

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

James Clerk Maxwell II

A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM

Florianópolis

1881

James Clerk Maxwell II

A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Albert Einstein, Dr.
Ing.

Florianópolis

1881

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Maxwell, James Clerk

A Treatise on Electricity and Magnetism / James Clerk
Maxwell ; orientador, Albert Einstein ; co-orientador,
Paulo Coelho. - Florianópolis, SC, 1881.
200 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Engenharia Elétrica. 3.
Conversores Estáticos. 4. Transmissão de Energia. I.
Einstein, Albert. II. Coelho, Paulo. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

James Clerk Maxwell II

A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de março 1881.

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Nikola Tesla, Me. Eng.
Presidente

Prof. Albert Einstein, Dr. Ing.
Orientador

Prof. Benjamin Franklin, Dr. Sc.

Prof. Ivo Barbi, Dr.-Ing.

Prof. Johann Walter Kolar, Dr. Ing.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao povo brasileiro que, com sua total ignorância, paga impostos absurdos financiado pesquisas que tem pouca utilidade prática.

Calma aí fera, tá muito exaltado.

Paulo Coelho

Resumo

Aqui tem um pequeno resumo sobre o trabalho onde tento, de forma desesperada, justificar porque passei um ano trabalhando em um assunto para mostrar resultados tão rasos.

Palavras-chave: Sistemas de excitação, retificador de tensão trifásico, alto fator de potência, modulação vetorial, modelo em coordenadas síncronas (dq0), CDS F2812.

Abstract

Here is a short summary of the work which I try, the desperate way, justify why I spent a year working on a subject so shallow to show results.

Keywords: Excitation systems, current source rectifier, three-phase six-switch buck rectifier, high power factor, space vector modulation, dq0 model, DSC F2812

Lista de Figuras

Figura 1.1	Design de um armário.....	1
Figura 3.1	Exemplo de figura com legenda bem grande para ver o problema que pode ocorrer nas indentações. Espero que seja o suficiente.	8

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Descrição dos vetores do Retificador de Tensão Trifásico.....	2
Tabela 1.2	Intervalo de cada um dos setores.....	2
Tabela 3.1	Exemplo de tabela.....	7

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviatura/Sigla	Descrição
A/D	Analogico/Digital
AVR	Automatic Voltage Regulator - Regulador de Tensão Automático
ca	corrente alternada
cc	corrente contínua
CSR	<i>Current Source Rectifier</i> - Retificador Fonte de Corrente
DSC	<i>Digital Signal Controller</i> - Controlador Digital de Sinais
Eq.	<i>Equação</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transformer</i> - Transformada Rápida de Fourier
Fig.	<i>Figura</i>
FP	Fator de Potência
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> - Arranjo de Portas Programável em Campo
FTLA	Função de Transferência de Laço Aberto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> - Comissão Eletrotécnica Internacional
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada
INEP	Instituto de Eletrônica de Potência
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> - Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor
PFC	<i>Power Factor Correction</i> - Correção do Fator de Potência
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> - Malha Travada por Fase
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
RB-IGBT	<i>Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada com Bloqueio Reverso

Abreviatura/Sigla	Descrição
RTT	Retificador de Tensão Trifásico
RTBB	Retificador Trifásico Bidirecional Tipo Buck
SVM	<i>Space Vector Modulation</i> - Modulação Vetorial
Tab.	Tabela
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> - Distorção Harmônica Total
VMQI	Valor Médio Quase Instantâneo
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i> - Comutação sob tensão nula

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
ϕ	Defasagem imposta pelo filtro de entrada	rad
θ	Ângulo da corrente/tensão de entrada	rad
θ_{in}	Ângulo de referência do diagrama de blocos do q-PLL	rad
θ_o	Ângulo de saída do diagrama de blocos do q-PLL	rad
τ_o	Constante de Tempo do Enrolamento de Campo da Máquina Síncrona	s
ξ	Coefficiente de Amortecimento do Filtro de Entrada	-
ω_e	Frequência Angular de Entrada	rad/s
$\%THD_i$	Taxa de Distorção Harmônica da corrente de entrada	%
$at_{f_{sw}}$	Atenuação do filtro na frequência de comutação	-
C	Capacitância do filtro de entrada	F
C_g	Capacitor do Circuito de Grampeamento da tensão de saída	F
$C_i(s)$	Compensador do controle das correntes de entrada do RTT	-
$C_{io}(s)$	Compensador do controle da corrente de saída do RTT	-
C_{pll}	Compensador da malha de controle do PLL	-
$d_{1..6}$	Razão Cíclica do Interruptor $S_{1..6}$	-
$d_{a,b,c}$	Valor Médio Quase Instantâneo das funções de comutação dos braços a, b ou c	-
D_d	Ponto de Operação da função de comutação de braço de eixo direto	-
E_o	Energia armazenada no indutor de saída	J
\vec{d}_{abc}	Vetor dos VMQI das funções de comutação de braço do RTT em coordenadas abc	-
f_0	Frequência de corte do filtro de entrada	Hz
f_e	Frequência Linear de Entrada	Hz
f_{smp}	Frequência de Amostragem do Conversor Analógico/Digital	Hz
f_{sw}	Frequência de Comutação do Conversor	Hz
$G_{id}(s)$	Função de transferência de pequenos sinais de $i_{F,d}(s)/d_d(s)$	-

Símbolo	Descrição	Unidade
$G_{iq}(s)$	Função de transferência de pequenos sinais de $i_{F,q}(s)/d_q(s)$	-
$G_{p,i_o}(s)$	Modelo de pequenos sinais de i_o/d_d .	-
$G_{p,i_o}'(s)$	Modelo simplificado de pequenos sinais de i_o/d_d .	-
$G_{SVM}(s)$	Função de Transferência do Modulador SVM	-
$g_{1..6}$	Sinais de comando dos tiristores	-
$\vec{I}_{0..6}$	Vetores de corrente do Retificador de Tensão Tri-fásico	-
$H_{i_o}(s)$	Função de Transferência do circuito de aquisição da corrente de saída	-
i	Unidade imaginária complexa	-
i_α	Corrente de entrada do retificador no eixo α	A
i_β	Corrente de entrada do retificador no eixo β	A
i_γ	Corrente de entrada do retificador no eixo γ	A
i_A'	Corrente de entrada correspondente a fase 'A' de entrada referida ao lado primário do transformador	A
i_B'	Corrente de entrada correspondente a fase 'B' de entrada referida ao lado primário do transformador	A
i_C'	Corrente de entrada correspondente a fase 'C' de entrada referida ao lado primário do transformador	A
i_a	Corrente de entrada do retificador correspondente a fase 'a' de entrada	A
$I_{a,pk;fn}$	Valor de pico da componente fundamental da corrente de entrada do retificador	A
$I_{a,ef;fn}$	Valor eficaz da componente fundamental da corrente de entrada do retificador	A
i_b	Corrente de entrada do retificador correspondente a fase 'b' de entrada	A
i_c	Corrente de entrada do retificador correspondente a fase 'c' de entrada	A
$I_{F,d}$	Ponto de operação da corrente de entrada filtrada de eixo direto	A
$I_{F,q}$	Ponto de operação da corrente de entrada filtrada de eixo em quadratura	A
$i_{F,0}$	Corrente de entrada filtrada de modo comum	A
$i_{F,d}$	Corrente de entrada filtrada de eixo direto	A

Símbolo	Descrição	Unidade
$i_{F,q}$	Corrente de entrada filtrada de eixo em quadratura	A
$\vec{i}_{F,abc}$	Vetor das correntes de entrada filtradas do RTT em coordenadas abc	A
I_{\max}	Corrente Máxima	A
$I_{o,ref}$	Referência para o controle de corrente de saída	A
i_o	Corrente de Saída	A
\vec{I}_{ref}	Vetor de Referência	-
i_{s_n}	Corrente no interruptor S_n	A
$i_{s_n,ef}$	Corrente eficaz no interruptor S_n	A
$i_{s_n,md}$	Corrente média no interruptor S_n	A
K_{AD}	Ganho da conversão analógico/digital	
L	Indutância do filtro de entrada	H
$L_{leak1..3}$	Indutância de dispersão do transformador vista do lado secundário	H
M	Índice de Modulação	-
P_D	Perdas totais no diodo	W
$P_{D,cond}$	Perdas por condução no diodo	W
$P_{D,com}$	Perdas por comutação no diodo	W
P_S	Perdas totais no IGBT	W
$P_{S,cond}$	Perdas por condução no IGBT	W
$P_{S,com}$	Perdas por comutação no IGBT	W
p	Potência Instantânea	W
p_e	Potência instantânea de entrada do RTT	W
P_o	Potência Ativa Média na Saída do RTT	W
p_o	Potência instantânea de saída do RTT	W
q	potência reativa instantânea	ivar
R_g	Resistor do Circuito de Grampeamento da tensão de saída	Ω
R_s	Resistência Série do indutor do filtro de entrada	Ω
$R_{s,on}$	Resistência de condução do IGBT	Ω
$R_{d,on}$	Resistência de condução do diodo	Ω
R_{sd}	Resistência série da indutância de dispersão vista do lado secundário	Ω
$R_{sd,ad}$	Resistência Série adicional	Ω
$S_{1..6}$	Interruptores Controlados	-
$S_{\alpha_{1..4}}$	Interruptores controlados do Retificador de Tensão <i>Scott</i> Série	-

Símbolo	Descrição	Unidade
$S_{\beta 1..4}$	Interruptores controlados do Retificador de Tensão <i>Scott</i> Série	-
$S_{a 1..4}$	Interruptores controlados do Retificador de Tensão Trifásico Série	-
$S_{b 1..4}$	Interruptores controlados do Retificador de Tensão Trifásico Série	-
$S_{c 1..4}$	Interruptores controlados do Retificador de Tensão Trifásico Série	-
$s_{1..6}$	Função de comutação dos interruptores	-
s_a	Função de comutação correspondente ao braço ‘a’	-
s_b	Função de comutação correspondente ao braço ‘b’	-
s_c	Função de comutação correspondente ao braço ‘c’	-
$T_{1..6}$	Tiristores controlados	-
$\mathbf{T}_{\frac{\alpha\beta\gamma}{abc}}$	Matriz da Transformada de <i>Clarke</i>	-
$\mathbf{T}_{\frac{abc}{dq0}}$	Matriz da Transformada inversa de <i>Park</i>	-
$\mathbf{T}_{\frac{dq0}{abc}}$	Matriz da Transformada de <i>Park</i>	-
$T_{N,M}$	Tempo de aplicação do vetor N no setor M , para um período de comutação	s
T_{sw}	Período de comutação	s
$V_{C,max}$	Tensão máxima sobre o capacitor de filtragem	V
$V_{LL,max}$	Valor eficaz da Tensão de linha na entrada	V
$V_{d,on}$	Tensão de condução do diodo	V
V_{ef}	Valor eficaz da tensão de fase de alimentação	V
V_g	Tensão de Grampeamento da tensão de saída	V
V_{max}	Tensão de fase máxima	V
V_o	Valor médio da Tensão de Saída	V
$V_{s,on}$	Tensão de condução do IGBT	V
v_A'	Tensão da fase ‘A’ do lado primário do transformador de excitação	V
v_B'	Tensão da fase ‘B’ do lado primário do transformador de excitação	V
v_C'	Tensão da fase ‘C’ do lado primário do transformador de excitação	V
$\vec{v}_{F,abc}$	Vetor das tensões de fase de alimentação do RTT em coordenadas abc	V
v_α	Tensão na entrada do retificador no eixo α	V
v_β	Tensão na entrada do retificador no eixo β	V
v_a	Tensão de Entrada na Fase ‘a’ do Retificador	V
v_b	Tensão de Entrada na Fase ‘b’ do Retificador	V

Símbolo	Descrição	Unidade
v_c	Tensão de Entrada na Fase ‘c’ do Retificador	V
v_{ce}	Tensão entre coletor e emissor do IGBT	V
v_n	Tensão de modo comum do retificador	V
v_o	Tensão de Saída	V
v_s	Tensão sobre o interruptor	V
$V_{s_n,max}$	Tensão máxima sobre o interruptor S_n	V
$\langle x_n \rangle$	Valor médio quase instantâneo de uma variável x_n	-

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
2 CAPÍTULO 02	3
2.1 TESTE2	3
2.1.1 Teste3	3
2.1.1.1 Teste4	3
2.1.1.1.1 Teste5	4
2.1.1.1.2 Teste6	4
3 CAPÍTULO 3	5
3.1 TÍTULOS E SUBTÍTULOS DAS SEÇÕES - ISSO PODE FEDER DE UMA FORMA NUNCA VISTA, SE TU NÃO PRESTARES ATENÇÃO	5
3.2 CORPO DO TEXTO	6
4 CAPÍTULO 4	9
5 CAPÍTULO 5	11
6 CAPÍTULO 6	13
7 RESULTADOS	15
8 CONCLUSÃO	17
REFERÊNCIAS	19
APÊNDICE A – Discretização do controlador PI	23

1 INTRODUÇÃO

Revisão bibliografica dos principais.

Umas figura de Exemplo:

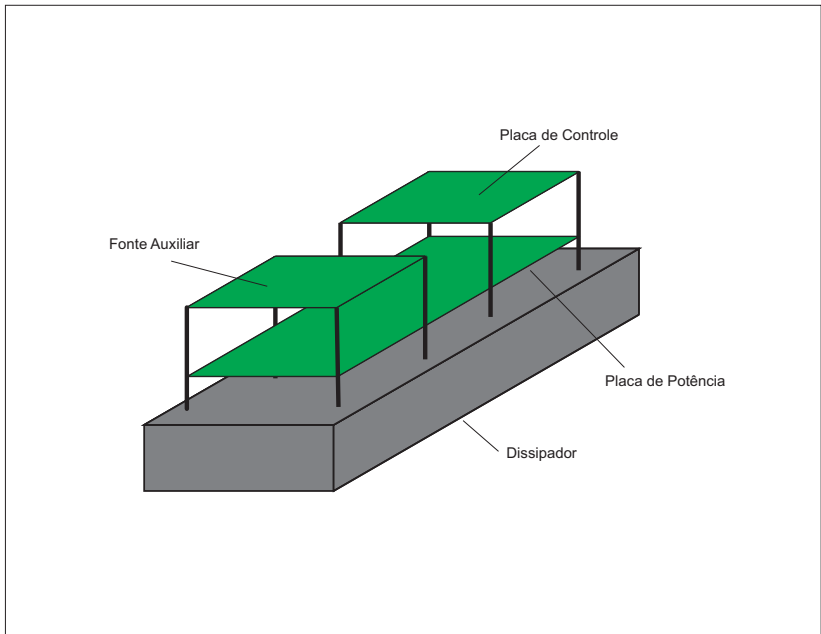


Figura 1.1 – Design de um armário.

O armário indicado na figura 1.1 tem um design bem interessante, segundo [1].

Uma tabelinha bem legal.

Tabela 1.1 – Descrição dos vetores do Retificador de Tensão Trifásico.

Vetor	Interruptores em condução	Correntes de Entrada					Forma Polar
		abc			$\alpha\beta$		
		i_a	i_b	i_c	i_α	i_β	
\vec{I}_1	S_1, S_6	I_o	0	$-I_o$	I_o	$\frac{\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle 30^\circ$
\vec{I}_2	S_2, S_6	0	I_o	$-I_o$	0	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle 90^\circ$
\vec{I}_3	S_2, S_4	$-I_o$	I_o	0	$-I_o$	$\frac{\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle 150^\circ$
\vec{I}_4	S_3, S_4	$-I_o$	0	I_o	$-I_o$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle -150^\circ$
\vec{I}_5	S_3, S_5	0	$-I_o$	I_o	0	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle -90^\circ$
\vec{I}_6	S_1, S_5	I_o	$-I_o$	0	I_o	$-\frac{\sqrt{3}}{3} I_o$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} I_o \angle -30^\circ$
\vec{I}_0	S_1, S_4						
	S_2, S_5	0	0	0	0	0	$0 \angle 0^\circ$
	S_3, S_6						

Outra mais simplezinha.

Tabela 1.2 – Intervalo de cada um dos setores.

Setor	Ângulo
1	$-30^\circ a 30^\circ$
2	$30^\circ a 90^\circ$
3	$90^\circ a 150^\circ$
4	$150^\circ a 210^\circ$
5	$210^\circ a 270^\circ$
6	$270^\circ a -30^\circ$

2 CAPÍTULO 02

Os Anais do CONEM 2010 serão publicados em CDROM, usando o formato AdobeTM PDF.

Os artigos devem ser rigorosamente formatados de acordo com estas instruções e este arquivo texto pode ser usado como um template por usuários do Microsoft WordTM e, em qualquer caso, como um modelo para os usuários de outros softwares processadores de texto.

Os artigos estão limitados a um máximo de 10 páginas, incluindo tabelas e figuras. O arquivo final em formato pdf não deve exceder 2,5 MB.

A língua oficial do congresso é o Português, entretanto serão aceitos manuscritos em Espanhol ou em Inglês. Se o trabalho não for escrito em inglês, o autor deverá incluir o título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras-chave, traduzidos para o inglês, após a lista de referências, no fim do artigo.

2.1 TESTE2

Texto de seção para teste

2.1.1 Teste3

Texto de subseção para teste

Este é um exemplo de citação. Só utilize este ambiente se a sua citação tiver mais de 3 linhas.

2.1.1.1 Teste4

Texto de subsubseção para teste

2.1.1.1.1 Teste5

Texto de subsubsubseção para teste

2.1.1.1.2 Teste6

aqui segue o barco do parágrafo normal

3 CAPÍTULO 3

O artigo deve ser digitado em papel tamanho A4, usando a Fonte Times New Roman, tamanho 10, exceto para o título, nome de autores, instituição, endereço, resumo e palavras-chave, que têm formatações específicas indicadas acima. Espaço simples entre linhas deve ser usado ao longo do texto.

O corpo de texto que contém o título deve ser centralizado, em parágrafo com recuo esquerdo de 0,1 cm e marcado com borda esquerda de largura $2\frac{1}{4}$ pontos.

O corpo de texto que contém os nomes de autores e de instituições devem ser alinhados à esquerda, em parágrafo com recuo esquerdo de 0,1 cm e marcados com borda esquerda de largura $2\frac{1}{4}$ pontos.

A primeira página tem margem superior igual a 5 cm, e todas as outras margens (esquerda, direita e inferior) iguais a 2 cm. Todas as demais páginas do trabalho devem ter todas as suas margens iguais a 2 cm.

3.1 TÍTULOS E SUBTÍTULOS DAS SEÇÕES - ISSO PODE FEDER DE UMA FORMA NUNCA VISTA, SE TU NÃO PRESTARES ATENÇÃO

Os títulos e subtítulos das seções devem ser digitados em formato Times New Roman, tamanho 10, estilo negrito, e alinhados à esquerda. Os títulos das seções são com letras maiúsculas (Exemplo: **MODELO MATEMÁTICO**), enquanto que os subtítulos só têm as primeiras letras maiúsculas (Exemplo: **Modelo Matemático**). Eles devem ser numerados, usando numerais arábicos separados por pontos, até o máximo de 3 subníveis. Uma linha em branco de espaçamento simples deve ser incluída acima e abaixo de cada título/subtítulo.

3.2 CORPO DO TEXTO

O corpo do texto é justificado e com espaçamento simples. A primeira linha de cada parágrafo tem recuo de 0,6 cm contado a partir da margem esquerda.

As equações matemáticas são alinhadas à esquerda com recuo de 0,6 cm. Elas são referidas por Eq. (1) no meio da frase, ou por Equação (1) quando usada no início de uma sentença. Os números das equações são numerais arábicos colocados entre parênteses, e alinhados à direita, como mostrado na Eq. (1).

Os símbolos usados nas equações devem ser definidos imediatamente antes ou depois de sua primeira ocorrência no texto do trabalho.

O tamanho da fonte usado nas equações deve ser compatível com o utilizado no texto. Todos os símbolos devem ter suas unidades expressas no sistema S.I. (métrico).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1)$$

As tabelas devem ser centralizadas. Elas são referidas por Tab. (1) no meio da frase, ou por Tabela (1) quando usada no início de uma sentença. Sua legenda é centralizada e localizada imediatamente acima da tabela. Anotações e valores numéricos nela incluídos devem ter tamanhos compatíveis com o da fonte usado no texto do trabalho, e todas as unidades devem ser expressas no sistema S.I. (métrico). As unidades são incluídas apenas na primeira linha ou primeira coluna de cada tabela, conforme for apropriado. As tabelas devem ser colocadas tão perto quanto possível de sua primeira citação no texto. Deixe uma linha simples em branco entre a tabela, seu título e o texto.

O estilo de borda da tabela é livre. As legendas das Figuras e das Tabelas não devem exceder 3 linhas.

As figuras são centralizadas. Elas são referenciadas por Fig. (1) no meio da frase ou por Figura (1) quando usada no início de uma sen-

Tabela 3.1 – Exemplo de tabela

Propriedades do compósito	CFRC-TWILL	CFRC-4HS
Resistência à Flexão (MPa)	209± 10	180 ± 15
Módulo de Flexão (GPa)	57.0 ± 2.8	18.0 ± 1.3

tença. Sua legenda é centralizada e localizada imediatamente abaixo da figura. As anotações e numerações devem ter tamanhos compatíveis com o da fonte usada no texto, e todas as unidades devem ser expressas no sistema S.I. (métrico). As figuras devem ser colocadas o mais próximo possível de sua primeira citação no texto. Deixe uma linha em branco entre as figuras e o texto.

Figuras coloridas e fotografias de alta qualidade podem ser incluídas no trabalho. Para reduzir o tamanho do arquivo e preservar a resolução gráfica, converta os arquivos das imagens para o formato GIFF (para figuras com até 16 cores) ou para o formato JPEG (alta densidade de cores), antes de inseri-los no trabalho. A citação das referências no corpo do texto pode ser feita nos formatos: ?, mostra que o corpo..., ou: Vários trabalhos [?], [?], [?] mostram que a rigidez da viga.

Referências aceitas incluem: artigos de periódicos [2], dissertações, teses [3]–[6], artigos publicados em anais de congressos, livros, comunicações privadas, publicações na web [7] e artigos submetidos e aceitos (identificar a fonte) [8]–[12].

A lista de referências é uma nova seção denominada Referências, localizada no fim do artigo.

A primeira linha de cada referência é alinhada à esquerda; todas as outras linhas têm recuo de 0,6 cm da margem esquerda. Todas as referências incluídas na lista devem aparecer como citações no texto do trabalho.

As referências devem ser postas < > em ordem alfabética, usando o último nome do primeiro autor, seguida do ano da publicação. Exemplo da lista de referências é apresentado abaixo [11].



Figura 3.1 – Exemplo de figura com legenda bem grande para ver o problema que pode ocorrer nas indentações. Espero que seja o suficiente.

4 CAPÍTULO 4

5 CAPÍTULO 5

6 CAPÍTULO 6

7 RESULTADOS

Bla Blah.

8 CONCLUSÃO

Visto a necessidade de equipamentos cada vez menores e eficientes energeticamente e de que não existam semicondutores perfeitos, no sentido de sempre apresentarem algum tipo de perda, é necessário que o projetista dedique algum tempo de pesquisa e estudo para que estas características sejam reduzidas ao máximo. Conforme visto, algumas metodologias podem ser empregadas na estimação destas perdas, sendo mais confiável e preciso o método baseado em ensaios.

O Capítulo 3 apresentou uma breve introdução sobre aplicações da Eletrônica de Potência, sobre sua atuação no desenvolvimento de novas tecnologias, os componentes e dispositivos geralmente utilizados e procedimentos empregados que visam melhorar o rendimento de conversores estáticos na etapa de projeto.

No Capítulo 4 foram apresentados os periféricos PWM e conversor A/D do controlador digital de sinal - DSC (*Digital Signal Controller*), utilizados no projeto.

No Capítulo 5 foi desenvolvido o projeto do sistema que compreende o estudo do modelo térmico do bloco de alumínio, o conversor Buck e o projeto de controle.

Detalhes sobre a fonte de alimentação, sistema de aquecimento programação do algoritmo e interface com o usuário estão no Capítulo 6.

E por fim, no Capítulo 7, estão alguns resultados experimentais obtidos durante ensaios para estimação de perdas em semicondutores de trabalhos desenvolvidos no INEP.

Com a aplicação do Controlador Digital de Sinal (*DSC*) foi possível obter uma maior faixa de operação para a frequência dos pulsos de comando, pois estes foram gerados a partir dos quatro canais PWM independentes deste dispositivo. Isto não seria possível com microcontroladores, que na maioria das vezes não tem suporte a mais do que dois canais de PWM, fazendo-se necessário a varredura de tabelas, o

que reduz a versatilidade do protótipo.

Outra vantagem em se usar um *DSC* é em relação ao número de pinos de I/O, uma característica importante em virtude da utilização de uma interface com o usuário, onde se faz necessário o uso de botões, led's, *buzzer* e *display* de cristal líquido. Como resultado deste trabalho temos um protótipo totalmente operante e versátil para a determinação de perdas em dispositivos semicondutores.

REFERÊNCIAS

- [1] LEM. *Folha de dados - Transdutor de Corrente: LAH 25-NP*. 2006.
- [2] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken: IEEE Press Series on Power Engineering, 2007. 374 p.
- [3] WANG, C. M. e Jiandong Wu e Huibo Lou e Jiming Lu e Dan Wang e W. Large synchronous generator excitation system based on current source converters. *Water Resources and Power*, Vol. 26, n. 3, June 2008.
- [4] BADIN, A. A. *Retificadores Trifásicos com Fator de Potência Unitário Baseado nos Transformadores Trifásicos/ Bifásicos*. Tese (Doutorado) — Universidade de Santa Catarina (UFSC) - Instituto de Eletrônica de Potência, 2009.
- [5] DROFENIK, U.; KOLAR, J. W. A general scheme for calculating switching and conduction-losses of power semiconductors in numerical circuit simulations of power electronic systems. In: *International Power Electronics Conference (IPEC)*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 737 –744. ISSN 4-88686-065-6.
- [6] BAUMANN, M.; KOLAR, J. Parallel connection of two three-phase three-switch buck-type unity-power-factor rectifier systems with dc-link current balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 6, p. 3042 –3053, dec. 2007. ISSN 0278-0046.
- [7] NETO, A. R. *Controle Preditivo Aplicado à Regulação de Tensão de Usinas Hidrelétricas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Santa Catarina (UFSC) - Departamento de Automação e Sistemas, 2010.
- [8] BARBI, I. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*. Florianópolis, Brasil: Editora da UFSC, 1985. 234 p.
- [9] MILLER, S.; BARBI, I. Practical aspects of the unity power factor isolated three-phase rectifier based on the scott transformer. In: *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 621 – 627 Vol. 1.

- [10] BADIN, A.; BARBI, I. Three-phase series-buck rectifier with split dc-bus based on the scott transformer. In: *Power Electronics Specialists Conference (PESC)*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 516 –522. ISSN 0275-9306.
- [11] BARBI, I. *Eletrônica de Potência*. Sexta edição. Florianópolis, BR: Edição do Autor, 2006. 315 p.
- [12] I., M. D. C. e B. *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*. Florianópolis, BR: Edição do Autor, 2008. 368 p.

Apêndice A – Discretização do controlador PI

Dada a função do controlador PI:

$$PI(s) = K_{PI} \left(\frac{s + \omega_z}{s} \right)$$

Pelo método de discretização de Tustin a variável s deve ser substituída por:

$$s = m \frac{z - 1}{z + 1}$$

Desta maneira:

$$PI(z) = K_{PI} \frac{m \frac{z - 1}{z + 1} + \omega_z}{m \frac{z - 1}{z + 1}}$$

Que pode ser reescrita como:

$$PI(z) = K_{PI} \frac{mz - m + \omega_z z + \omega_z}{m(z - 1)}$$

Agrupando os coeficientes de termos semelhantes e multiplicando numerador e denominador por z^{-1} :

$$PI(z) = K_{PI} \frac{z(m + \omega_z) + (\omega_z - m)}{m(z - 1)} \cdot \frac{z^{-1}}{z^{-1}}$$

O que resulta em:

$$PI(z) = K_{PI} \frac{(m + \omega_z) + z^{-1}(\omega_z - m)}{m - mz^{-1}}$$

Fazendo as devidas manipulações matemáticas e sabendo que z representa um atraso unitário no tempo:

$$mu[k] - mz^{-1}u[k] = K_{PI}(e[k](\omega_z + m) + z^{-1}e[k](\omega_z - m))$$

$$mu[k] - mu[k - 1] = K_{PI}(e[k](\omega_z + m) + e[k - 1](\omega_z - m))$$

$$mu[k] = mu[k - 1] + K_{PI}(e[k](\omega_z + m) + e[k - 1](\omega_z - m))$$

$$u[k] = u[k-1] + \frac{K_{PI}}{m}(\omega_z + m)e[k] + \frac{K_{PI}}{m}(\omega_z - m)e[k-1]$$

Definindo as variáveis A e B :

$$A = \frac{K_{PI}}{m}(\omega_z - m)$$

$$B = \frac{K_{PI}}{m}(\omega_z + m)$$

A equação a diferenças resultante, que será implementada no DSC, é:

$$u[k] = u[k-1] + Be[k] + Ae[k-1]$$