do tipo senoidal na velocidade angular do eixo de acionamento do alternador: (a) distúrbio de velocidade angular; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Os resultados obtidos mostram que a tensão de saída apresentou uma variação com comportamento senoidal, proporcional à velocidade angular de acionamento do alternador. Tal variação se manteve dentro dos limites estipulados para o projeto.

A Tabela 10 apresenta os valores dos índices de desempenho para a tensão de saída, frente à diferentes distúrbios de corrente de carga e velocidade angular de acionamento do alternador, para o controlador *fuzzy*.

Tabela 10 - Índices de desempenho para os resultados experimentais para a tensão gerada frente aos distúrbios de corrente de carga, tipo rampa e degrau, e distúrbio senoidal de velocidade angular de acionamento

Distúrbios	IAE	ISE	ITAE	MSE
Rampa de carga	4008,06	7283,70	26,58	2,19
Degrau de carga	715,69	269,53	5,09	0,11
Velocidade angular	2078,53	1743,72	14,01	0,67

Os valores obtidos para os índices de desempenho permitem concluir que o desempenho do controlador *fuzzy* foi superior ao do controlador do tipo liga-desliga para a corrente de excitação de campo.

Foram realizados testes complementares a fim de avaliar o comportamento da tensão gerada na ocorrência de perturbações de grande amplitude na corrente de carga. Para tanto, foram considerados degraus, de decremento e incremento, com amplitudes de 11,7 e 31,1A, considerados em relação a uma corrente nominal de 70A (Figura 82).

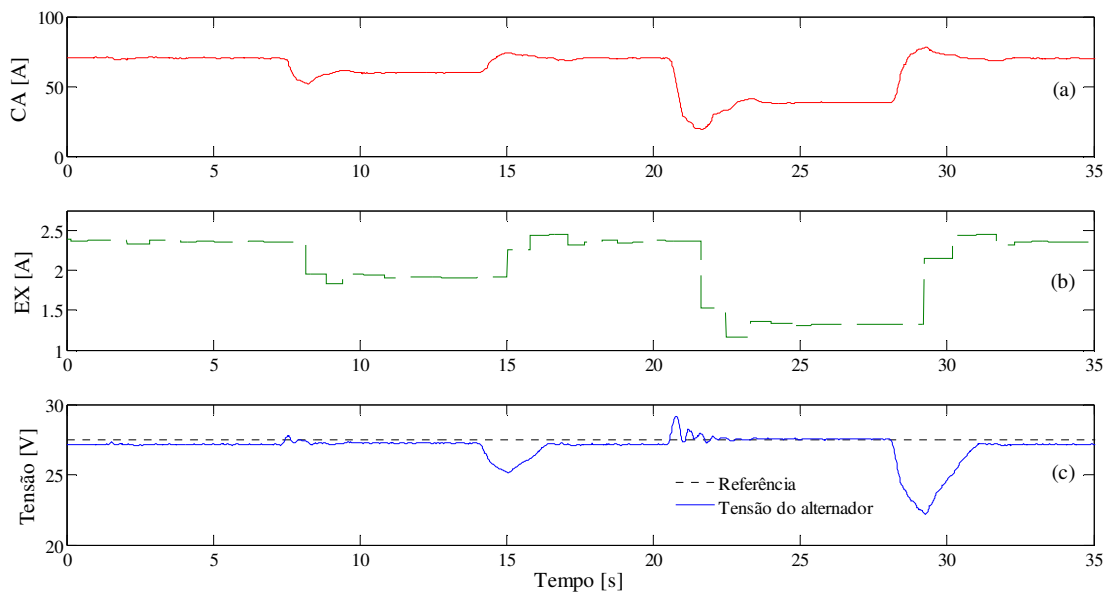


Figura 82 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a distúrbios do tipo degraus de grande amplitude na corrente de carga: (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Nos testes, observou-se que a tensão de saída apresentou pequenas variações, com tendência de diminuição do valor nominal, na ocorrência de grandes aumentos da corrente de carga. A tensão gerada atingiu o valor mínimo de aproximadamente 22,2Vdc, após a aplicação do degrau de 31,1A, na corrente de carga, retornando rapidamente ao valor nominal de trabalho. Nestes resultados, apesar do controlador operar fora da faixa definida para a variação de corrente de carga, ou seja, não coberto adequadamente pelas regras *fuzzy*, o desempenho do mesmo foi satisfatório.

Outro experimento realizado foi com o intuito de se avaliar o comportamento da tensão gerada para variações da corrente de carga fora da faixa de valores considerados para a obtenção do modelo matemático e, conseqüentemente, fora da abrangência das regras do controlador *fuzzy*. A Figura 83 apresenta os resultados decorrentes do teste que considerou a ocorrência de distúrbios de corrente da carga de 25A, decrescentes e crescentes, para uma corrente nominal de 30A. Esta corrente é bastante inferior à corrente nominal (66A), considerada para o projeto do controlador *fuzzy*.

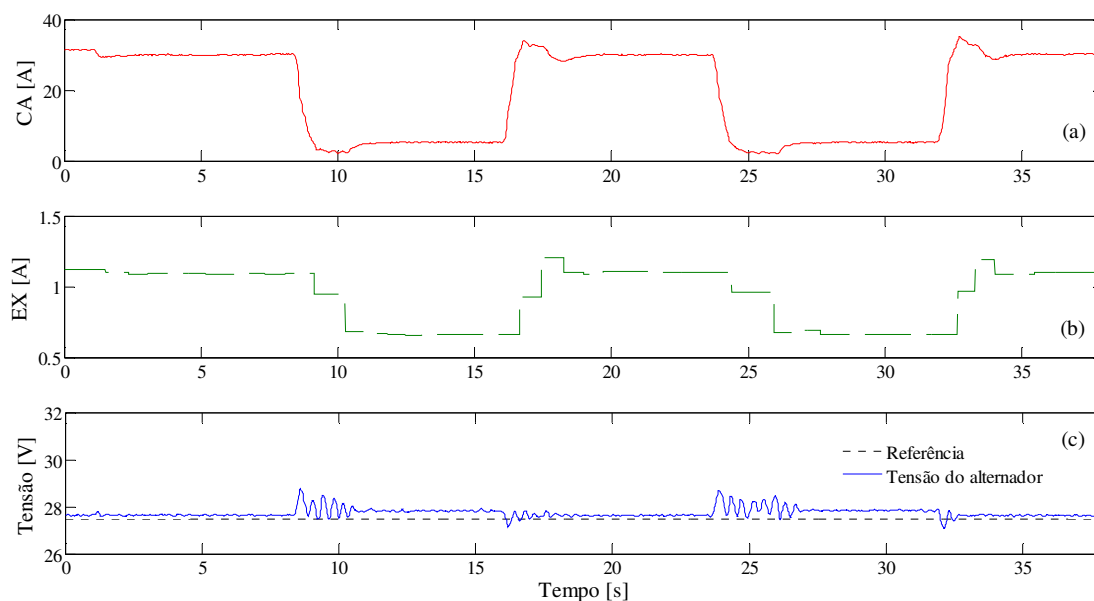


Figura 83 - Resultados experimentais da tensão gerada pelo alternador frente a distúrbios do tipo degraus de grande amplitude na corrente de carga; (a) distúrbio de corrente de carga; (b) corrente de excitação de campo do alternador fornecida pelo controlador *fuzzy*; (c) tensão gerada pelo alternador e o sinal de referência

Destaca-se, nestes testes, que a variação da tensão gerada foi da ordem de 1Vcc, comprovando a eficácia do controlador *fuzzy* desenvolvido, mesmo sob condições de operação fora da faixa definida, durante a etapa de projeto.

Comparando-se os resultados do sistema de controle de excitação *fuzzy*, com o sistema liga-desliga, original do alternador, verifica-se nitidamente, um incremento de desempenho, com melhor capacidade do mesmo em manter a tensão de saída na faixa de operação, na ocorrência de distúrbios de corrente de carga e velocidade angular de acionamento.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos e discutidos no presente trabalho permitem concluir que:

- Tecnicamente é viável se obter energia elétrica junto a um implemento agrícola, a partir da tomada de potência do trator, por meio de um alternador veicular, sem a necessidade da utilização de baterias e com um sistema de controle *fuzzy* da corrente de excitação de campo, capaz de manter a tensão de saída dentro dos limites de operação toleráveis;
- A bancada experimental desenvolvida foi adequada para a realização dos testes em laboratório;
- O sistema de instrumentação bancada mostrou-se adequado para os testes realizados;
- A adaptação realizada no alternador veicular, com respeito ao fluxo de ar, foi eficaz, já que não comprometeu sua capacidade de arrefecimento;
- A adaptação realizada no alternador veicular, com respeito à excitação externa da corrente de campo, mostrou-se adequada;
- O procedimento adotado para identificação do modelo matemático experimental foi adequado, pois foi possível obter o modelo da tensão gerada em função da corrente de excitação de campo, da corrente de carga e da velocidade angular de acionamento do alternador, com pequenos erros de estimação, conforme constatarem as respectivas validações experimentais;
- O procedimento experimental utilizado foi adequado para a obtenção do comportamento do controlador liga-desliga do sistema original do alternador veicular, assim como, também foi adequado o procedimento para obtenção de seu desempenho simulado;
- A base de regras, utilizada no controlador *fuzzy*, estabelecida a partir do conhecimento especialista, foi determinante no bom desempenho do controlador *fuzzy* projetado;

- O controlador *fuzzy* projetado permitiu considerar tanto a corrente de carga, quanto a velocidade angular de acionamento do alternador para o estabelecimento da corrente de excitação do campo. Isto, associado ao conhecimento especialista capturado na base de regras, diferentemente das estratégias de controle convencionais (liga-desliga, PI, PID), permitiu a utilização de um sistema inteligente de múltiplas entradas menos susceptível aos distúrbios de corrente de carga e velocidade angular de acionamento.

7 BIBLIOGRAFIA

- BABUŠKA, R.; VERBRUGGEN, H. Neuro-fuzzy methods for nonlinear system identification. *Annual Reviews in Control* 27 (2003) 73–85.
- BARRA JUNIOR, W. Controle *FUZZY* aplicado à melhoria da estabilidade dinâmica em sistemas elétricos de potência. *Revista Controle & Automação*/ Vol.16 no.2/Abril, Maio e Junho 2005
- BODRIA, L.; FIALA M. CLUB OF BOLOGNA: ELECTRIC TRANSMISSIONS IN OUR FUTURE, *Machinery World*. 2010.
- BUNING, E.A. Club of Bologna: Electric drives in agricultural machinery approach from the tractor side, 21st Annual Meeting Bologna, EIMA International, 2010.
- COGO, J.R; DE ALMEIDA, A.T.L; BERNARDES, D.F. Rendimento de geradores para micro centrais elétricas. *Rev. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico*. v. 13, p. 21-36, 1986.
- COMITRE, V. **Informações Econômicas**, SP, v.25, n.12, dez. 1995.
- DRAPINSK, J., **Hidráulica e pneumática industrial e móvel**, São Paulo, SP, MacGraw Hill do Brasil, 1977, 287p.
- ELMAS, C.; USTUN, O. A hybrid controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor drive. Department of Electric, Faculty of Technology, Gazi University, 06500 Besevler, Ankara, April 2007.
- EMINOĞLU, İ.; ALTAŞ, İ. The effects of number of rules on the output of a *Fuzzy* logic controller employed to a PM d.c. motor. **Computers & Electrical Engineering**, NY, USA, n. 24, p. 245-261, 1998.

- FÉO, A.E. Implementação de um estabilizador de sistemas de potência utilizando Compensador *Fuzzy* com características Lead/Lag, Itajubá (MG):[s.n.], 2004. 116 p.: il.
- GARCIA, A. P. **Desenvolvimento de um sistema de controle eletro-mecânico para dosador de fertilizantes**. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- GARCIA, A. P **Sistemas de controle *Fuzzy* para dosadores helicoidais de fertilizantes com acionamento elétrico**. 96p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- GÖTZ, M.; MÜLLER, A. M.; ABELE, M. Electrification of a tractor and implement - The ZF project Electra. VDI-Berichte, 2011.
- GUGEL, R.; DEERE, J., Infinitely variable PTO transmission, VDI Congress, Transmission in Vehicles, Friedrichshafen, 2010.
- JAGER, R. **fuzzy logic in control**. Thesis Technische. Universiteit Delft, 1995.
- KOSOW, Irving. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**, São Paulo, SP, Editora Globo S.A.,2011.
- LEITE, M.S. Estudo comparativo do desempenho de controladores Fuzzy e convencional aplicados em um bioprocessos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- MARK, O. Electricity-generating tractors are coming. Farmers Weekly, p. 1-5, january, 2012.Disponível em: <http://www.fwi.co.uk/Articles/20/01/2012/130992/Electricity-generating-tractors-are-coming.htm>. Acesso em: 20 Set.

- MENEGHETTI, C.R. Estratégias de controle em câmara de refrigeração por compressão de vapor. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- MOUTINHO, M.N.; DA COSTA, C.T.; BARRA, W.; BARREIROS, J.A.L. "Self-tuning Control Methodologies Applied to the Automatic Voltage Control of a Synchronous Generator" Latin America Transactions. IEEE (Revista IEEE América Latina), vol.6, no.5, pp.408-418, Sept. 2008.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª. Edição. Pearson Prentice Hall, São Paulo-SP, 2003.
- OLIVA, R. A. G.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.. **Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis** – Adaptação de um modelo comercial convencional. In XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2001 Foz do Iguaçu. **Anais...** Jaboticabal – SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, 2001.
- OMAN, H. IEEE AES **Systems Magazine** USA. 1998, p. 39.
- PEREIRA FILHO, R.D. **Desenvolvimento e implementação de controladores nebulosos em uma coluna piloto de destilação em batelada**. Dissertação (Mestrado em Sistema de Processos Químicos e Informática) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- ROMANINI, C.E.B. **Desenvolvimento de um sistema de controle fuzzy para incubadora de ovos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- RUSSO, E. **Desenvolvimento de um módulo de interface para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis**. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2005.

- SCHAEFER, R.C.; KIYONG. K. "Excitation control of the synchronous generator" Industry Applications Magazine, IEEE , vol.7, no.2, pp.37-43, Mar/Apr 2001.
- SERRA, G.L.O. **Propostas de metodologias para identificação e controle inteligentes.** Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- SIURU, B., Taking hybrids to the farm. Diesel Progress North American Edition, december 42-43, 2011.
- SHRUD, M.A.; BOUSBAINE, A.; ASHUR, A.S.; THORN, R.; KHARAZ, A.; , "42V power system architecture development," Automotive Electronics, 2007, 3rd Institution of Engineering and Technology Conference on , vol., no., pp.1-17, 28-29, June 2007.
- SOBOTZIK, J. Electric Drives - Potentials on tractors and implements. Munich, Germany. 2010
- STEWART, C."Automatic voltage control of generators" Electrical Engineers Part I: General, Journal of the Institution of , vol.94, no.83, pp.549-550, November 1947.
- UMEZU, C.K.; CAPPELLI, N.L.. Desenvolvimento de um sistema para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis. In: BALASTREIRE, Luiz Antonio. (Org.). **Avanços na agricultura de precisão na Brasil no período de 1999-2001.** Piracicaba, 2006, p. 223-229. CD-ROM.
- ZHANG, H; HU, B. The Application of Nonlinear PID Controller in Generator Excitation System, Energy Procedia, Volume 17, Part A, 2012, Pages 202-207.
- WHALEY, D.M.; SOONG, W.L.; ERTUGRUL, N. AUPEC 2004: Australasian Universities Power Engineering Conference, 2004.
- YAGER, R.R.; FILEV, D.P. Essentials of fuzzy modeling and control. Jhon Wiley e Sons, 1994.