

UFSM

Dissertação de Mestrado

**INTERAÇÃO ENTRE CONVERSORES CHAVEADOS
COM BAIXA ONDULAÇÃO E CÉLULAS DE
COMBUSTÍVEL**

Diego Dias Marquezini

PPGEE

Santa Maria, RS, Brasil

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

INTERAÇÃO ENTRE CONVERSORES CHAVEADOS
COM BAIXA ONDULAÇÃO E CÉLULAS DE
COMBUSTÍVEL

por

Diego Dias Marquezini

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

PPGEE

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**INTERAÇÃO ENTRE CONVERSORES CHAVEADOS COM BAIXA
ONDULAÇÃO E CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL**

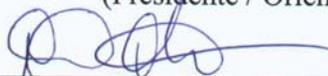
elaborada por
Diego Dias Marquezini

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

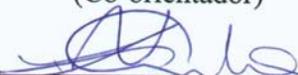
COMISSÃO EXAMINADORA:



Felix Alberto Farret, PhD - UFSM
(Presidente / Orientador)



Ricardo Quadros Machado, Dr. - UFSM
(Co-orientador)



Luciane Neves Canha, Dr^a - UFSM



José Eduardo Baggio, Dr. - UNIFRA

Santa Maria, 17 de janeiro de 2007

**Dedico essa dissertação
à minha mãe, Marfiza Beatriz
Dias Marquezini, pelo carinho
incondicional e pelo amparo
demonstrados durante sua
realização.**

AGRADECIMENTOS

O trabalho descrito nessa dissertação foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e nas dependências do Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente e Núcleo de Desenvolvimento e Pesquisa em Engenharia Elétrica (NUPEDEE), da Universidade Federal de Santa Maria. O autor é grato aos funcionários desses setores, especialmente a Sra. Cleonice Oliveira e ao Sr. Fernando Martins, pelo auxílio administrativo e técnico.

Aos professores e colegas do curso, o reconhecimento pelo incentivo, críticas e sugestões que contribuíram para o enriquecimento dessa dissertação.

O autor é muito grato ao Prof. Dr. Felix A. Farret e ao co-orientador Dr. Ricardo Quadros Machado, pela idéia original do trabalho e pelo respeito, a seriedade, o entusiasmo e a motivação com que orientaram as atividades ao longo do trabalho.

Pelos momentos de trabalho e dedicação compartilhados, o autor agradece aos Engenheiros Frank Gonzatti, Leandro Della Flora, Leonardo Londero de Oliveira, Marcelo Hey Duarte, Daniel Damasceno e Jocemar Parizzi e aos acadêmicos Álvaro Brezolin Serdotte e Jamerson Walber, cujas contribuições foram fundamentais para a finalização dessa dissertação.

Agradecimento especial à família, pelo incentivo, carinho e amparo em todos os momentos, tendo a lembrança em especial de minha mãe, Marfiza Beatriz Dias Marquezini.

Pela compreensão, incentivo, amor e respeito, o agradecimento e reconhecimento à namorada Lizza Tattiana Cardozo Ceretta.

ÍNDICE

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE ANEXOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS ...	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos desta Dissertação	04
1.2 Organização dos Capítulos	05
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	16
3.1 Comportamento Tensão x Corrente	17
3.2 Modelo Eletroquímico Dinâmico	18
3.3 Simulação da Modelagem Eletroquímica	21
3.3.1 Modelo Mark V	21
3.3.2 Modelo BCS	25

3.4 Simulação Dinâmica	28
3.4.1 Modelo Mark V	28
3.4.2 Modelo BCS	31
3.4.3 Modelo SR-12	38
3.5 Considerações Finais	45
CAPÍTULO 4 – O CONVERSOR BOOST E INVERSOR TRIFÁSICO	
PARA CONEXÃO A REDE	46
4.1 Modelagem Dinâmica do Conversor Boost com Controle da Corrente de Saída do Filtro “T”	48
4.1.1 Linearização usando valores médios das variáveis de estado para obter $\tilde{\mathbf{i}}_{L12}(s)/\tilde{\mathbf{d}}(s)$	49
4.2 Projeto dos Elementos Passivos do Conversor Boost	55
4.3 Projeto dos Elementos Passivos do Inversor Trifásico	58
4.4 Considerações Finais	64
CAPÍTULO 5 – CONTROLADORES DIGITAIS PARA INJEÇÃO DE	
ENERGIA NA REDE	65
5.1 Controle da Corrente CA	66
5.2 Controle PI da Tensão do barramento CC	69
5.3 Controle do Conversor CC-CC	71
5.4 Comportamento da Planta sob Variação de R_a	72
5.5 Considerações Finais	74

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS	77
6.1 Resultados de Simulação	77
6.2 Resultados Experimentais	80
6.3 Considerações Finais	86
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	87
7.1 Conclusão Geral	87
7.2 Contribuições desta Dissertação	90
7.3 Sugestões para Continuidade do Trabalho	90
BIBLIOGRAFIA	92

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

INTERAÇÃO ENTRE CONVERSORES CHAVEADOS COM BAIXA ONDULAÇÃO E CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

AUTOR: DIEGO DIAS MARQUEZINI

ORIENTADOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PH.D

CO-ORIENTADOR: RICARDO QUADROS MACHADO, DR. ENG.

Esta dissertação discute a interação entre as células de combustível e o conversor de potência conectado aos seus terminais. Para isto é apresentado um algoritmo modificado para a modelagem dinâmica de conversores chaveados tanto quanto um estudo sobre os efeitos das ondulações de corrente sobre as células. Células do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) são estudadas, obtendo-se um modelo razoável para análise das características eletroquímicas e elétricas dos fenômenos envolvidos na geração de energia elétrica com células de combustível. Como interface utiliza-se um conversor CC-CC associado a um filtro do tipo “T”. Este conversor tem a função de evitar a grande ondulação de corrente absorvida pela célula bem como, manter constante o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC evitando-se assim, possíveis transitórios nos terminais da célula. O projeto do conversor de potência prevê a conexão à rede da concessionária através de um conversor CC-CA trifásico para injetar ou absorver corrente da rede com reduzida distorção harmônica e estabilização da tensão do barramento CC. Foram projetados controladores para a corrente CC, a tensão CC e a corrente CA. Como formas de validação foram realizadas simulações para avaliar o comportamento dos sistemas de controle para a pilha e para a injeção e/ou absorção de energia. Também foram comparados os resultados teóricos com os dados práticos de uma pilha submetida à variação de carga em seus terminais.

Palavras-chave: células de combustível, PEMFC, conversores de potência, conversor CC-CC, comportamentos estático e dinâmico, filtro T.

ABSTRACT

Master Dissertation

Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

INTERACTION BETWEEN LOW-RIPPLE SWITCHED CONVERTERS AND FUEL CELLS

AUTHOR: DIEGO DIAS MARQUEZINI
SUPERVISOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PH.D
CO-SUPERVISOR: RICARDO QUADROS MACHADO, DR. ENG.

This dissertation discusses the interaction between fuel cells and the DC-DC converter just connected across its terminals. For that, it presents a modified algorithm to represent the dynamic behavior of fuel cell stacks as much the current ripple effects from power converters on such cells. PEM type fuel cells (Proton Exchange Membrane) are studied to get a reasonable model of the electrochemical and electric characteristics of the involved phenomena in the generation of electric energy from fuel cells. A “T” filter is used as interface between the fuel cell and the DC-DC converter. This converter must prevent large current ripples going through the cell terminals as well as keeping constant the power flow between the FC and the link DC to prevent itself of possible current transient. To connect it to the grid it was used a three-phase DC-AC converter to inject or to absorb current from the grid at reduced ripple distortion and to stabilize the DC link voltage. DC current controllers were designed to curb the link DC and AC currents within reasonable limits. Validation of the model was carried out through computer simulation in order to have an evaluation of the control system behavior both for the stack and for the injection and/or absorption of energy. Also, theoretical results with practical data from a fuel stack were compared with respect to the load variation across its terminals.

Keywords: fuel cells, PEMFC, power converters, DC-DC converter, static and dynamic behavior, T filter.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros da célula Mark V [11]	22
Tabela 3.2 – Parâmetros da pilha BCS, 500 W	25
Tabela 3.3 – Parâmetros da célula Mark V [11,16]	29
Tabela 3.4 – Parâmetros da pilha SR-12, 500 W	38
Tabela 5.1 – Parâmetros do sistema – PI corrente	68
Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema – PI tensão do barramento CC ...	70
Tabela 5.3 – Parâmetros do sistema – PI da fonte CC	72
Tabela I.1 – Valores de $\Delta\bar{h}_f$, E_r e $\eta_{FC_{max}}$ (ref. HHV) [15]	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Circuito equivalente ao modelo dinâmico da PEMFC . . .	19
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do modelo eletroquímico dinâmico não-linear	21
Figura 3.3 – Curva de polarização da PEMFC	23
Figura 3.4 – Rendimento da PEMFC	23
Figura 3.5 – Densidade de potência da PEMFC	24
Figura 3.6 – Curva de polarização de uma pilha BCS de 500W	26
Figura 3.7 – Potência real e simulada de uma pilha BCS de 500 W . . .	27
Figura 3.8 – Rendimento de uma pilha BCS de 500W	27
Figura 3.9 – Corrente da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição	29
Figura 3.10 – Tensão da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição	30
Figura 3.11 – Potência da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição	30
Figura 3.12 - Rendimento da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição	31
Figura 3.13 – Degrau de corrente para simulação dinâmica	32
Figura 3.14 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente	33
Figura 3.15 – Tensão de Nernst	34

Figura 3.16 – Perda ôhmica	34
Figura 3.17 – Perda de ativação	35
Figura 3.18 – Perda de concentração	35
Figura 3.19 – Corrente da capacitância	36
Figura 3.20 – Rendimento da pilha para um degrau de corrente	37
Figura 3.21 – Potência gerada pela pilha para um degrau de corrente ..	37
Figura 3.22 – Degrau de corrente para simulação dinâmica	39
Figura 3.23 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de carga ..	40
Figura 3.24 – Corrente da capacitância	41
Figura 3.25 – Rendimento da pilha para um degrau de carga	41
Figura 3.26 – Potência gerada pela pilha para um degrau de carga ...	42
Figura 3.27 – Resultados Experimentais da célula SR-12	42
Figura 3.28 – Zoom dos instantes de chaveamento	44
Figura 4.1 – Conversor Boost com controle da corrente de saída do filtro “T”	48
Figura 4.2 – Esquema elétrico completo do conversor	53
Figura 4.3 – Conversor CC-CC	56
Figura 4.4 – Diagrama do circuito do inversor	58
Figura 4.5 – Circuito equivalente para um filtro de saída LC	60
Figura 4.6 – Circuito equivalente para carga não-linear	61
Figura 5.1 – Controle de corrente em malha fechada	67
Figura 5.2 – Resposta em freqüência do controle de corrente em malha fechada	68
Figura 5.3 – Diagrama do controle CC	69
Figura 5.4 – Diagrama de controle do conversor CC-CC	71

Figura 5.5 – Lugar das Raízes dos parâmetros nominais (sem carga) . .	73
Figura 5.6 – Lugar das Raízes com variação somente do R_a (carga nominal)	73
Figura 6.1 – Diagrama completo do sistema	78
Figura 6.2 – Correntes do sistema trifásico	79
Figura 6.3 – Transitório de carga	79
Figura 6.4 – Análise da ondulação das correntes	80
Figura 6.5 – Diagrama elétrico do conversor Boost	81
Figura 6.6 – Sinais de referência e de medição	82
Figura 6.7 – Corrente dos indutores L_{d1} e L_{d2}	82
Figura 6.8 – Detalhe da corrente do indutor L_{d2}	83
Figura 6.9 – Sinais de referência e de medição do DSP	83
Figura 6.10 – Corrente da indutância de 1 mH	84
Figura 6.11 – Corrente da indutância de 0,5 mH	85
Figura I.1 - Esquema de operação de uma PEMFC típica	99
Figura I.2 – Entradas e saídas de uma célula de combustível	100
Figura I.3 – Eficiência máxima de células de combustível à pressão padrão (100 kPa), referida ao HHV	103
Figura II.1 – Diagrama de blocos de um sistema de geração de energia elétrica	114

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I	Modelagem Matemática de Células de Combustível . .	97
ANEXO II	Equações do Modelo da PEMFC	107
ANEXO III	Parâmetros para o Cálculo do Potencial de Ativação . .	116
ANEXO IV	Manual da Pilha de Células de Combustível	118
ANEXO V	Programa MatLab	127

LISTAS DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CHP	Sistemas combinados de calor e eletricidade (<i>Combined Heat and Power</i>)
FC	Célula de combustível (<i>fuel cell</i>)
HHV	Poder calorífico superior (<i>Higher Heating Value</i>)
LHV	Poder calorífico inferior (<i>Lower Heating Value</i>)
PEM	Membrana de troca de prótons (<i>Proton Exchange Membrane</i> ou <i>Polymer Electrolyte Membrane</i>)
PEMFC	Célula de combustível do tipo membrana de troca de prótons
PI	Compensador PI (proporcional – integral)
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
THD	Distorção harmônica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área ativa da célula (cm^2)
A_i ($i = 1,2$)	Matrizes de estado
a_x	Atividade da substância x
B	Coefficiente para determinação do potencial de concentração (V)
B_i ($i = 1,2$)	Matrizes de entrada
c_{O_2}	Concentração de oxigênio (mol/cm^2)
c_{H_2}	Concentração de hidrogênio (mol/cm^2)
C	Capacitor equivalente para resposta dinâmica (F)
C_{CC}	Capacitância do barramento CC (F)
C_i ($i = 1,2$)	Matrizes de saída
C_f	Capacitância do filtro “T” (F)
C_o	Capacitância do filtro de saída do conversor CC-CA (F)
E	Tensão reversível da célula de combustível (V)
E_o	Tensão de circuito aberto (V)
E_{Nernst}	Potencial de Nernst (V)
f_c	Frequência de corte (Hz)
f_o	Frequência de saída (Hz)
f_s	Frequência de chaveamento (Hz)
F	Constante de Faraday (= 96485 C/mol)
F_{CLi}	Frequência de corte do controle da corrente CA (Hz)

F_{CLCC}	Frequência de corte de malha fechada do controle da tensão do barramento CC (Hz)
F_{CLFC}	Frequência de corte de malha fechada do controle da corrente do conversor CC (Hz)
G_{OLi}	Ganho em malha aberta do controle da corrente CA
i_a	Parcela de corrente de i_{FC} que alimenta os sobrepotenciais de ativação e de concentração (A)
i_c	Parcela de corrente de i_{FC} através da capacitância C, em paralelo com as perdas de ativação e de concentração (A)
i_{FC}	Corrente da célula de combustível (A)
i_{Lf1}	Corrente circulante no indutor L_{f1} (A)
i_{Lf2}	Corrente circulante no indutor L_{f2} (A)
I	Matriz identidade
i_h	Corrente das harmônicas
i_{rms}	Corrente de fase que circula do conversor para a rede/carga (A)
Δi_{rms}	Varição da corrente de fase que circula do conversor para a rede/carga (A)
i_{CC}	Corrente do barramento CC (A)
Δi_{CC}	Varição da corrente do barramento CC (A)
$i_{o,rms}$	Corrente de carga total de cada fase (A)
$i_{o,1}$	Corrente da primeira harmônica (fundamental) (A)
$i_{o,3}$	Corrente da terceira harmônica (A)
$i_{L_o}^*$	Corrente de referência para as indutâncias do filtro de saída do conversor CC-CA (A)

i_{L_0}	Corrente medida sobre as indutâncias do filtro de saída do conversor CC-CA (A)
G	Energia livre de Gibbs (J)
G_f	Energia livre de Gibbs de formação (J)
G_{OLFC}	Ganho em malha aberta do controle da corrente do conversor CC
ΔG_f	Mudança na energia livre de Gibbs de formação (J)
$\Delta \bar{g}_f$	Mudança na energia livre de Gibbs de formação molar (J/mol)
$\Delta \bar{g}_f^o$	Mudança na energia livre de Gibbs de formação molar à pressão de 100 kPa e temperatura de 25 °C (J/mol)
h	Harmônica devido à carga não-linear
H	Entalpia (J)
H_f	Entalpia de formação (J)
ΔH_f	Mudança na entalpia de formação (J)
$\Delta \bar{h}_f$	Mudança na entalpia de formação molar (J/mol)
H_1	Função de transferência na frequência fundamental
H_2	Composição do hidrogênio
H_n	Função de transferência para o circuito equivalente
J	Densidade de corrente elétrica (A/cm ²)
J_{max}	Densidade de corrente elétrica máxima (A/cm ²)
J_n	Densidade de corrente elétrica equivalente às correntes internas e passagem direta de combustível (A/cm ²)
k_{lem}	Constante de proporcionalidade entre os sensores de

	corrente e o conversor analógico digital da plataforma digital
k_{voltage}	Constante de proporcionalidade entre os sensores de tensão e o conversor analógico digital da plataforma digital
k_{ADC}	Constante que converte as entradas da plataforma digital em valores hexadecimais
$k_{\text{prop}i}$	Ganho proporcional do compensador PI do controle da corrente CA
$k_{\text{prop}CC}$	Ganho proporcional do compensador PI do controle da tensão do barramento CC
$k_{\text{prop}FC}$	Ganho proporcional do compensador PI do controle da corrente do barramento CC
$k_{\text{int}i}$	Ganho integral do compensador PI do controle da corrente CA
$k_{\text{int}CC}$	Ganho integral do compensador PI do controle da tensão do barramento CC
$k_{\text{int}FC}$	Ganho integral do compensador PI do controle da corrente do barramento CC
l	Espessura da membrana (cm)
L_{f1}	Indutor 1 do filtro “T” (H)
L_{f2}	Indutor 2 do filtro “T” (H)
L_o	Indutância do filtro de saída conversor CC-CA (H)
m_{fi}	Margem de fase do controle da corrente CA (graus)
m_{fCC}	Margem de fase do controle da tensão do barramento CC

	(graus)
mFC	Margem de fase do controle da corrente CC (graus)
n	Número de células de uma pilha
n _f	Relação de frequência
N	Número de Avogadro
O ₂	Composição de oxigênio
P _o	Potência elétrica de saída da célula de combustível (W)
P _S	Potência elétrica da pilha de células de combustível (W)
P _{H₂}	Pressão parcial de hidrogênio (atm)
P _{O₂}	Pressão parcial de oxigênio (atm)
q	Carga elétrica (C)
Q	Regulação da tensão de saída
Q̇	Taxa de calor (J/s)
R	Constante universal dos gases (= 8,3145 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
R _a	Resistência equivalente para resposta dinâmica (Ω)
R _{act}	Resistência equivalente ao sobrepotencial de ativação (Ω)
R _C	Resistência equivalente de contatos (Ω)
R _{con}	Resistência equivalente ao sobrepotencial de concentração (Ω)
R _{ohm}	Resistência equivalente ao sobrepotencial ôhmico (Ω)
R _M	Resistência equivalente da membrana (Ω)
R'	Soma da resistência R _{ohm} com a resistência r _{Lfl} (Ω)
r	“Ripple” - variação
r _{Cf}	Resistência residual do capacitor C _f do filtro “T” (Ω)

r_{Lf1}	Resistência residual do indutor L_{f1} do filtro “T” (Ω)
r_{Lf2}	Resistência residual do indutor L_{f2} do filtro “T” (Ω)
S	Entropia (J/K)
S_f	Entropia de formação (J/K)
ΔS_f	Mudança na entropia de formação (J/K)
$\Delta \bar{S}_f$	Mudança na entropia de formação molar ($J.K^{-1}.mol^{-1}$)
t	Tempo (s)
T	Temperatura de operação de célula (K)
T	Taxa de amostragem (s)
THD	Distorção harmônica total
u	Entrada de controle
V_{CC}	Tensão média do conversor CC-CC (V)
ΔV_{CC}	Ondulação da tensão do barramento CC
V_{Cf}	Tensão do capacitor C_f do filtro “T” (V)
V_d	Tensão dinâmica equivalente (V)
V_{FC}	Tensão média da célula de combustível (V)
V_o	Tensão de saída do sistema (V)
V_S	Tensão da pilha de células de combustível (V)
V_{act}	Sobrepotencial de ativação (V)
$V_{o,h}$	Tensão equivalente para uma carga não-linear (V)
$V_{o,n}$	Tensão de saída harmônica (V)
V_{in}	Tensão de entrada harmônica (V)
$V_{\text{ôhmico}}$	Sobrepotencial ôhmico (V)
V_{con}	Sobrepotencial de concentração (V)

V_{rms}	Tensão de fase imposta pela rede da concessionária (V)
x	Variável de estado
X_{Co}	Impedância do capacitor (Ω)
X_{Lo}	Impedância do indutor (Ω)
$Z_{\text{L},n}$	Impedância de carga (Ω)

LISTA DE LETRAS GREGAS

α	Eixo da modulação SVM
β	Eixo da modulação SVM
ε	Sinal de erro entre o valor da referência e a saída do sistema de controle
η	Eficiência
ρ_{M}	Resistividade específica da membrana para o fluxo de prótons ($\Omega \cdot \text{cm}$)
δ	Ciclo de trabalho (<i>duty cycle</i>) do acionamento PWM
λ	Razão estequiométrica
ζ	Relação entre o calor gerado e o calor removido pelo resfriamento da pilha
τ	Coefficiente de tempo variável para resposta dinâmica (s)
μ_{f}	Coefficiente de utilização do combustível (%)
ψ	Parâmetro utilizado para o cálculo da resistividade da membrana

ξ_i ($i = 1...4$)

Coefficientes paramétricos para o cálculo do
sobrepotencial de ativação

INTRODUÇÃO

O Ministério de Minas e Energia, através de seus órgãos governamentais e regulamentadores, como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) está incentivando a disseminação do uso de fontes alternativas de energia. Atualmente, a integração de fontes alternativas de energia é responsável por 3% da matriz energética brasileira, mas a expectativa é de que esse índice atinja entre 10% e 15% ao final da próxima década. Tudo isso representa um acréscimo de 8 GW a 12 GW à capacidade instalada do setor elétrico brasileiro, com a grande vantagem de estar sendo produzida com baixo impacto ambiental [1].

Associada a este interesse está a crise energética que a cada dia torna-se mais proeminente devido ao limite máximo de produção de energia das hidroelétricas existentes bem como à inviabilidade econômica e ambiental na implantação de novas estruturas, que possibilitem a integração de fontes alternativas de energia elétrica. O interesse pela pesquisa e investigação tem crescido consideravelmente, principalmente, por motivos econômicos e ambientais. O emprego de tais estruturas, em associação com conversores estáticos de potência controlados por dispositivos de alto desempenho, como os processadores digitais de sinais (DSP's), são atualmente o estado-da-arte das pesquisas realizadas nesta área [2].

Como exemplo, até pouco tempo a eletrificação rural preocupava-se essencialmente em levar energia aos usuários para fins de iluminação e para alimentação de motores de pequena potência. O perfil do usuário, no entanto, tem se modificado, bem como as cargas alimentadas. A disponibilidade de uma alimentação entregue ao usuário, com qualidade de energia elétrica, como também, a segurança da geração baseada em uma fonte alternativa de energia, tornaram-se também de suma importância.

Com a evolução dos sistemas elétricos, os padrões de qualidade da energia elétrica estão a cada dia mais rigorosos e, aliado a isso, o aumento da demanda e dos crescentes custos de produção e transporte da energia, vislumbram um campo de pesquisa que tem como objetivo a melhoria da qualidade da energia fornecida, a maior utilização dos equipamentos e

a minimização de perdas nos circuitos elétricos. Com isso, pode-se aumentar o faturamento das empresas do ramo, levar energia a um número maior de consumidores e baixar o custo final da energia para os mesmos.

A utilização de pequenas fontes de energia associadas a conversores de potência continua em franca expansão no mundo inteiro. Mais crescente ainda é a preocupação com a qualidade da energia através destes equipamentos. Alguns parâmetros geralmente são tomados como referência pelos fabricantes, órgãos reguladores e companhias de energia, como forma de definir e discutir a qualidade dos equipamentos produzidos e da energia processada. Os parâmetros de qualidade mais utilizados que influenciam na decisão da utilização de um ou outro conversor são: fator de potência (PF); rendimento (η); distorção harmônica total (THD), fator de utilização (UF), equilíbrio de fases, tolerância ou regulação de tensão, bem como, a forma da onda (geralmente senoidal) entregue ao consumidor [4, 5, 6]. O custo e a confiabilidade também são fatores a serem considerados ainda que não afetem a qualidade.

Outro ponto importante é a preocupação mundial com o meio ambiente, relativa ao uso de combustíveis fósseis, criando, ao longo dos anos, uma demanda crescente de tecnologias de conversão de energia e geração de potência não poluentes.

Dentro deste contexto, as células de combustível (FC – *Fuel Cells*) têm se mostrado uma fonte de energia alternativa altamente promissora tendo alta eficiência, baixa agressão ambiental, excelente resposta dinâmica e superior confiabilidade e durabilidade em aplicações aeroespaciais, automotivas e estacionárias [10 - 16]. Em especial, as células de combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane* - Membrana de Troca de Prótons) mostram-se promissoras quanto ao uso como fontes de energia elétrica, operando de forma isolada ou conectada à rede pública. As PEMFCs produzem água como resíduo, operam a baixas temperaturas, o que permite partida relativamente rápida, usam um polímero sólido como eletrólito, o que reduz as preocupações de transporte, construção e segurança, e apresentam elevada densidade de potência.

Em operação normal, as células de combustível produzem energia elétrica como resultado de reações eletroquímicas de oxi-redução, que ocorrem pela passagem de um gás rico em hidrogênio através do anodo e de oxigênio através do catodo. Entre o anodo e o catodo existe um eletrólito para permitir a troca de cargas elétricas (íons) entre eles. O fluxo de íons através do eletrólito produz uma corrente elétrica a ser usada num circuito elétrico externo ou carga.

Durante a sua operação normal, uma única célula pode produzir, tipicamente, tensões de 0,5 a 0,9 V [15]. Para utilização em sistemas de geração de energia, são necessárias tensões mais elevadas e maior potência. Para obterem-se estas duas premissas usam-se conexões de várias células em série formando uma pilha (*stack*), podendo fornecer desde algumas centenas de Watts até dezenas ou centenas de kW e, eventualmente, MW [15].

Em sistemas de geração, a resposta dinâmica é de extrema importância tanto no projeto do sistema de controle quanto no gerenciamento especialmente se há injeção de energia na rede. Esta preocupação aumenta quando a potência gerada é baixa, como é o caso das micro e minicentrals. As perturbações dinâmicas afetam de forma mais substancial a potência entregue à carga.

Na fase de projeto, é bom que se simule a associação de células de combustível com conversores de potência do tipo CC-CC e CC-CA para que se represente a carga com modelos tanto em regime permanente quanto em regime transitório.

A obtenção de um modelo preciso de células de combustível não é uma tarefa simples, visto que o comportamento da célula envolve um elevado número de variáveis, como: temperatura, pressão dos gases, dimensões da célula, hidratação da membrana, propriedades dos materiais constituintes do eletrólito e dos eletrodos, estequiometria dos gases, entre outras. Além disso, existe grande interdependência entre essas variáveis, o que resulta num sistema não-linear. Porém, para ser útil, tal modelo deve prever o comportamento eletroquímico das células em condições normais de operação tanto quanto em condições adversas como chaveamento de cargas, surtos e perturbações.

O dimensionamento dos conversores de potência é de suma importância, pois eles controlam o fluxo de energia entre a FC e a rede da concessionária. Para tal, usualmente, o primeiro estágio é composto de conversor CC-CC boost que absorve da FC uma corrente com baixo nível de ondulação (“ripple”). O estágio seguinte utiliza um conversor CC-CA que reduz a distorção harmônica da corrente que circula pela rede e propicia um fator de potência próximo do unitário.

A compatibilidade dos níveis de potência ativa e reativa trocados pelas fontes de energia com a rede e o ponto ótimo de operação são assuntos atualmente estudados por vários centros de pesquisa em universidades e empresas em nível mundial. O desenvolvimento dos conversores de potência e o controle da geração são fatores chave para o aperfeiçoamento e aplicação desta topologia de geração distribuída. Estes aspectos reforçam a necessidade de uma modelagem das pilhas de células de combustível, para permitir o desenvolvimento de tais

tecnologias em laboratório, permitindo maior integração entre áreas do conhecimento como geração de energia, eletrotécnica, termodinâmica, eletrônica de potência, controle, instrumentação e eletroquímica.

Para permitir o desenvolvimento de tal ferramenta, esta dissertação apresenta, inicialmente, subsídios para a modelagem matemática dinâmica das células de combustível do tipo PEM, permitindo a determinação de grandezas como: (i) tensão de cada célula e da pilha; (ii) potência fornecida; (iii) rendimento do sistema de geração; (iv) correntes do efeito da dupla camada. Atenção especial é dada à resposta dinâmica da FC, diferentemente de alguns dos modelos apresentados na literatura [11, 13, 14] quando se utilizou a modelagem unidimensional, que não avalia o comportamento interno dos processos envolvidos na geração de energia, relativos à membrana, aos eletrodos e camadas de difusão de gás. Os principais processos são descritos levando-se em consideração os efeitos na potência e tensão geradas, aspectos mais fundamentais para a Engenharia Elétrica.

A modelagem matemática discutida nesta dissertação é adequada para células do tipo PEM e incorpora os processos essenciais que ocorrem nas mesmas. Para avaliação prática, são utilizados os parâmetros das células do tipo Mark V, fabricada pela empresa canadense Ballard, da célula SR-12 da empresa Avista e de uma pilha com potência máxima de 500 W, fabricada pela empresa americana BCS Technology, cuja operação e dados são conhecidos e disponíveis na literatura, permitindo a comparação dos resultados através de simulações com testes reais.

Os principais componentes da plataforma utilizados no controle de pilhas de células de combustível são: microcomputador, conversores CC-CC e CC-CA totalmente controlados, sistema de aquisição de dados, sensores e atuadores. No controle dos conversores de potência, em particular, para o controle do sistema foi utilizado um DSP, que é responsável pelas funções de controle, supervisão e segurança da operação.

1.1 Objetivos desta Dissertação

1) Aprimoramento de um modelo matemático para prever o comportamento dinâmico de células de combustível do tipo PEM, incorporando as suas principais características eletroquímicas;

- 2) Projetar e analisar conversor CC-CC com filtro T para evitar grande ondulação de corrente absorvida pela célula e manter fluxo de energia entre a FC e o barramento CC evitando transitórios nos seus terminais;
- 3) Projetar e analisar conversor CC-CA para injetar ou absorver corrente da rede com reduzida distorção harmônica e estabilização da tensão do barramento CC;
- 4) Analisar as principais considerações relativas ao controle das grandezas de pilhas de células de combustível e avaliar o comportamento da pilha frente a condições de surtos normalmente encontrados na prática;
- 5) Desenvolver um sistema de geração de energia com células de combustível do tipo PEM para permitir a avaliação da performance de pilhas de células PEM frente a cargas elétricas reais.

1.2 Organização dos Capítulos

Uma introdução geral sobre células de combustível é apresentada no Capítulo 1 reunindo as principais características e, também, a proposta da plataforma desenvolvida nesta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos modelos matemáticos de células de combustível utilizados e descreve o conteúdo do material utilizado na pesquisa bibliográfica.

No capítulo 3 é realizada uma melhoria no algoritmo de cálculo dos modelos encontrados na literatura sobre as principais características construtivas e operacionais de células de combustível. É apresentada uma revisão da modelagem matemática das células, descrevendo detalhadamente cada termo. Os principais processos envolvidos na geração de energia elétrica com células de combustível são analisados incluindo a definição do alcance do modelo utilizado. São apresentados, ainda, alguns resultados de simulações computacionais.

O Capítulo 4 apresenta o dimensionamento dos conversores CC-CC e CC-CA e, em especial, são projetados os seus componentes passivos. Para o conversor CC-CC, primou-se pela baixa ondulação (*ripple*) na corrente circulante pela célula e para que a dinâmica de tais componentes passivos fosse suficientemente rápida para não interferir na dinâmica do sistema célula/conversor CC-CC. A metodologia utilizada para os conversores, juntamente com as células de combustível, é descrita em detalhes.

No Capítulo 5 são realizadas algumas considerações sobre o controle do conversor CC-CC, para o qual optou-se em operá-lo e controlá-lo no modo corrente de condução contínua (mcc). O controlador do tipo PI foi escolhido por se tratar de uma teoria bastante consolidada e aplicada tanto no meio acadêmico quanto na indústria. Para o conversor CC-CA, foram projetadas duas malhas de controle: uma mais interna que controla as correntes do conversor e outra mais externa, que estabiliza a tensão do barramento CC, sendo que ambas fazem uso de controladores PI. São também apresentados alguns resultados com dados da estabilidade do sistema FC - conversor Boost.

O Capítulo 6 apresenta os resultados da simulação e experimentais do sistema como um todo, com seus devidos comentários.

As conclusões e contribuições dessa dissertação são apresentados no Capítulo 7, que também sugere tópicos de interesse para continuidade desse trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem de células de combustível tem recebido grande atenção de centros de pesquisas em empresas e universidades, especialmente nos últimos anos. Diversos autores têm apresentado modelos que variam em complexidade e forma no tratamento do assunto.

Kim et al [14] apresentam um modelo empírico para células do tipo PEM que utiliza uma equação eletroquímica para representar os comportamentos da tensão e da corrente da célula. A equação apresenta um termo logarítmico, relacionando a pressão parcial de oxigênio e a pressão de trabalho do sistema para representar o efeito da polarização de concentração.

As referências [36, 38, 43 e 44] apresentam outros modelos baseados em células de combustível, e a [36] apresenta um modelo simplificado baseado nos conhecimentos dos fenômenos físico-químicos da célula e resultados de testes experimentais e de simulação que mostram as condições estáticas e dinâmicas. A referência [38] mostra que durante a variação dos processos na FC ocorrem muitos transitórios que se tornam significantes, enquanto simples modelos empíricos são insuficientes para representar as dinâmicas transitórias causadas pelos efeitos da difusão e da capacitância da dupla camada na interface entre eletrodos e o eletrólito. A referência [43] apresenta um modelo matemático para investigar a performance dinâmica da pilha de PEMFC, dando atenção à modelagem, que incluem os efeitos da carga do inversor. A referência [44] apresenta um modelo dinâmico do circuito de células de combustível. O modelo leva em conta os transitórios do fluxo, as pressões parciais dos reagentes como também as perdas dos mecanismos. Para o projeto da PEMFC selecionada, as análises são realizadas para examinar transitórios impostos de carga.

Alguns autores apresentam modelos analíticos, em que os vários fatores relacionados com a produção de energia são considerados com um tratamento matemático mais formal [10 – 13]. Os modelos consideram, ainda, o comportamento em uma ou mais dimensões. No entanto, observa-se uma lacuna na literatura com relação a um modelo adequado à engenharia elétrica, que seja facilmente utilizado como um bloco em sistemas de geração e leve em

consideração os fatores mais relevantes na operação da pilha de células, como tensões, correntes, potências, rendimento e consumo de hidrogênio.

A determinação da curva característica de uma célula do tipo PEM apresenta como componentes os potenciais de Nernst, de ativação, ôhmico e de concentração [10, 43]. Alguns autores não modelam todos os potenciais envolvidos [11], limitando a sua aplicação para determinadas faixas de densidade de corrente. Pode-se verificar ainda, a presença de um quinto elemento, a redução da tensão gerada devido ao fenômeno de circulação de correntes internas e perda de combustível sem participar da reação [15]. Este efeito é mais sensível em pilhas de células que operam com temperaturas mais reduzidas, como é o caso da PEM.

O comportamento dinâmico da pilha, essencial para a sua utilização em geração de energia, é tratado em Baschuk e Li [10], Amphlett et al [12] e também nas referências [36, 38, 41, 43, 48]. O tratamento utilizado por Amphlett et al [12] apresenta uma equação para o comportamento eletroquímico da pilha, mas não considera o potencial de concentração. Na modelagem dinâmica são utilizadas equações para avaliar a variação da temperatura da pilha quando em operação. O processo é iterativo e a temperatura resultante é utilizada para prever o novo valor da tensão da pilha. A referência [41] apresenta um modelo dinâmico de SOFC, que pode ser usado no estudo da estabilidade transitória. O modelo é aplicado para uma rede distribuída que usa uma célula de combustível e uma turbina a gás como geradores distribuídos. Na referência [48] as características estáticas e dinâmicas de células de combustível são usadas para consideração do projeto do estágio de potência do conversor estudado, sendo o sistema inteiro projetado, fabricado e testado usando uma PEMFC de 1,2kW, mostrando resultados de simulação próximos com a fonte dinâmica da FC e ao comportamento das respostas transitórias de cargas.

Na referência [15], Larminie apresenta um circuito equivalente para o comportamento elétrico dinâmico da célula, que torna simples o seu equacionamento, além de fácil entendimento. Após a determinação dos valores dos potenciais para uma dada condição de operação, a variação da corrente de carga fará com que a dinâmica do sistema responda de forma diferente para os potenciais envolvidos: o potencial de Nernst não depende da corrente (que permanece inalterado), o potencial ôhmico é diretamente relacionado com a corrente de carga (este sofre variação instantânea) e, por sua vez, os potenciais de concentração e de ativação, em conjunto, conferem o comportamento de um circuito de primeira ordem à resposta dinâmica da célula. Portanto, tal tratamento apresentado por Larminie, é adequado para a etapa da modelagem dinâmica da célula frente às cargas elétricas. Outros trabalhos, como [32, 34, 35, 44], apresentam este estudo.

O trabalho realizado na referência [32] explora as considerações de projeto para uma FC que alimenta um conversor CC-CC para aplicações portáteis empregando um circuito equivalente da pilha PEMFC para avaliar a resposta transitória do sistema para mudanças de carga e determinar os efeitos dos modos operação contínua e descontínua do conversor CC-CC. A referência [34] apresenta um modelo de impedância das PEMFC's. O estudo emprega um circuito equivalente derivado da técnica de análise da resposta em frequência. A referência [35] apresenta um novo modelo de circuito para uma célula de combustível do tipo PEM que pode ser utilizado em projetos e análise de sistemas de potência. O modelo baseado no PSPICE™ usa BJT's e elementos LC disponíveis na biblioteca deste aplicativo com algumas modificações.

Na referência [25], Kim et al apresentam uma modelagem simplificada de FC, resultando em um circuito elétrico equivalente. É apresentado, também, um algoritmo para controle da tensão da pilha, utilizando um conversor CC-CC do tipo Boost e um controlador Fuzzy. Os trabalhos [32, 34, 35, 44, 54] apresentam também estudos de modelos simplificados da FC na forma de circuitos elétricos, geralmente formados por impedâncias e capacitâncias.

A combinação das características dos modelos apresentados por Baschuk et al [10], Mann et al [11], Amphlett et al [12] e Larminie [15] levam à definição de um modelo adequado para a aplicação em geração de energia elétrica, incluindo a dinâmica da geração. Tal modelo é utilizado em Corrêa [16] para prever os principais processos envolvidos na geração de energia elétrica, como fluxo dos reagentes, calor produzido, temperatura e umidade da célula, tensão, potência e rendimento [16].

Para esta dissertação foi estudada a parte eletroquímica da modelagem das células de combustível do tipo PEM, juntamente com os estudos realizados por Candusso et al. [33], Sedghisigarchi et al. [41] e Yerramalla [43]. A referência [33] apresenta duas diferentes topologias descritas e analisadas. A primeira associa um conversor CC-CC e um inversor PWM. A segunda é um sistema híbrido: um banco de ultracapacitores, conectados ao barramento CC através de um Chopper e também ao sistema da FC e atua como um armazenador do pico de potência. A referência [43] mostra um modelo matemático para investigar a performance dinâmica da pilha de PEMFC que inclui os efeitos cruciais da carga do inversor. O modelo é estudado para diferentes estratégias operacionais. Os resultados indicam os riscos envolvidos com a linearização do modelo por causa de erros computacionais.

Ainda que o campo da modelagem de células de combustível esteja bem desenvolvido, nota-se uma lacuna na aplicação de tais modelos, especialmente na área de geração de energia. Trabalhos como [6, 21, 28 – 30, 33, 40, 42] dedicam-se a este assunto.

A referência [6] propõe um sistema de potência de 10 kW para um gerador de potência híbrido de bateria de baixa tensão e SOFC de 5 kW, desenvolvido para competir no *Future Energy Challenge* (FEC), propondo desenvolver um inversor para FC's com requerimento mínimo de custo de U\$40/kW e eficiência de 90 %. O sistema consiste de um conversor CC-CC Boost, inversor CC-CA e um conversor CC-CC bi-direcional. Características práticas tais como cálculo de faixa de componentes, projeto de transformador de alta frequência, projeto de dissipação de calor e proteção são detalhados focando custo e eficiência. Uma implementação de baixo custo dos controladores, tipo PI, é discutida, sendo o controle realizado no modo corrente, a regulação de tensão de saída usa capacitor balanceado e um controlador tipo *State of Charge* (SOC) para gerenciamento da bateria. Um protótipo de 10 kW foi construído com sucesso e testado no regime permanente como também no regime transitório. Resultados experimentais são comparadas para estabelecer as necessidades mínimas do inversor da FC, demonstrando boa performance na maioria dos itens de projeto.

Yamaguchi et al [21] apresenta um trabalho de aplicação de um modelo de pilhas de células do tipo Ácido Fosfórico (PAFC), para uma planta de 1 MW, visando a avaliação do controle do sistema de geração. Com a utilização de um modelo dinâmico, é possível o desenvolvimento de pilhas de células, que podem fornecer potência elétrica a uma carga. A importância de tal modelo, atualmente, deve-se aos seguintes aspectos: (i) possibilidade de desenvolvimento de técnicas de controle mais apuradas para a pilha; (ii) análise frente às condições reais de operação; (iii) injeção de energia na rede pública no modo real; (iv) interligação com outras fontes de energia; (v) desenvolvimento de conversores de potência dedicados; (vi) custo reduzido em relação à pilha real; (vii) afastamento do perigo no tratamento de uma tecnologia não bem dominada no que se refere aos gases, reações e níveis de tensão; e (viii) disponibilidade e simulação de qualquer tipo de pilhas, uma vez que se tenha a sua modelagem, entre outros.

A referência [29] apresenta o projeto de um inversor baseado em células de combustível para uso doméstico. As características peculiares da energia da pilha de células de combustível para esta aplicação requerem o uso de uma bateria para armazenamento cujas necessidades são discutidas nesta referência e um grande número de soluções possíveis é avaliado. A solução proposta usa um filtro ativo e uma bateria para compensar a dinâmica lenta da célula de combustível.

A referência [30] mostra um sistema de célula de combustível do tipo PEM portátil de 1 kW que consiste de um gabinete contendo a pilha de células de combustível, cilindros de hidrogênio, um inversor, uma unidade de controle e outros. Volume e massa do sistema são de aproximadamente de 275 L e 120 kg, respectivamente. O sistema pode fornecer 1 kW de potência CA para uma tensão de 100 V por 3 horas usando dois cilindros de hidrogênio de 10 L. O tempo de iniciação é de aproximadamente 1 minuto. O sistema portátil foi utilizado como sistema de auxílio combinado com uma UPS e um sistema de sincronização de chaves. A referência [33] realiza um sistema parecido, mas utilizam ultracapacitores no lugar de banco de baterias, como em [30].

A referência [42] mostra as topologias para um inversor de 10 kW com uma tensão baixa de entrada da célula de combustível, avaliando a simplicidade, performance e custo. Este particular sistema de FC é visado para geração de potência isolada para uso residencial. O inversor proposto tem uma tensão de entrada nominal da FC de 48 Vcc e saída de duas fases de 120 Vca ou uma fase de 240 Vca. Opções de diferentes topologias são exploradas para os estágios conversor CC-CC e inversor, e uma combinação é avaliada em detalhes. Existe uma clara escolha para o conversor CC-CC, mas existem duas opções para o estágio do inversor. Diferentes escolhas de armazenamento de energia foram estudadas. A topologia escolhida contém duas unidades modulares, que são fornecidas com uma série de ultracapacitores na entrada para condições transitórias. Cada módulo consiste de uma Full-Bridge de deslocamento de fase de frente única e um inversor Half-Bridge.

Nesta dissertação utilizou-se o modelo estabelecido por [15] e [16] para desenvolvimento de um sistema de geração de energia elétrica com células de combustível do tipo PEM. Para o desenvolvimento do modelo, foram utilizados elementos das áreas de eletrônica de potência, instrumentação, controle de sistemas, métodos numéricos e programação computacional. Mohan [26] apresenta a base teórica e de projeto dos conversores de potência.

Alguns artigos [3, 5, 6, 22, 24, 29, 31, 37, 39, 40, 42, 45 – 54] apresentam o projeto de alguns conversores de potência, utilizados em células de combustível. Entre estas referências, Pagano [31] apresenta o projeto de um inversor para células de combustível, no qual são definidas as características da FC, focando a possibilidade de se selecionar entre uma bateria e um ultracapacitor como dispositivo de armazenamento de energia com referência aos aspectos elétricos e de confiabilidade.

A referência [3] mostra o estudo de um conversor CC-CC Boost, de alta frequência, usando tensão grampeada (para diminuir as perdas de condução) e técnicas de chaveamento

suave (para diminuir perdas de chaveamento) em sistemas de PEMFC. Pelos resultados experimentais, a eficiência máxima do conversor foi acima de 95 %, que é maior que conversores elevadores convencionais. A referência [5] divulga a utilização de conversor CC-CC Boost padrão para a interface de um motor elétrico geral (*Global Electrical Motor – GEM*) com uma pilha FC integrada, da empresa Ballard com potência de 1,2 kW, aumentando a tensão da célula de 26 V_{CC} para um barramento de bateria de 72 V_{CC}, utilizado em sistemas automotivos.

A referência [24] realizou o estudo de um circuito equivalente baseado no modelo de pequenos sinais para um conversor CC-CC bi-direcional Half-Bridge dual (DHB). Ele é aplicado em veículos movidos a FC que usam bateria como elemento armazenador de energia para fornecer fluxos de potência. A referência [37] apresenta um protótipo construído para 75 kW. Além disso, são mostradas e discutidas as características de operação em regime permanente. A referência [39] desenvolveu um inversor de baixo custo que converte a variável CC de saída da FC em CA utilizada. Este trabalho foi submetido ao *2001 Future Energy Challenge* (FEC) e descreve a topologia utilizada, detalhando os componentes selecionados para otimizar custos e o controle dos conversores CC-CC e CC-CA e, como conclusão, foi desenvolvido um protótipo de 10 kW construído de acordo com o projeto e testado na competição final do FEC. Na referência [42], as topologias para um inversor de 10 kW com baixa tensão de entrada da célula de combustível, são avaliadas simplicidade, performance e custo. Este sistema de FC é destinado para geração de potência isolada (*stand-alone*) para uso residencial.

Os demais artigos [45 – 54] projetam inversores com diversas outras técnicas, como conversores multinível, Half-Bridge, Full-Bridge, Push-Pull, PWM, isolados e não-isolados entre outros, levando em conta o baixo custo, qualidade de energia, alta eficiência, maior confiabilidade, controle simples e segurança. Mas muito destes trabalhos, relacionados às células de combustível, não levam em consideração o comportamento interno da célula, apenas a consideram uma fonte de tensão. Muitos utilizam conversores dos mais variados conectados a FC's, realizando chaveamentos nos modos de condução contínua e descontínua, mas um devido estudo do conversor, diretamente relacionado às células, nunca foi feito.

Um estudo sobre o projeto de filtros ativos é apresentado na referência [4] que mostra o efeito da impedância do conversor que é geralmente ignorado quando se realiza a análise das harmônicas. Este trabalho compara o uso de técnicas simplificadas contra um rigoroso cálculo da impedância dos conversores CA e CC, e demonstra os efeitos na resposta em

freqüência do sistema.

O armazenamento de energia é estudado em [5, 22, 24, 27, 28, 31 e 48]. A referência [22] mostra um conversor ZVS de três portas o qual é hábil para segurar grandes faixas de tensão de entrada tais como células de combustível e supercapacitores. O conversor consiste de três pontes ativas acopladas por um transformador de três enrolamentos. Um método de controle da razão cíclica é introduzido para estender a faixa do chaveamento suave. O sistema é modelado e uma estratégia de controle de malha PI dual é proposto para conseguir tensão de saída regulada e gerenciamento do fluxo de potência. Também o processo de iniciação suave (*soft start*) para o conversor é discutido. Simulação e resultados experimentais de um protótipo de 1 kW verificam a efetividade do conversor proposto e sua estratégia de controle.

A referência [27] apresenta métodos de armazenamento de hidrogênio para unidades de potência para operar no “modo de espera” (*standby*), levando em conta as aplicações a serem usadas (como telecomunicações, por exemplo), dimensões, custos, impacto ambiental, manutenção e segurança. Eles indicam os métodos de armazenamento para duas faixas de potência: unidades pequenas de 500-1000 W e grandes de 50-100 kW. A referência [28] apresenta um sistema de armazenamento de energia renovável e isolada que foi desenvolvido e instalado no Instituto de Pesquisa de Hidrogênio de Quebec (Canadá), testados com sucesso em operação autônoma. O excesso de energia é levado ao eletrolisador para produção de hidrogênio. Quando a energia produzida pelo sistema de energia renovável é insuficiente, devido à necessidade da carga, o hidrogênio armazenado é levado a célula de combustível para produzir eletricidade e a referência [31] evidencia o projeto de um inversor para células de combustível, no qual são definidas as características da FC, focando na possibilidade de se selecionar entre bateria e ultracapacitor como dispositivos de armazenamento de energia com referência aos aspectos elétricos e de confiabilidade.

O controle digital de sistemas é abordado em detalhes nas referências [2, 5, 6, 33, 37, 48, 52, 54]. A análise do controlador PID digital, escolhido para o controle do simulador, foi estudada pelas referências Ogata [18] e Åström e Wittenmark [20]. A referência [52] mostra a estratégia de controle, que permite o inversor se adaptar às exigências da carga como também da fonte de energia (FC). Um aspecto importante do projeto é o uso do DSP TMS320LF2407 para controlar o inversor. A referência [54] apresenta a análise da resposta dinâmica de células de combustível, implementação PWM e projeto de um controlador de malha fechada para o conversor Z. Para uma análise elétrica dos sistemas de potência por FC. Neste trabalho, a célula de combustível foi modelada por um circuito RC incluindo sua curva de polarização

tensão-corrente. Uma equação de espaço de estado discreto é dada para implementar o controle digital e uma técnica de modulação no espaço vetorial de largura de pulso (SVPWM) é modificada para realizar o salto por vetores zero, o que aumenta a tensão do barramento CC. Também são projetados dois controladores (um de tensão e outro de corrente) de realimentação para obter uma tensão senoidal CA sobre cargas lineares/não-lineares. Outros aspectos importantes como frequência de amostragem, seguradores de ordem zero e discretização de sistemas também são descritos nestas referências.

Nesta dissertação utilizou-se aquisição de dados por computador (DSP), por ser esta uma ferramenta poderosa para as áreas de instrumentação e controle. Referências como [6, 19, 22] apresentam trabalhos utilizando DSP's como ferramenta. A redução de custo com o uso das placas de aquisição de dados e de computadores, além do aumento da capacidade destes elementos, difundiu o controle por computador em universidades e empresas.

Johnson [19] apresenta os fundamentos teóricos e de projeto necessários para a utilização dos sensores utilizados num simulador de célula de combustível. Na utilização da instrumentação, é dada atenção especial à isolação dos sinais, garantindo a segurança necessária para os equipamentos e para os operadores.

De Novaes [55] e Larminie [20] apresentam os principais elementos envolvidos na operação das pilhas de células de combustível reais. São descritos os principais tipos de células e as características individuais de cada tipo, como temperatura de operação, pressão, densidade de corrente, característica do combustível utilizado e umidade da membrana. A obtenção do hidrogênio, necessário para a operação de células do tipo PEM, é apresentada, bem como as questões de segurança envolvidas.

Outras referências como [3, 5, 22, 24, 29, 30, 32, 39, 45, 46, 48, 52] demonstram as características das células de combustível pelos projetos desenvolvidos no estudo dos conversores e inversores pesquisados, armazenamento e geração de energia, técnicas de controle e outros. Com base nestas referências e utilizando a modelagem desenvolvida, é realizada uma análise detalhada das principais características envolvidas na operação de pilhas de células de combustível. Os dados obtidos são comparados com dados reais, disponíveis na literatura [17]. A modelagem é adequada para pilhas com potência de até 2kW e incorpora os principais aspectos relativos à operação e controle de células de combustível, fornecendo os subsídios necessários para o desenvolvimento e análise de geração de energia com células do tipo PEM.

Como fecho conclusivo e geral da revisão bibliográfica é visto que muitas referências estudadas, que projetam conversores e inversores para aplicações de células de combustível,

consideram as FC's como uma caixa preta que funciona como fonte de tensão e tais aplicações utilizam capacitores nos terminais das células, sendo assim curto-circuitados nos instantes de chaveamento, podendo danificá-las permanentemente.

No próximo capítulo é realizada uma melhoria no algoritmo de cálculo dos modelos encontrados na literatura sobre as principais características construtivas e operacionais de células de combustível. É apresentada uma revisão da modelagem matemática das células, descrevendo detalhadamente cada termo. Os principais processos envolvidos na geração de energia elétrica com células de combustível são analisados incluindo a definição do alcance do modelo utilizado. São apresentados, ainda, alguns resultados de simulações computacionais.

MODELAGEM MATEMÁTICA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Para implementar a estrutura de controle das células de combustível são necessários modelos que representem tanto o comportamento dinâmico quanto o de regime permanente do sistema. A obtenção deste modelo não é uma tarefa simples, visto que o comportamento da célula envolve um elevado número de variáveis como: temperatura, pressão dos gases, dimensões da célula, hidratação da membrana, propriedades dos materiais constituintes do eletrólito e dos eletrodos, estequiometria dos gases, entre outras. Além da quantidade de variáveis, existe uma interdependência entre elas resultando tudo num sistema não-linear e de alta complexidade.

Diferentes modelos analíticos e empíricos já foram apresentados na literatura, distinguindo-se pelo número de variáveis envolvidas e grau de complexidade. Os modelos analíticos são caracterizados pela necessidade de se conhecer os parâmetros construtivos da célula, tais como: dimensões, hidratação da membrana, fluxo de hidrogênio e propriedades físico-químicas dos materiais constituintes. Na grande maioria das vezes estes dados são desconhecidos, impedindo sua utilização. Quando tais informações estão disponíveis, os modelos analíticos são mais precisos e podem ser usados em uma ampla faixa de operação ao contrário dos modelos empíricos, cujos resultados extraídos representam o comportamento da célula apenas para uma reduzida faixa operacional.

Este capítulo visa apresentar os estudos teóricos dos comportamentos estático e dinâmico de uma pilha de células de combustível do tipo PEM. Para acompanhar este capítulo de forma completa, os Anexos I e II apresentam as equações dos elementos que compõem o modelo da célula de combustível obtidas a partir de modelos que utilizam tanto informações analíticas quanto empíricas.

3.1 Comportamento Tensão x Corrente

Como demonstrado no anexo I, a tensão de saída ideal da célula é fornecida pela Equação (3.1).

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (3.1)$$

no qual:

E é o valor da tensão reversível da FC;

F é a constante de Faraday (carga em um mol de elétrons - $F = 96485 \text{ C/mol}$);

$\Delta \bar{g}_f$ é a energia livre de Gibbs.

Modelando a célula de uma maneira bem simplificada para toda a faixa de operação, é possível representar o comportamento da tensão individual como sendo a tensão reversível subtraída das perdas.

$$i_{FC} \cdot V_{FC} = i_{FC} \cdot (E_o - \text{perdas}) \quad (3.2)$$

A tensão reversível E_o representa a tensão teórica máxima e as perdas são determinadas pelas perdas de ativação, perdas ôhmicas, correntes internas e o transporte de massa ou concentração. Cada uma dessas não-idealidades influi na tensão terminal da célula, como descreve a Equação 3.3.

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{\text{ohmico}} - V_{con} \quad (3.3)$$

Na equação acima, E_{Nernst} é o potencial termodinâmico da célula ou a tensão de circuito aberto ($E_{Nernst} = E_o$), V_{act} é a queda de tensão devida à ativação do anodo e do catodo, ou seja, é uma medida da queda de tensão associada com os eletrodos, V_{ohmico} é a queda de tensão ôhmica, ou seja, uma medida das perdas ôhmicas associadas à condução de prótons no

eletrólito sólido e resistências eletrônicas internas e V_{con} representa a queda de tensão resultante da concentração ou transporte de massa de oxigênio e hidrogênio.

3.2 Modelo Eletroquímico Dinâmico

Nesta seção é apresentado o comportamento da PEMFC com base nos trabalhos [10 - 16] em função de seus parâmetros construtivos e de operação. Apresenta-se também o circuito elétrico equivalente e o diagrama de blocos do comportamento dinâmico da pilha de células de combustível.

A resposta dinâmica da célula está ligada ao fenômeno chamado “dupla camada de carga” (*charge double layer*). Sempre que dois materiais diferentes carregados estão em contato, forma-se um acúmulo de cargas nas superfícies ou uma transferência de cargas de um lado desta superfície para o outro [15]. A interface eletrodo/eletrólito age como armazenadora de cargas elétricas semelhante a um capacitor elétrico. Quando houver uma variação na corrente fornecida, o acúmulo de cargas e, como consequência, a tensão associada, tende a dissipar-se (se a corrente diminuir) ou a concentrar-se (se a corrente aumentar).

Devido à mudança de carga, os sobrepotenciais de ativação e de concentração são afetados, porém o sobrepotencial ôhmico [15] permanece inalterado. O resultado da mudança súbita na corrente é a alteração da tensão de operação (devido ao potencial ôhmico) seguida de uma resposta atenuada de primeira ordem.

Assim sendo, numa forma simplista, pode-se definir um coeficiente de tempo variável τ associado com este atraso como sendo um produto:

$$\tau = C \cdot R_a \tag{3.4}$$

A Figura 3.1 apresenta o circuito elétrico equivalente para o modelo eletroquímico dinâmico da PEMFC.

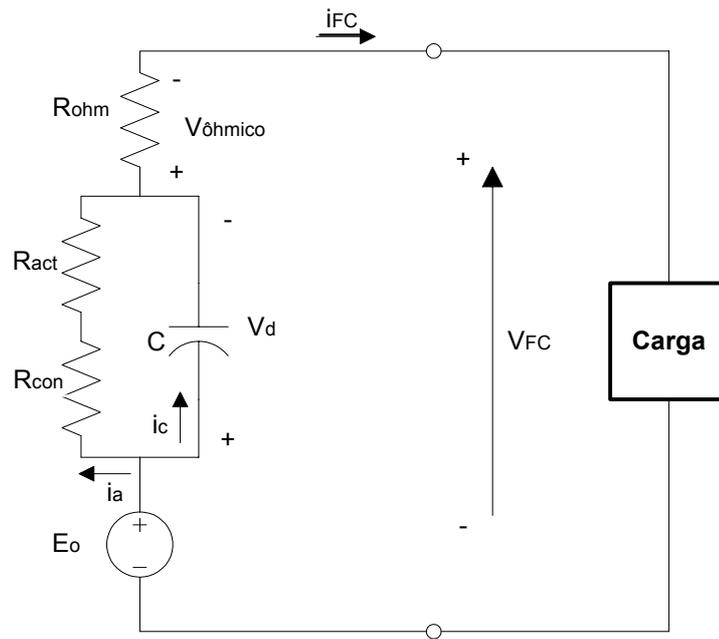


Figura 3.1 – Circuito equivalente ao modelo dinâmico da PEMFC

Numa célula de combustível, o valor da capacitância pode ser da ordem de alguns Faradays. A resistência R_a é determinada a partir da parcela de corrente da célula referente às perdas de ativação e de concentração e das suas respectivas tensões calculadas para a nova condição de operação. A equação matemática para determinar R_a é:

$$R_a = \frac{V_{act} + V_{con}}{i_a} \quad (3.5)$$

na qual:

i_a : é a parcela de corrente de i_{FC} que alimenta os sobrepotenciais de ativação e de concentração.

A equação da corrente da pilha de células de combustível é:

$$i_{FC} = i_a + i_C \quad (3.6)$$

na qual:

i_c : é a parcela de corrente de i_{FC} através da capacitância C , em paralelo com as perdas de ativação e de concentração.

De uma maneira geral, o efeito da capacitância dá à célula uma performance dinâmica, já que a tensão varia suavemente para cada novo valor em resposta a uma variação na demanda de corrente. Isso permite um simples e efetivo modo de distinguir os principais tipos de queda de tensão e também de analisar a performance da célula de combustível. Na realidade, a construção da célula de combustível não contém nenhum capacitor, mas este efeito forma-se pela existência dos eletrodos e eletrólitos em série que se comportam eletricamente como tal.

O equacionamento do modelo elétrico matemático é baseado nas equações eletroquímicas das células de combustível, segundo as referências [11, 12, 14 - 16]. Neste modelo, R_{ohm} representa o potencial ôhmico que tem um comportamento linear em relação à corrente. Os resistores R_{act} e R_{con} representam as resistências dos potenciais de ativação e de concentração, respectivamente.

Com base na equação 3.3, pode-se fazer a seguinte análise:

$$V_{\text{ohmico}} = R_{\text{ohm}} \cdot i_{FC} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{con}} = R_{\text{con}} \cdot i_a \quad (3.8)$$

$$V_{\text{act}} = R_{\text{act}} \cdot i_a \quad (3.9)$$

Considerando as equações 3.5 e 3.6 tem-se:

$$V_d = R_a \cdot i_a \quad (3.10)$$

Tendo a equação da corrente i_c como:

$$i_c = C \cdot \frac{dV_d}{dt} \quad (3.11)$$

Usando a equação 3.10 com as equações 3.6 e 3.11 obtém-se:

$$V_d = \left(i_{FC} - C \cdot \frac{dV_d}{dt} \right) \cdot R_a \quad (3.12)$$

Com essa descrição é possível obter-se o modelo eletroquímico dinâmico não-linear, na forma de diagrama de blocos, conforme mostra a Figura 3.2.

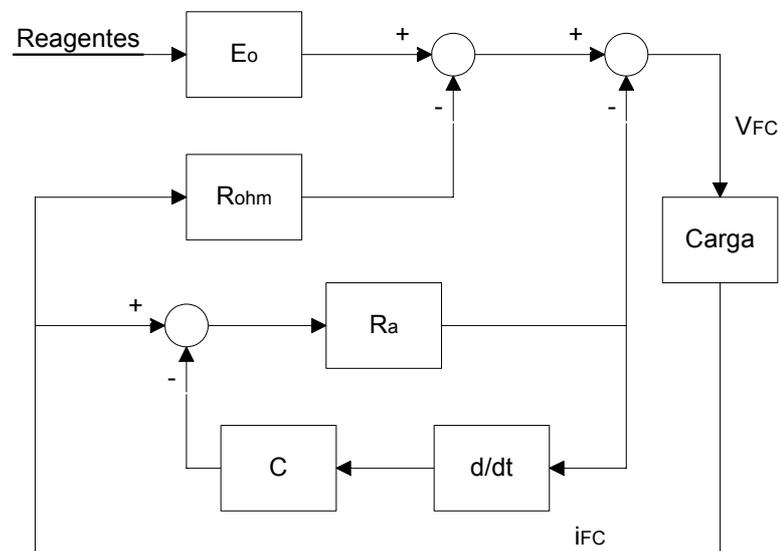


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do modelo eletroquímico dinâmico não-linear

3.3 Simulação do Modelo Eletroquímico

3.3.1 Modelo para a célula Mark V

Para a simulação do modelo usado nesta dissertação, foi usada uma célula unitária, modelo Ballard Mark V alimentada com H₂ e O₂ que utiliza a membrana Nafion 117. Os parâmetros utilizados para esta simulação são apresentados nas Tabela 3.1. A temperatura de realização da simulação é de 70 °C e as pressões parciais são consideradas constantes e iguais a 1 atm.

Uma forma mais conveniente de se proceder aos cálculos usando o modelo da célula em relação à proposta em [16] é a separação da corrente da pilha de células de combustível i_{FC} nas correntes i_a e i_c , conforme a Equação 3.6. A referência [16] havia utilizado a corrente i_{FC} para os sobrepotenciais de ativação e de concentração e também para a capacitância, sem fazer distinção entre elas. Para observar as possíveis diferenças entre as soluções obtidas, fez-se uma comparação de resultados usando dados práticos e teóricos encontrados em [11] e [16]. Os parâmetros usados da célula, mostrados na Tabela 3.1, foram os mesmos. A única diferença entre os modelos apresentados é que a resistência dos contatos ao fluxo de elétrons R_C no algoritmo de cálculo é o mesmo da Tabela 3.1 e da referência [16] que é de $1m\Omega$. Essa diferença reflete-se na curva de polarização, mais especificamente sobre o potencial ôhmico, atuando de forma a deixar mais retilínea a queda de tensão conforme o aumento de corrente.

A referência [11] utiliza uma densidade de corrente de $1,5 A/cm^2$, assim como no algoritmo de cálculo modificado e na referência [16]. As demais curvas da célula de combustível da Ballard apresentam a mesma característica.

A curva de polarização representa a tensão de saída da FC em função da densidade de corrente, em regime permanente. O resultado obtido com a simulação é apresentado na Figura 3.3, que também mostra os resultados dos testes práticos (pontos cheios) [11] e os resultados de simulação da referência [16] e do algoritmo de cálculo modificado nesta dissertação.

Tabela 3.1 - Parâmetros da célula Mark V [11]

Parâm.	Valor	Parâm.	Valor
T	343,15 K	ξ_1	-0,79
A	50,6 cm ²	ξ_2	$0,00286+0,0002 \cdot \ln A+(4,3 \cdot 10^{-5}) \cdot \ln c_{H_2}$
l	178 μ m	ξ_3	$7,6 \cdot 10^{-5}$
P_{O_2}	1 atm	ξ_4	$-1,93 \cdot 10^{-4}$
P_{H_2}	1 atm	ψ	23,0
R_C	1 $\mu \Omega$	J_n	2 mA/cm ²
B	0,016 V	J_{max}	1500 mA/cm ²

Os resultados da simulação apresentam concordância razoável com os resultados reais. Também é mostrado na curva os diferentes instantes em que ocorrem as perdas de ativação, ôhmica e de concentração. Na Figura 3.4, para as densidades de corrente de 0,1 A/cm² e 1,3 A/cm², o erro se manteve abaixo de 2%. Este valor é considerado aceitável, levando-se em consideração a dificuldade para obter os valores exatos dos parâmetros.

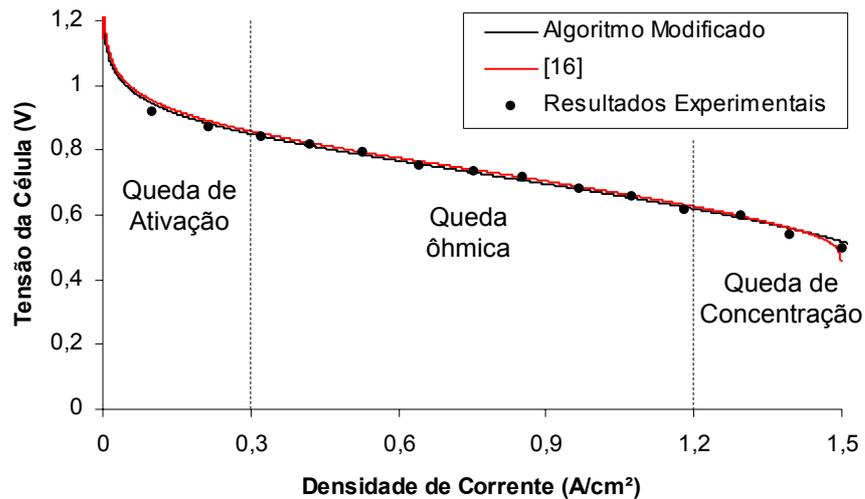


Figura 3.3 – Curva de polarização da PEMFC

O rendimento da PEMFC é representado na Figura 3.4 e a densidade de potência da célula é representada na Figura 3.5, sendo ambas em função da densidade de corrente. A diferença entre as Figuras 3.3 e 3.4 praticamente é um fator de escala, dado pela Equação I.14, do Anexo I, representando como calcular o rendimento.

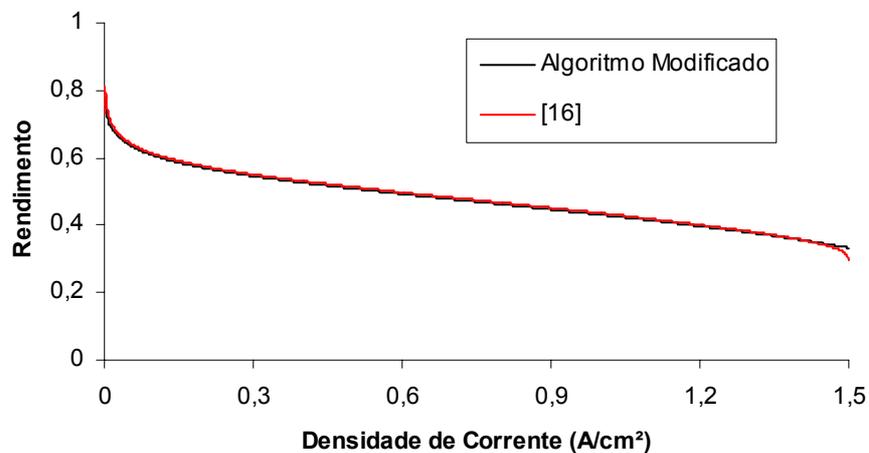


Figura 3.4 - Rendimento da PEMFC

A partir dos gráficos das Figuras 3.3 e 3.4 observa-se que a tensão e o rendimento da célula apresentam valores mais elevados para baixas densidades de corrente. Já para valores mais elevados de corrente, o rendimento e a tensão apresentam valores menores. Portanto, deve-se encontrar o ponto ótimo de operação da célula, levando-se em conta os melhores rendimento, tensão e potência para alimentar a carga. Ou seja, não se pode trabalhar com uma tensão muito elevada (e, conseqüentemente, um rendimento elevado), pois a potência de saída seria muito reduzida, significando que a célula deveria ser superdimensionada para uma determinada aplicação. Também não se pode operar com uma corrente de saída muito elevada, pois neste caso a tensão de saída e o rendimento da célula seriam muito reduzidos, além de diminuir a vida útil da célula. É necessário, então, estabelecer um compromisso entre o rendimento e a potência fornecida pela FC.

Os resultados comparados mostram que as simulações contidas neste trabalho, na referência [16] e nos resultados práticos em [11] indicam boa aproximação entre as curvas, tendo uma densidade máxima de corrente utilizada por [16] de $1,5 \text{ A/cm}^2$, como a deste trabalho e a da referência [11]. Devido ao fato da referência [16] usar $J_{\text{max}} = 1,5 \text{ A/cm}^2$, as curvas do rendimento e da tensão apresentam uma queda antecipada, ou seja, haveria um sobrepotencial de concentração maior atuando no sistema. Basicamente as diferenças estão nos parâmetros estabelecidos em cada um dos estudos realizados.

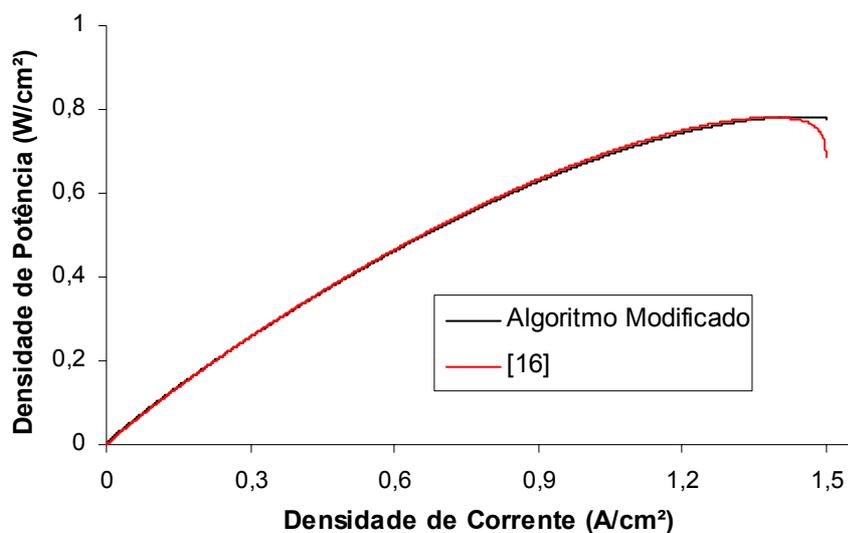


Figura 3.5 – Densidade de potência da PEMFC

3.3.2 Modelo BCS

Os dados da pilha nesta dissertação foram usados para simulá-la a uma temperatura de operação de 60 °C, alimentada com H₂ e ar ambiente. Assim, a pressão parcial do hidrogênio foi considerada constante e igual a 1 atm enquanto que a pressão parcial do oxigênio foi considerada 0,2095 atm (equivalente à sua proporção na composição do ar) que foi suprido à pressão de 1 atm. Por falta de maiores informações sobre a membrana que compõe a pilha, foi considerada a membrana Nafion 117.

A Figura 3.6 apresenta o comparativo dos resultados experimentais [17] com os resultados obtidos na simulação, para a curva característica da pilha.

Para estudo de comparação, o algoritmo de cálculo modificado e a referência [16] apresentam uma densidade máxima de corrente de 469mA/cm². Nos documentos da pilha BCS de 500W, o fabricante apresenta as curvas de polarização e de potência. Como os resultados da simulação do modelo da pilha são experimentais, normalmente os fabricantes realizam testes com uma densidade alta de corrente, mas limitada, pois o sobrepotencial de concentração poderia ser alto o suficiente para se ter uma rápida queda de tensão, acarretando na danificação da pilha inteira.

Tabela 3.2 - Parâmetros da pilha BCS, 500 W

Parâm.	Valor	Parâm.	Valor
T	333,15 K	ξ_1	-0,948
A	64 cm ²	ξ_2	$0,00286+0,0002.\ln A+(4,3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
l	178 μ m	ξ_3	$7,6.10^{-5}$
P _{O₂}	0,2095 atm	ξ_4	$-1,93.10^{-4}$
P _{H₂}	1 atm	ψ	23,0
R _C	0,003 Ω	J _n	2 mA/cm ²
B	0,016 V	J _{max}	469 mA/cm ²
n	32	C	1 F

Pode-se observar na Figura 3.6 uma boa concordância entre os valores simulados pelo algoritmo modificado e os dados do fabricante; o erro observado foi da ordem de menos de 3%, na região central da curva. Também é mostrado na curva os diferentes instantes em que ocorrem as perdas de ativação, ôhmica e de concentração. Considerando o grau de precisão obtido, pode-se concluir que a modelagem utilizada é adequada para aplicação com células unitárias e com pilhas de células de potência reduzida (até 2 kW). A diferença observada deve-se ao fato de que alguns parâmetros não estão disponíveis nos dados da pilha real, sendo que estes foram estimados a partir de dados similares apresentados na literatura.

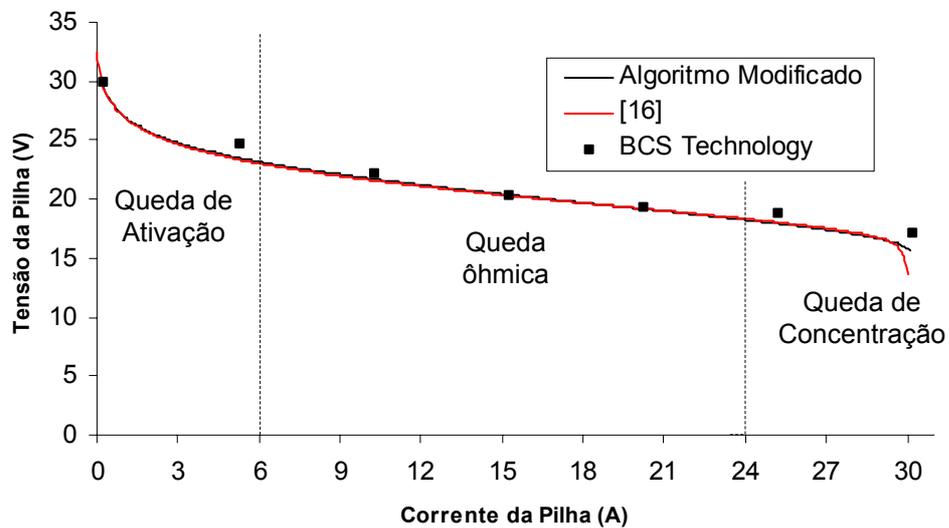


Figura 3.6 – Curva de polarização de uma pilha BCS de 500W

A Figura 3.7 apresenta o comparativo entre a potência real, dada pelo fabricante, e a potência baseada no algoritmo de cálculo modificado, para as mesmas condições da Tabela 3.2. A Figura 3.8 apresenta a curva do rendimento simulado para a pilha. Observando-se as Figuras 3.7 e 3.8, conclui-se que o rendimento da pilha para potência nominal de 500 W (potência máxima) é de cerca de 33%.

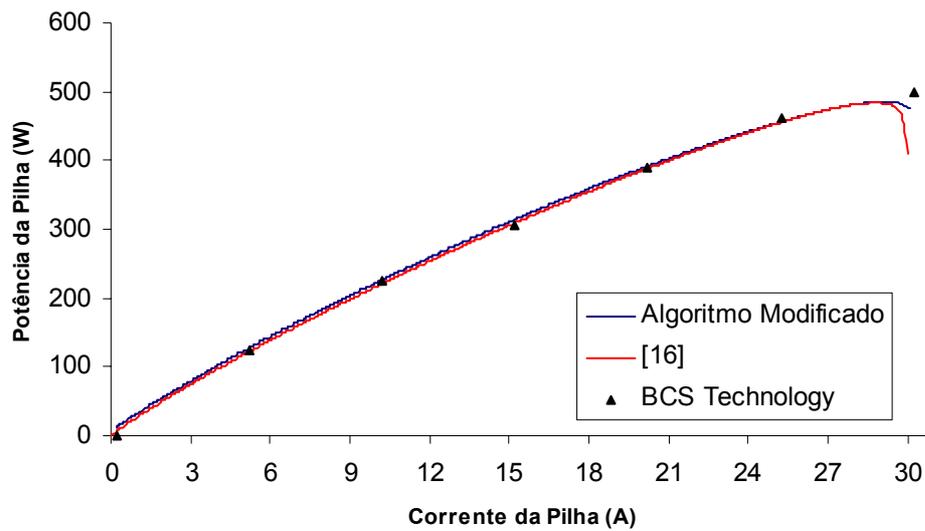


Figura 3.7 – Potência real e simulada de uma pilha BCS de 500 W

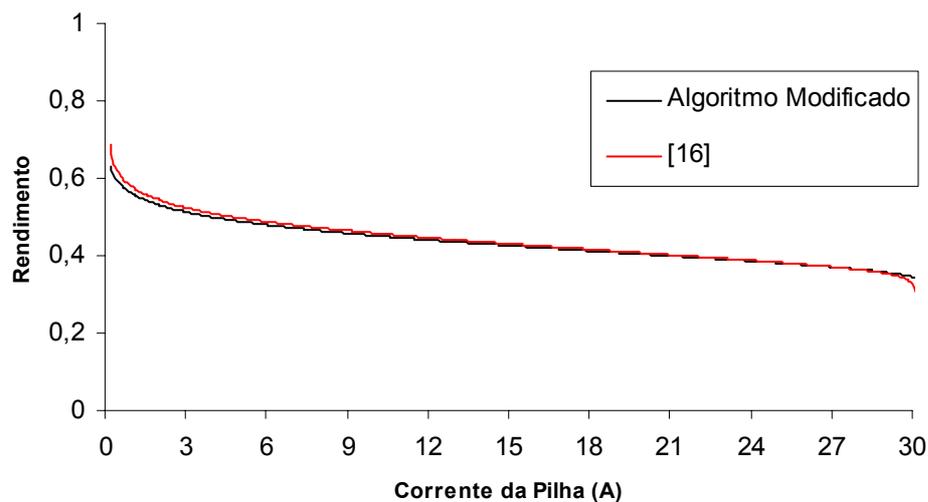


Figura 3.8 – Rendimento de uma pilha BCS de 500W

A diferença nos resultados entre o algoritmo de cálculo modificado e a referência [16], em relação aos dados experimentais [17], deve-se ao fato de que em [16] atingiu uma potência máxima de 480 W, enquanto com o algoritmo de cálculo modificado obteve-se uma potência máxima de 487 W. A Figura 3.8, que apresenta as curvas de rendimento do algoritmo de cálculo modificado e da referência [16], mostram-se ambas bem próximas, indicando um rendimento médio de 45 %.

3.4 Simulação Dinâmica

3.4.1 Modelo Mark V

Esta seção apresenta os resultados de simulação, obtidos com o algoritmo desenvolvido, comparando com os da referência Novaes [16] para a modelagem eletroquímica dinâmica de células de combustível do tipo PEM. A principal diferença entre o algoritmo desenvolvido e a referência [16] é devido a separação das correntes circulantes na célula (i_a – parcela de corrente da pilha que circula pelas perdas de ativação e de concentração e i_c - parcela de corrente da pilha que circula pelas capacitância), em relação ao modelo elétrico equivalente. No modelo desenvolvido foi realizado essa separação, no entanto, na referência Novaes não ocorreu.

Para os seguintes resultados, os testes correspondem ao uso de uma pilha de células de combustível do tipo PEM, modelo Mark V, da empresa Ballard, consistindo de uma associação de 35 células, com área ativa para cada célula de 232 cm^2 , com potência de 5 kW para uma densidade de corrente de 960 mA/cm^2 . O capacitor usado para avaliar o comportamento dinâmico é de 3 F. Os outros parâmetros são os mesmos descritos na Tabela 3.3. De acordo com o modelo descrito no capítulo 3, as pressões parciais de hidrogênio e oxigênio influenciam na tensão da pilha resultante. Nas simulações o ar foi usado como oxidante e então a pressão parcial de oxigênio é de 0,2095 atm (aproximadamente 21% que equivale à sua proporção na composição do ar).

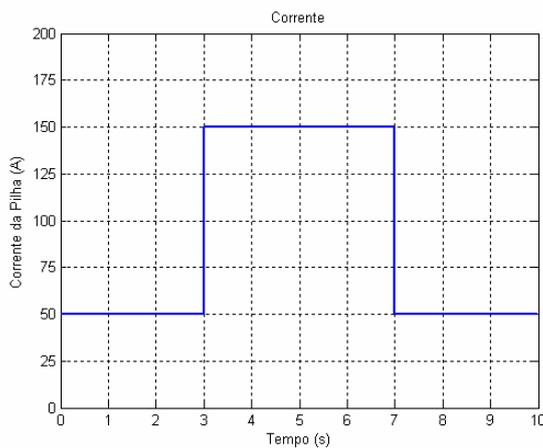
Figura 3.9 mostra o degrau de corrente para teste de uma inserção de carga parcial seguida de rejeição de carga. Inicialmente, a pilha fornece 50 A para a carga; depois de 3 s de simulação, a corrente é aumentada para 150 A, e permanece neste valor até o tempo de simulação alcançar 7 s. Finalmente, a corrente de carga diminui voltando para 50 A, até o fim da simulação (10 s). A Figura 3.9(a) mostra o resultado da simulação do algoritmo desenvolvido na dissertação e a Figura 3.9(b) mostra da referência Côrrea [16]. Pode-se ver que ambos estão iguais, para verificar a simulação dinâmica obtida.

Figura 3.10 apresenta a curva da tensão resultante. Pode ser visto uma resposta atenuada, tanto na injeção quanto na rejeição de corrente, como esperado. Na figura 3.10(a), os valores de tensão são 30,59 V antes de injeção de corrente, 24,91 V durante o pulso e, novamente, 30,59 V quando a corrente é retirada. Estes valores são obtidos após o regime

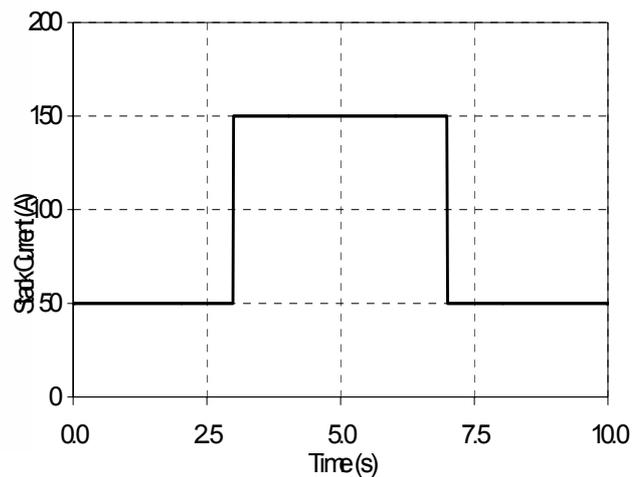
transitório da célula. Pode ser visto também na Figura 3.10(a) a estabilização da tensão no tempo de iniciação da célula (*startup*), tendo a queda de tensão devido as correntes internas da pilha. Para a Figura 3.10(b) os valores de tensão são 30,7 V antes de injeção de corrente, 25,83 V durante o pulso e, novamente, 30,7 V quando a corrente é retirada. Na referência [16] não mostra o efeito da iniciação da célula.

Tabela 3.3 - Parâmetros da Célula Mark V [11,16]

Parâm.	Valor	Parâm.	Valor
T	343,15 K	ξ_1	-0,79
A	232 cm ²	ξ_2	$0,00286+0,0002 \cdot \ln A+(4,3 \cdot 10^{-5}) \cdot \ln c_{H_2}$
l	178 μm	ξ_3	$7,6 \cdot 10^{-5}$
P _{O₂}	1 atm	ξ_4	$-1,93 \cdot 10^{-4}$
P _{H₂}	0,2095 atm	ψ	23,0
R _C	0,0003 Ω	J _n	2 mA/cm ²
B	0,016 V	J _{max}	960 mA/cm ²



(a)



(b)

Figura 3.9 – Corrente da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição

Na Figura 3.11 pode ser visto a resposta da potência. A Figura 3.11(a) relaciona-se ao algoritmo desenvolvido na dissertação e mostra um pico no instante de inserção de corrente,

com valor máximo de 4,2 kW. Quando o degrau é retirado, a potência apresenta um valor mínimo de 1,39 kW. O valor da potência em regime permanente é 1,54 kW para uma corrente de 50 A e 3,75 kW para uma corrente de 150 A. Para a Figura 3.11(b) o pico no instante de inserção de corrente apresenta valor máximo de 4,36 kW. Quando a corrente é retirada, a potência apresenta um valor mínimo de 1,37 kW. O valor da potência em regime permanente é 1,53 kW para uma corrente de 50 A e 3,87 kW para uma corrente de 150 A.

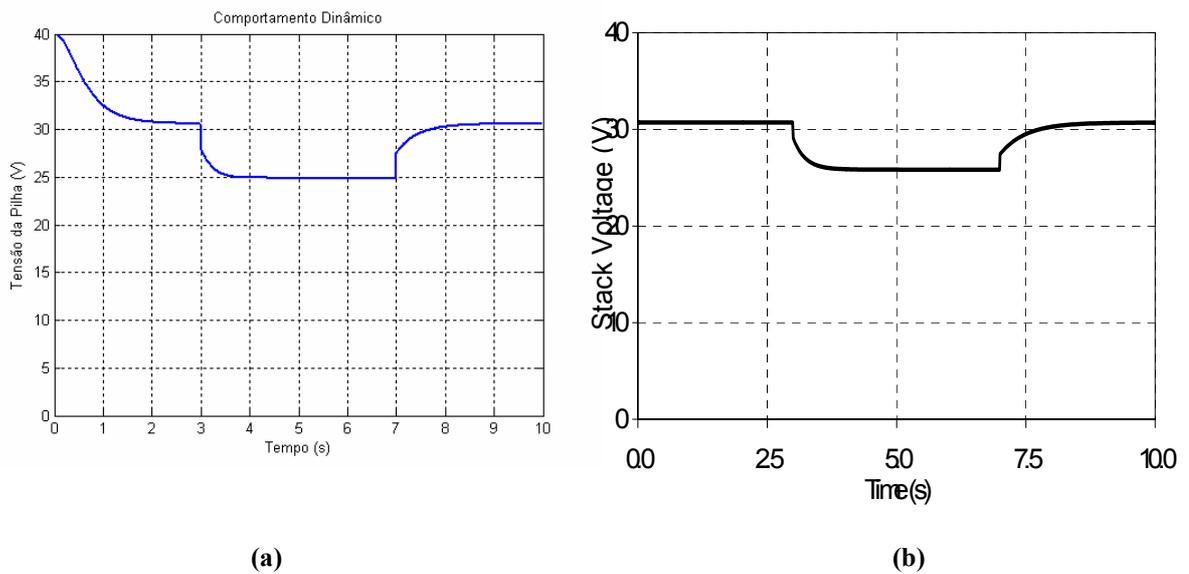


Figura 3.10 – Tensão da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição

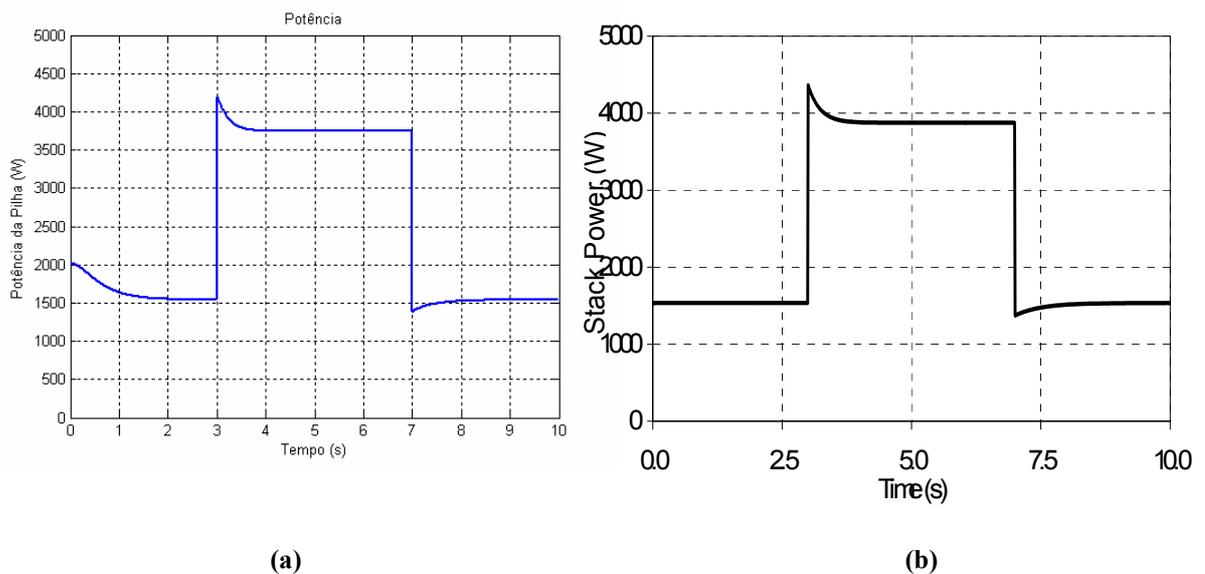


Figura 3.11 – Potência da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição

A eficiência da pilha é mostrada na Figura 3.12. O comportamento é similar ao da tensão, pois estão diretamente relacionados. Para a Figura 3.12(a), os valores em regime

permanente para o rendimento são 56,1 % para uma corrente de 50 A e 45,7 % para uma corrente de 150 A. Pode ser visto que há uma redução significativa na eficiência por variações da demanda de corrente, o qual pode ser levado em consideração quando avalia algum sistema. Para a Figura 3.12(b), referente a Novaes [16], os valores em regime permanente para o rendimento são 56,2 % para uma corrente de 50 A e 47,3 % para uma corrente de 150 A.

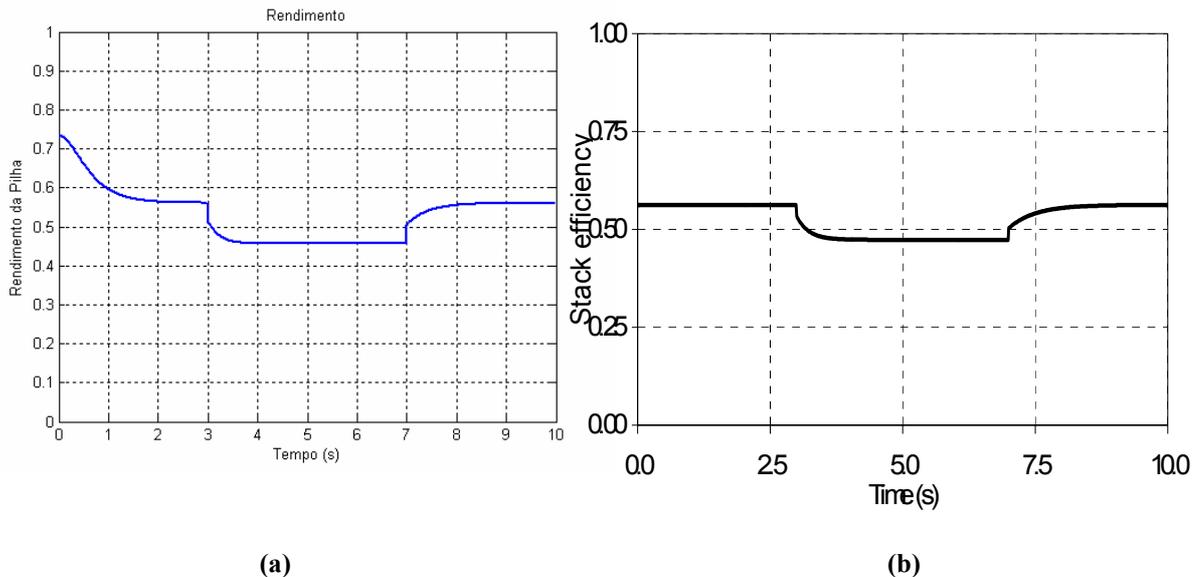


Figura 3.12 – Rendimento da pilha para inserção parcial de corrente e teste de rejeição

Pode-se ver que os resultados foram bastante próximos, mas percebe-se que qualquer mudança nos parâmetros as respostas apresentam um comportamento diferente. Neste caso apenas a separação das correntes circulantes na célula são feitas e notou-se uma pequena diferença nos valores obtidos em cada simulação.

3.4.2 Modelo BCS

Esta seção apresenta uma síntese da modelagem descrita neste capítulo e no Anexo II, através da simulação de uma condição dinâmica. Para o teste que segue, foi utilizado o modelo dinâmico da pilha BCS de 500 W, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.2.

Com base no algoritmo desenvolvido nesta dissertação, as simulações foram realizadas considerando-se a pilha operando na temperatura ambiente. A condição ambiental para o teste é: temperatura de 25 °C e pressão atmosférica normal. O teste foi realizado para verificar a resposta da pilha para o chaveamento de uma corrente em degrau.

Inicialmente, considera-se a pilha operando em vazio, para logo após, em torno de 200 s de simulação, inserir-se uma corrente de 15 A que é mantida até os 325 s, Figura 3.13. A inserção brusca de corrente foi escolhida para avaliar o comportamento dos vários fenômenos envolvidos na operação das pilhas de células de combustível como: tensão, rendimento, potência elétrica, entre outros.

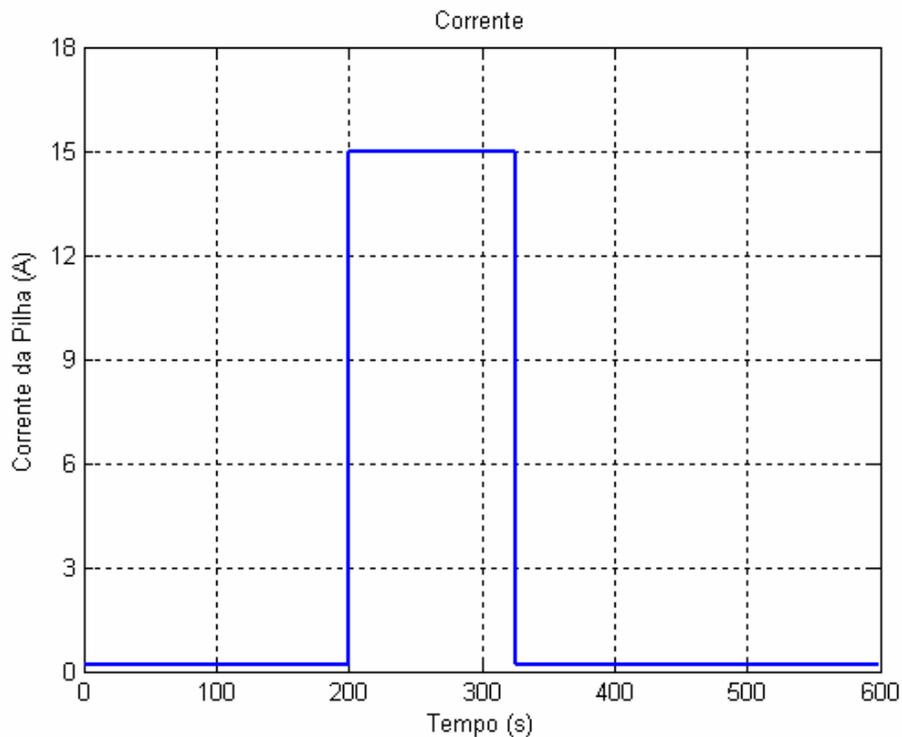


Figura 3.13 – Degrau de corrente para simulação dinâmica

Nesta simulação dinâmica foi necessário um longo tempo de operação a vazio da pilha devido ao estabelecimento das correntes internas de operação. Assim sendo, precisa-se de um tempo razoável de iniciação (*start-up*) para que ela possa chegar a tensão estável de saída. Este tempo de iniciação pode levar, em uma pilha real, alguns minutos.

A Figura 3.14 apresenta a resposta de tensão para este teste. Pode-se perceber que há uma acentuada variação inicial da tensão (de 0 a 100 segundos), resultado das correntes internas da pilha.

Quando ocorre a inserção de corrente há uma diminuição instantânea na tensão, formada pela tensão de circuito aberto da FC (Figura 3.15), devido ao sobrepotencial ôhmico, visto na Figura 3.16, seguida de uma resposta rápida de primeira ordem, devido aos sobrepotenciais de ativação (Figura 3.17) e de concentração (Figura 3.18), que atingem o

ponto de equilíbrio com tensão de aproximadamente 20 V. O tempo de estabilização é de 7 s. Esse tempo é pequeno devido ao baixo valor da resistência equivalente após o chaveamento $(R_L + R_{ohm})//R_a$.

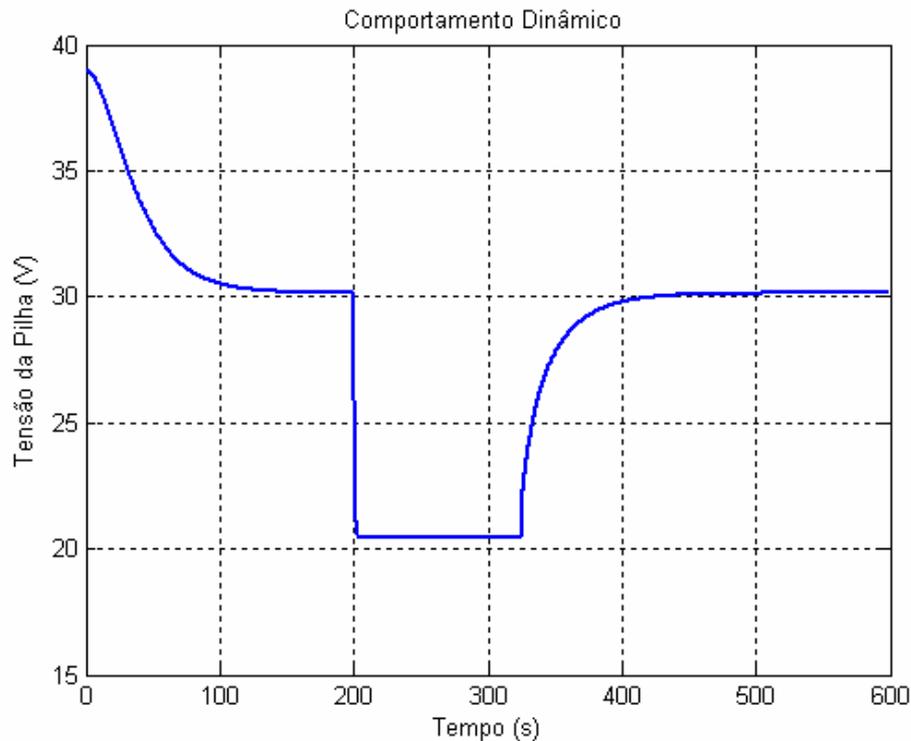
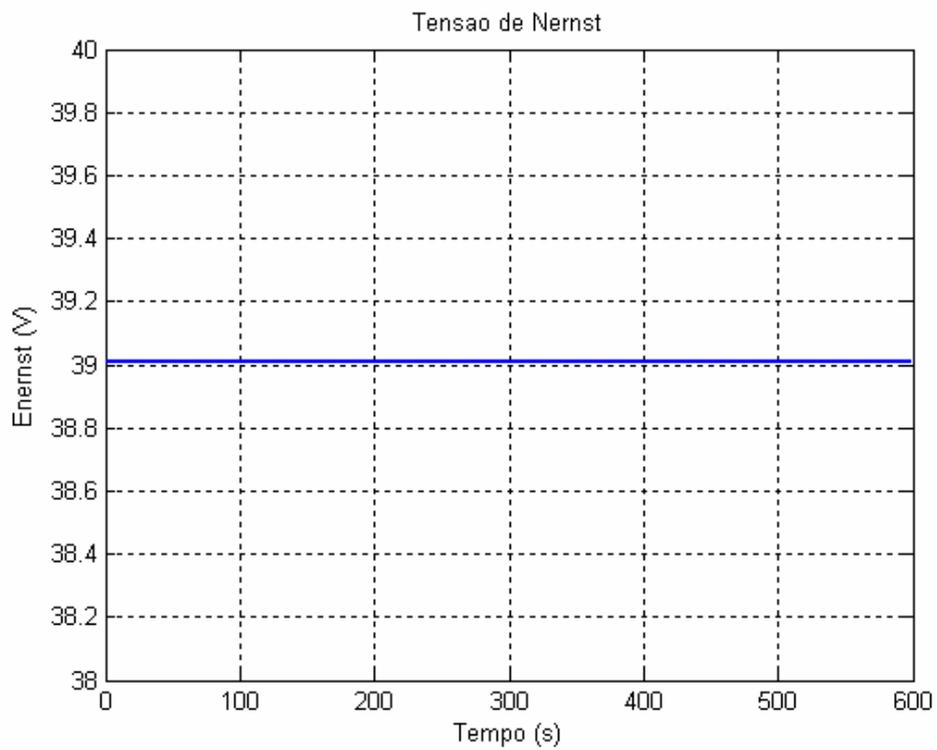
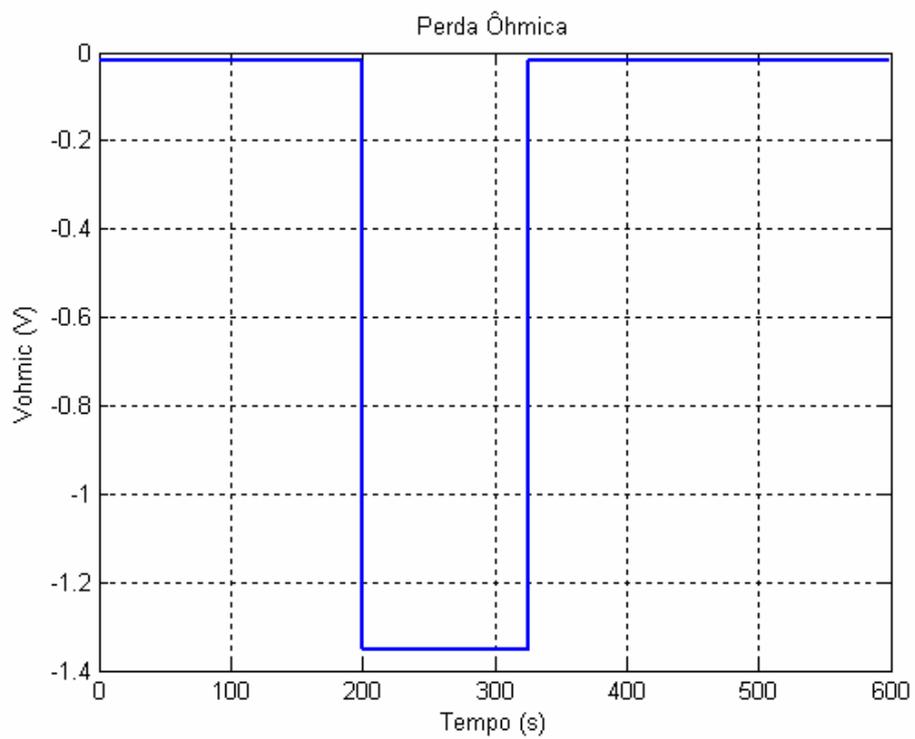


Figura 3.14 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente

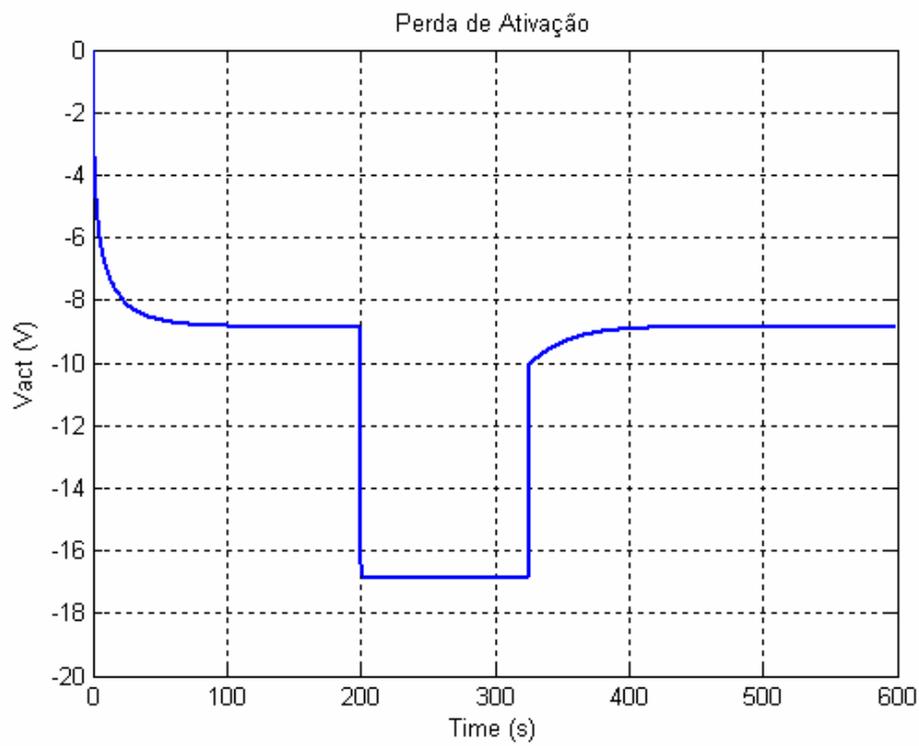
Após a interrupção de corrente, a tensão apresenta também um comportamento de primeira ordem. No entanto, a resistência equivalente é muito maior e é representada exclusivamente por R_a . Esse resultado pode ser visto também na Figura 3.19, ou seja, no momento em que ocorre o degrau de corrente com toda a energia armazenada em C que é rapidamente descarregada (pico de corrente) através de $(R_L + R_{ohm})//R_a$. Isso mostra que o coeficiente de tempo associado a esse circuito, é muito pequeno sendo devido exclusivamente à pequena resistência equivalente, R_a , que varia de $0,5 \Omega$ (c/ carga) a 50Ω (sem carga).



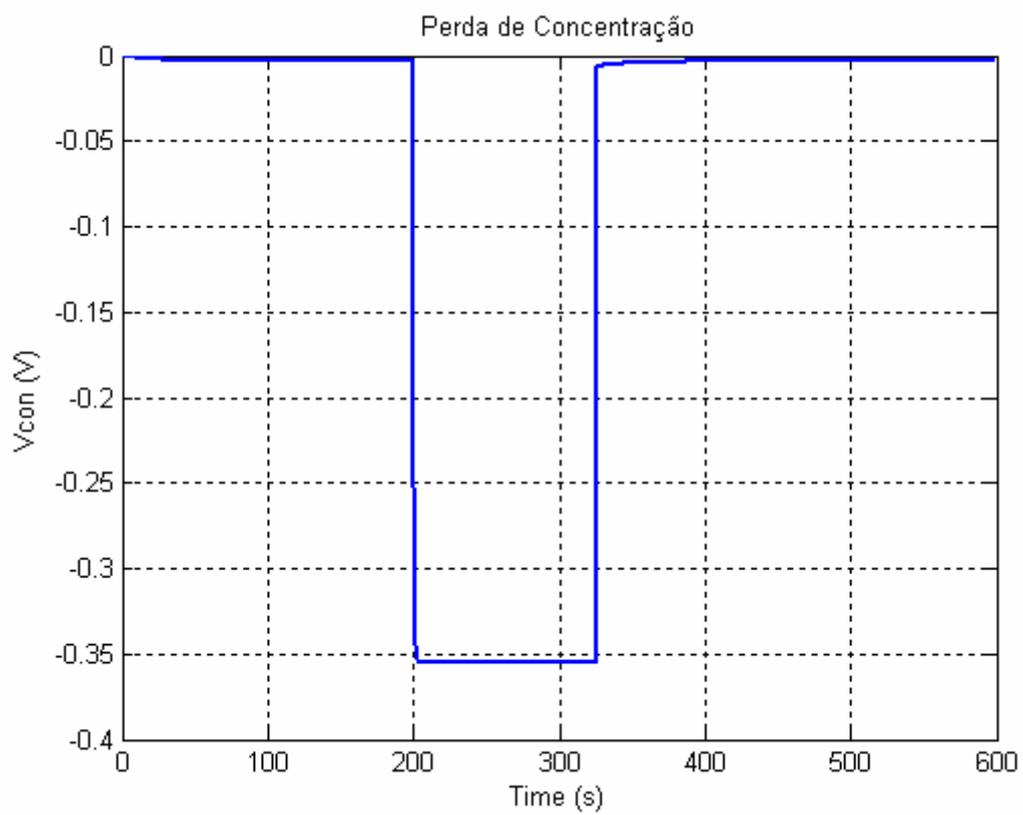
3.15 – Tensão de Nernst



3.16 – Perda ôhmica



3.17 – Perda de ativação



3.18 – Perda de concentração

No instante em que a corrente é levada a zero, a célula não é mais submetida a um pico de corrente uma vez que a resistência equivalente é representada apenas por R_a o que resulta em um tempo muito maior necessário para descarregar completamente C.

Toda esta análise mostra que o coeficiente de tempo de uma célula de combustível torna-se variável quando a célula for submetida a transitórios. Nesta dissertação, este coeficiente é considerado pontualmente constante, para cada condição de corrente e temperatura. Já o rendimento, Figura 3.20, é da ordem de 40,9 % se a célula está sob corrente nominal. A informação primordial apresentada na Figura 3.21 é o pico de potência (valor 40 % superior ao nominal) no momento da inserção de corrente.

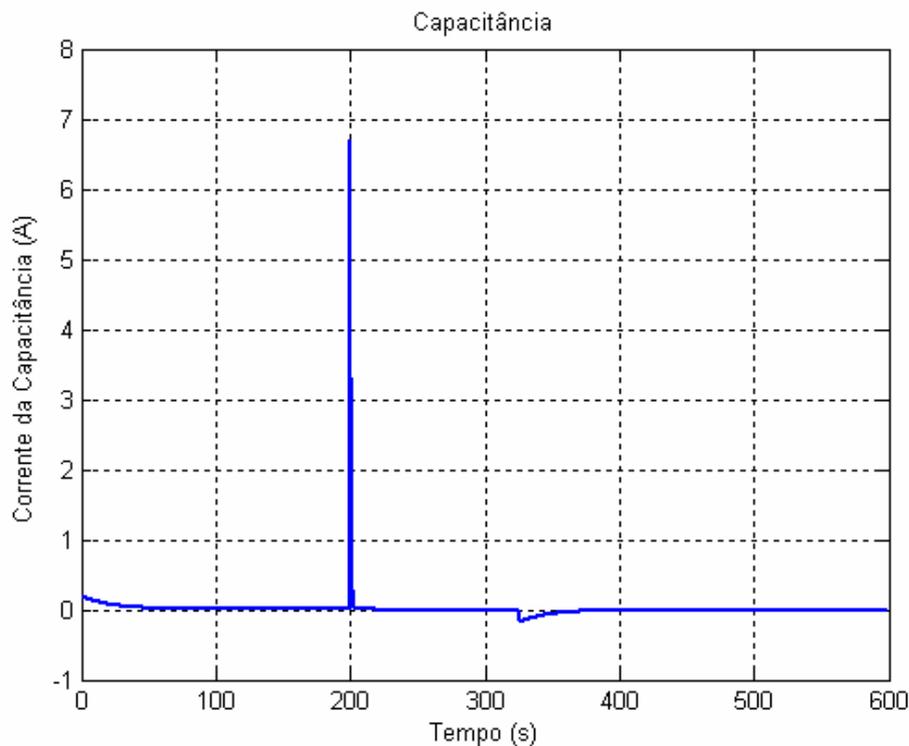


Figura 3.19 – Corrente da capacitância

Conclui-se de toda essa análise que uma célula de combustível submetida a degraus de corrente, ou se o conversor que está conectado nos seus terminais opera no modo de condução descontínua, sofre esforços elétricos extras que podem ser reduzido fazendo com que este conversor de saída opere no modo de condução contínua.

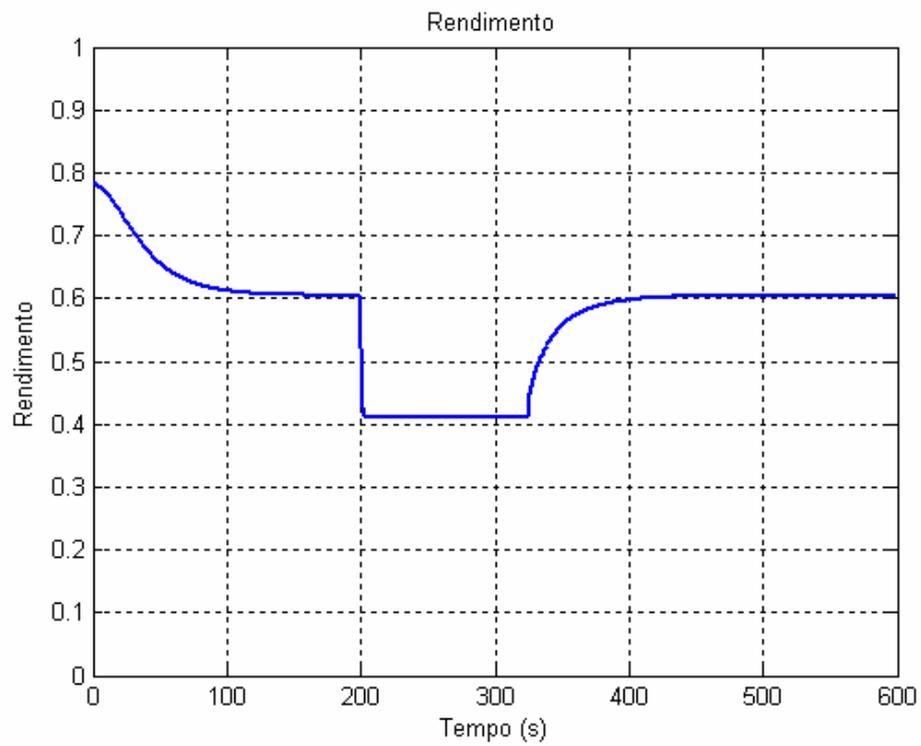


Figura 3.20 – Rendimento da pilha para um degrau de corrente

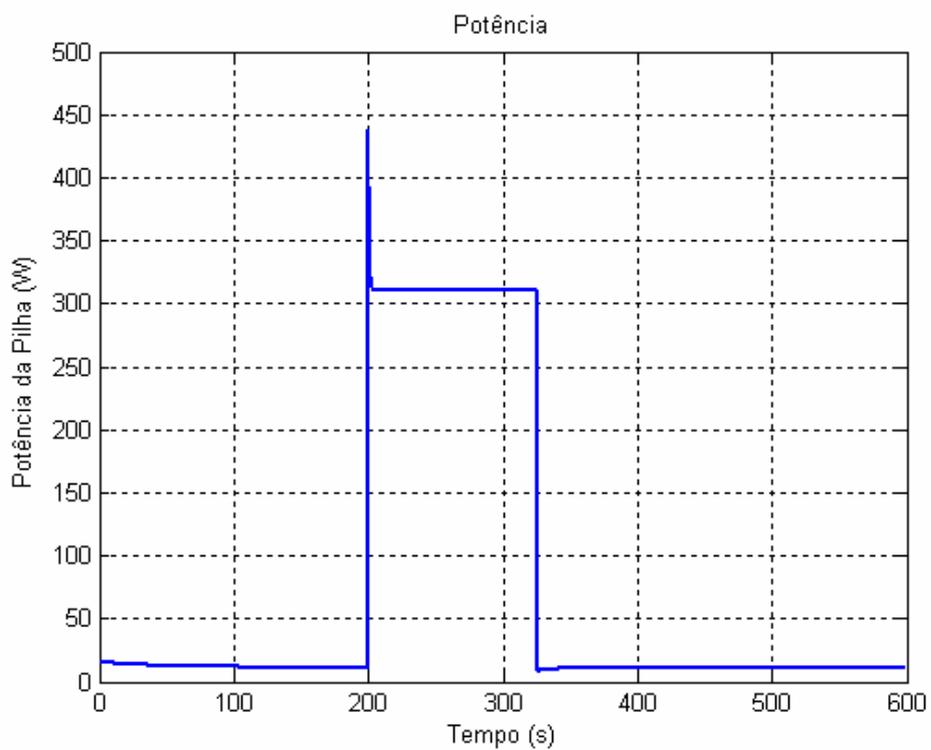


Figura 3.21 – Potência gerada pela pilha para um degrau de corrente

3.4.3 Modelo SR-12

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a simulação do comportamento dinâmico da pilha de células de combustível do tipo PEM da empresa Avista, modelo SR-12, de 500 W, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3.4.

Com base no algoritmo desenvolvido nesta dissertação, a simulação foi realizada considerando-se também esta pilha operando a uma temperatura de operação de 60 °C. O teste foi realizado para verificar como é a resposta da pilha para o chaveamento com uma carga em degrau.

Inicialmente, considera-se a pilha operando com uma corrente de aproximadamente 0,89 A, para logo após um tempo em torno de 2 s de simulação, inserir-se uma carga com corrente de aproximadamente 15 A que é mantida até 3 s. Tal corrente apresenta um pico de corrente de 21,4 A na inserção, como se vê na Figura 3.22, retornando-se para uma corrente de 0,89 A. A inserção brusca de carga foi escolhida para poder-se avaliar o comportamento dos vários fenômenos envolvidos na operação de pilhas de células de combustível como: tensão, rendimento, potência elétrica, entre outros.

Tabela 3.4 - Parâmetros da pilha SR-12, 500 W

Parâm.	Valor	Parâm.	Valor
T	333,15 K	ξ_1	-0,948
A	62,5 cm ²	ξ_2	$0,00286+0,0002.\ln A+(4,3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
l	250 μ m	ξ_3	$7,6.10^{-5}$
P _{O₂}	1,26 atm	ξ_4	$-1,93.10^{-4}$
P _{H₂}	1,3 atm	ψ	16,0
R _C	0,002 Ω	J _n	22 mA/cm ²
B	0,2 V	J _{max}	672 mA/cm ²
n	48	C	7,2 mF

Nesta simulação dinâmica foi necessário um curto tempo de operação a vazio da pilha, pois esta possui naturalmente correntes internas de operação, e precisa-se de um tempo de

iniciação (*start-up*) da pilha para que se possa mostrar a tensão de forma estabilizada que, no caso discutido nesta seção, é de valor 42,8 V. Este tempo de iniciação pode levar, em uma pilha real, alguns minutos.

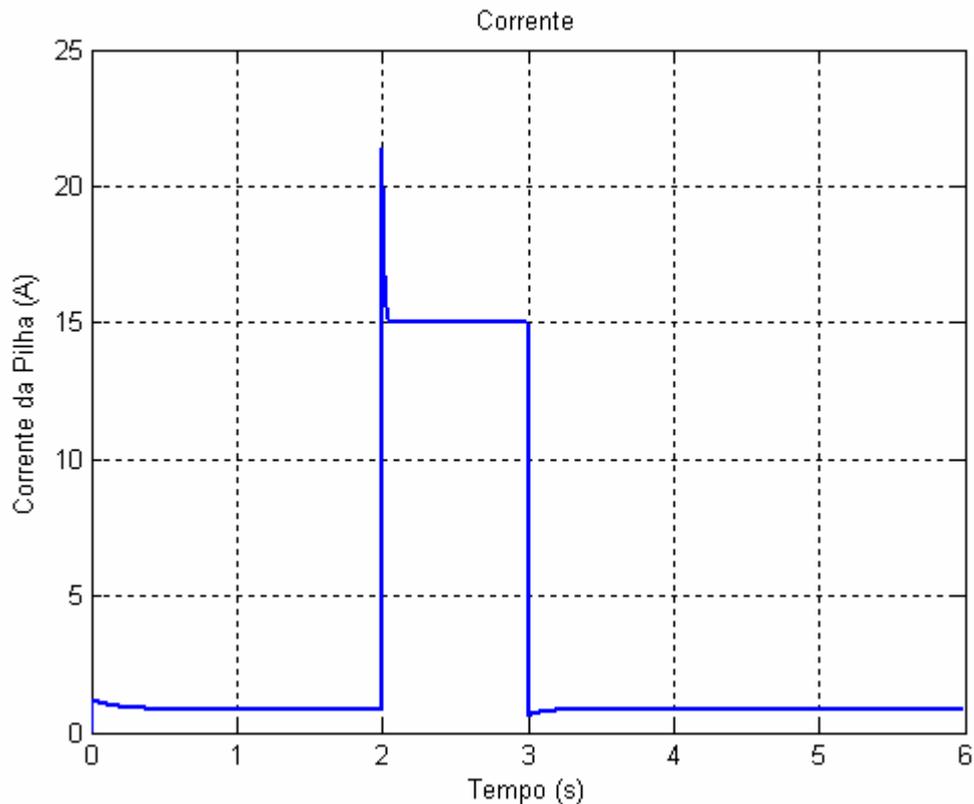


Figura 3.22 – Degrau de corrente para simulação dinâmica

A Figura 3.23 apresenta a resposta de tensão para este teste. Pode-se perceber que há uma acentuada variação inicial de tensão (de 0 a 1 segundo) que, como se disse acima, é resultado das correntes internas da pilha.

No momento em que ocorre a inserção de carga há uma diminuição instantânea de tensão devido ao sobrepotencial ôhmico, seguida de uma resposta rápida de primeira ordem que atinge o ponto de equilíbrio, quando a tensão atinge 26,3 V. O tempo de estabilização é de 0,062 s. Esse tempo é pequeno devido ao baixo valor da resistência equivalente $(R_L + R_{ohm})/R_a$.

Após a carga ser retirada, a tensão apresenta novamente um comportamento de primeira ordem, tendo um tempo de estabilização de 0,62 s. No entanto, a resistência equivalente é muito maior e é representada exclusivamente por R_a . Esse resultado pode ser visto também na Figura 3.24, ou seja, no momento em que ocorre o degraú de carga devido a

toda energia armazenada em C que é rapidamente descarregada (pico de corrente de aproximadamente 11 A) através de $(R_L + R_{ohm})/R_a$. Isso mostra que, neste momento, o coeficiente de tempo associado a esse circuito é muito pequeno e devido exclusivamente à resistência equivalente.

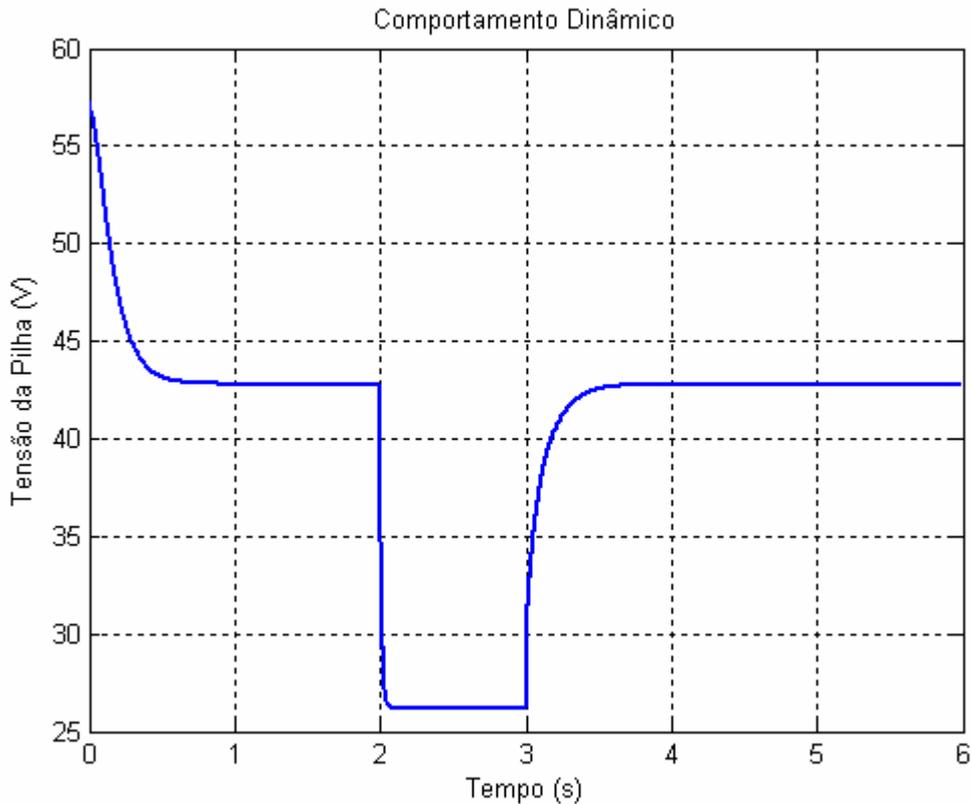


Figura 3.23 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de carga

No instante em que a corrente é baixa, a célula não é mais submetida a um pico de corrente uma vez que a resistência equivalente é representada apenas por R_a o que resulta em um tempo muito maior necessário para descarregar completamente C. Toda esta análise mostra que o coeficiente de tempo de uma célula de combustível é variável quando a célula é submetida a transitórios. Já o seu rendimento, Figura 3.25, é da ordem de 35 % se a célula esta sob carga nominal.

A informação primordial apresentada na Figura 3.26 é o pico de potência de 850 W (97,7 % superior ao valor nominal, que é de 430 W) no momento da inserção de carga.

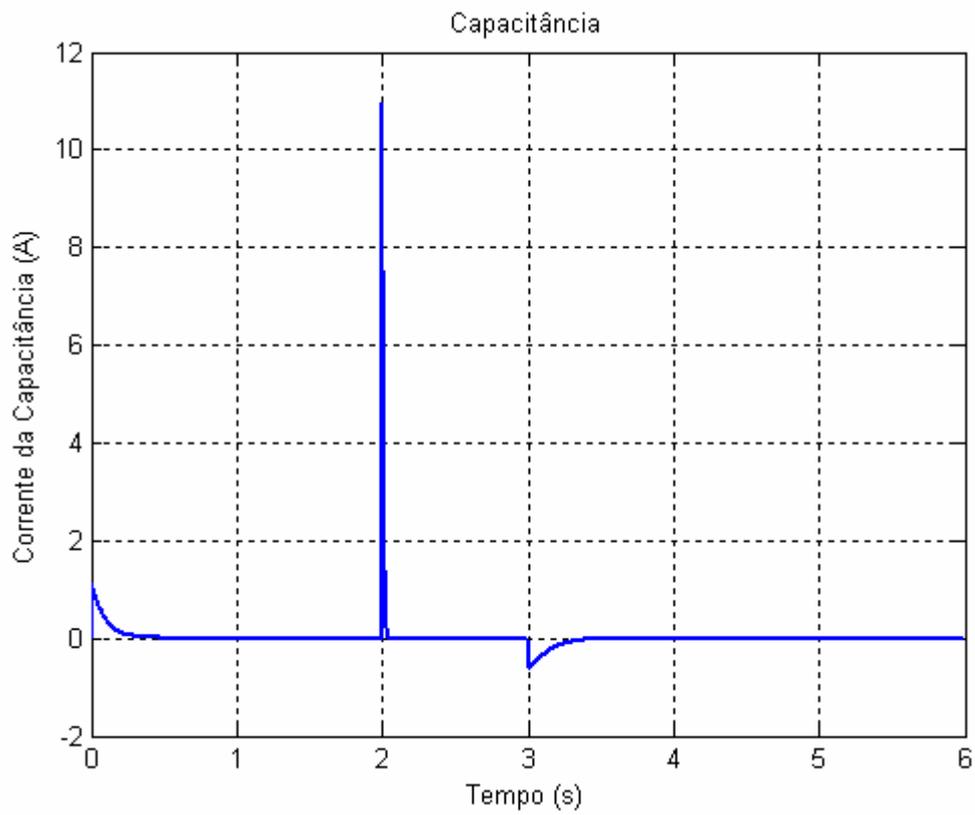


Figura 3.24 – Corrente da capacitância

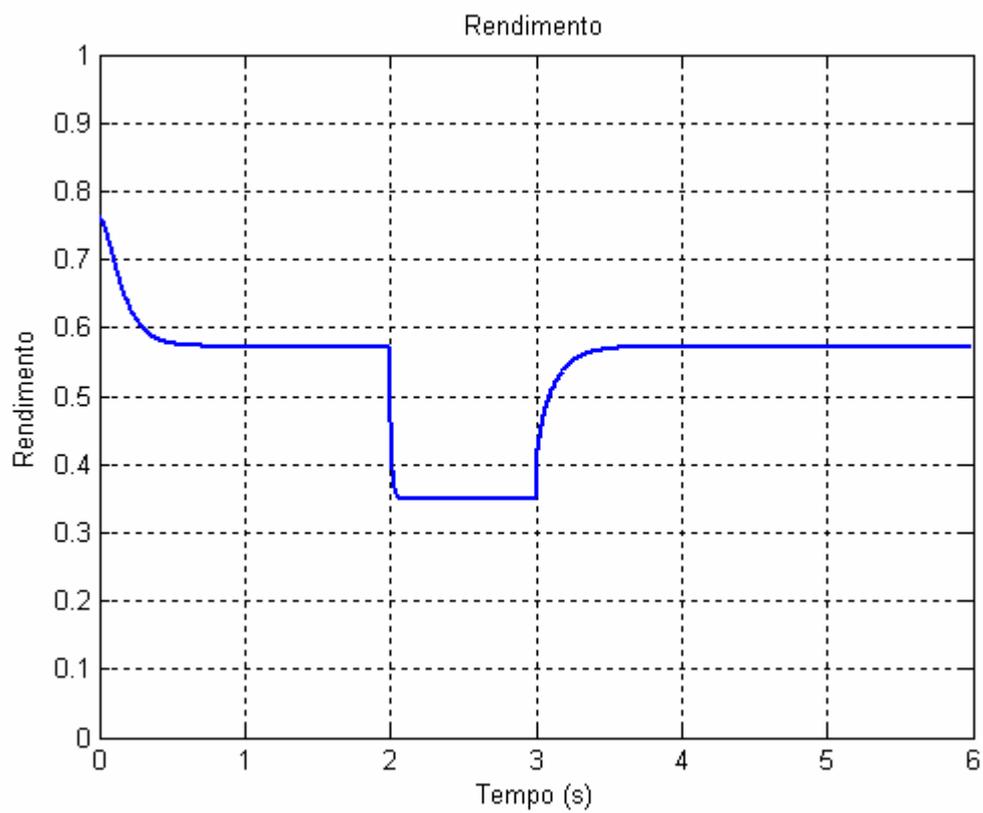


Figura 3.25 – Rendimento da pilha para um degrau de carga

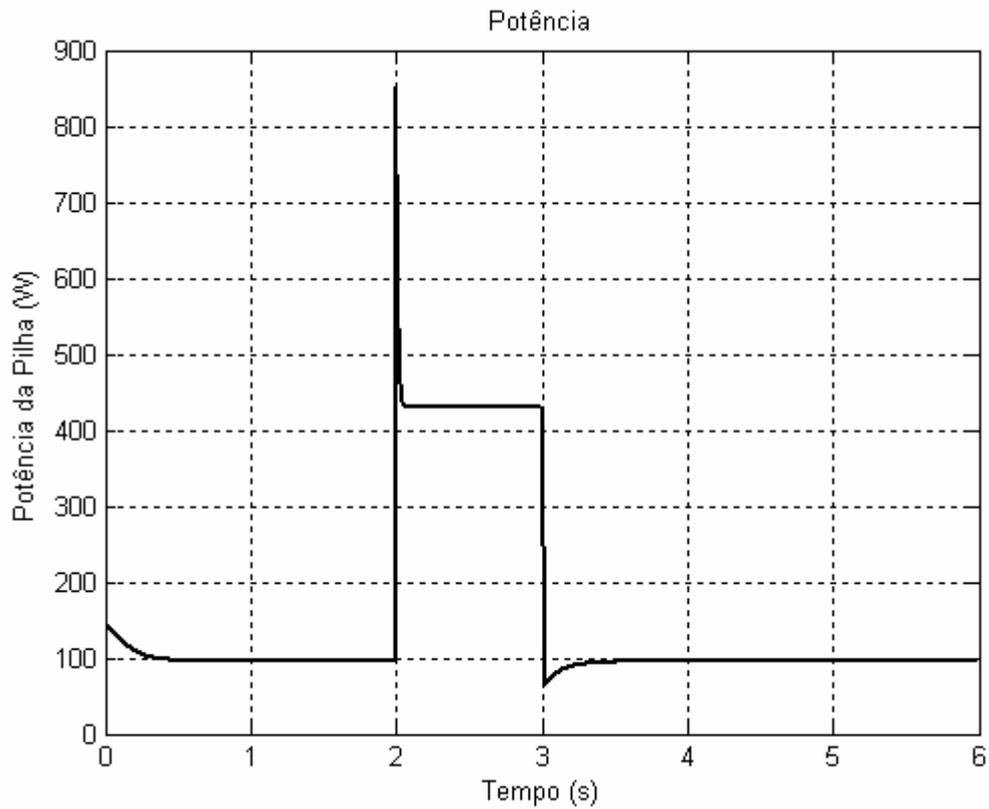


Figura 3.26 – Potência gerada pela pilha para um degrau de carga

Os resultados computacionais da modelagem da célula de combustível SR-12 da empresa Avista são comparados com os resultados experimentais obtidos por [55] mostrados na Figura 3.27 com boa aproximação.

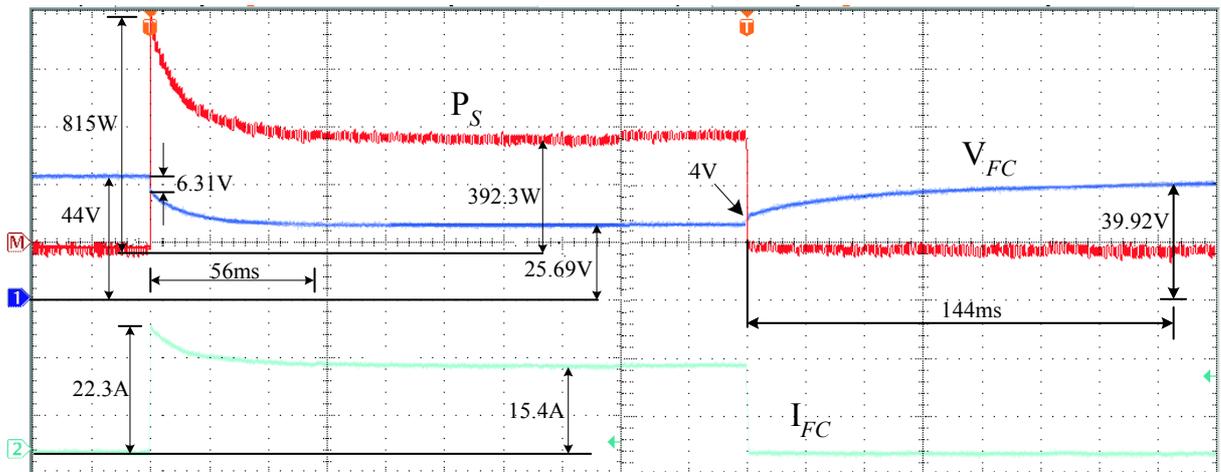


Figura 3.27 – Resultados Experimentais da célula SR-12

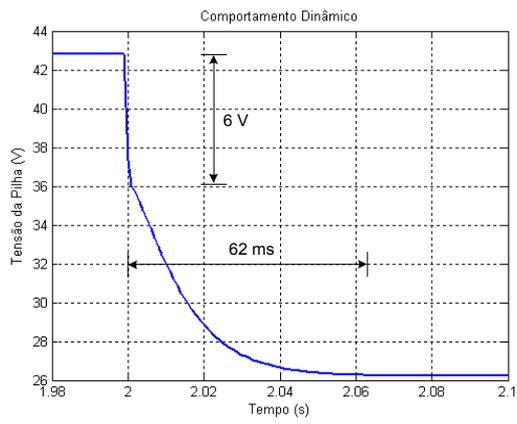
Na Figura 3.27 são mostradas as três principais curvas da célula de combustível: corrente, tensão e potência. A curva na parte inferior do gráfico representa a corrente no instante da injeção de um pico de corrente de 22,3 A, estabilizando com valor de 15,4 A.

A curva na região central é da tensão indica um valor de 44 V para circuito aberto. No instante de inserção de carga, a tensão diminui instantaneamente 6, 31 V, devido a queda de tensão ôhmica, seguido de uma resposta de primeira ordem, em relação as quedas de tensão de ativação e de concentração, chegando a uma tensão estabilizada de 25,69 V num tempo de 56 ms. No instante da retirada da carga, a tensão aumenta 4 V rapidamente (efeito do sobrepotencial ôhmico), seguido de uma resposta de primeira ordem (efeito dos sobrepotenciais de ativação e de concentração) mostrando uma tensão de 39,92 V para um tempo de 144 ms. Nos diferentes instantes de chaveamento de carga, claramente observa-se diferentes tempos de estabilização da tensão, indicando que as células de combustível apresentam um coeficiente de tempo variável.

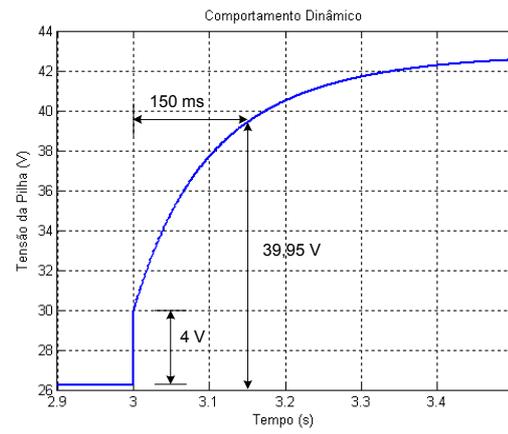
Para comparar com os resultados de simulação essa afirmação, foi realizada uma aproximação nos instantes de chaveamento: injeção e rejeição de carga, Figura 3.28. Na Figura 3.28(a) tem-se a injeção de carga, mostrando uma queda abrupta de tensão de aproximadamente 6 V (devido a queda ôhmica) acompanhado de um comportamento de primeira ordem, com relação as quedas de ativação e de concentração, até estabilizar com uma tensão de 26 V com tempo de 62 ms. Na Figura 3.28(b) tem-se a retirada de carga, mostrando uma elevação instantânea de tensão de aproximadamente 4 V (devido ao sobrepotencial ôhmico) acompanhado de um comportamento de primeira ordem (sobrepotencial de ativação e de concentração) apresentando uma tensão de aproximadamente 39,95 V com tempo de 150 ms.

A curva na região superior da Figura 3.27 é da potência. No instante de injeção de carga, a potência mostra um pico de 815 W e em seguida estabiliza com um valor de 392,3 W.

Pode-se ver que os resultados de simulação comparados com os experimentais apresentaram uma boa aproximação. A pequena diferença deve-se ao fato de que alguns parâmetros não estarem disponíveis nos dados da pilha real, sendo que estes foram estimados a partir de dados similares apresentados na literatura.



(a)



(b)

Figura 3.28 – Zoom dos instantes de chaveamento

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo discutiu-se os comportamentos estático e dinâmico de uma pilha de células de combustível do tipo PEM. Conforme a teoria vigente na literatura, constatou-se que as equações dos elementos que compõem o modelo da célula de combustível ainda são obtidas a partir de informações tanto analíticas quanto empíricas. Assim sendo, os principais processos envolvidos na geração de energia elétrica com células de combustível foram levados em consideração, resultando em um modelo que permite prever a performance das células frente às condições normalmente encontradas em aplicações como unidades geradoras, isoladas ou conectadas à rede pública.

A diferença entre o algoritmo de cálculo modificado sugerido nesta dissertação e o da literatura é que se separou a corrente da pilha de células de combustível, i_{FC} , nas correntes i_a e i_c , conforme a Equação 3.6 enquanto a literatura utilizou a corrente i_{FC} para os sobrepotenciais de ativação e de concentração e também para a capacitância, sem fazer distinção entre as duas.

Os coeficientes do modelo podem ser generalizados para diferentes células e pilhas, conforme os coeficientes apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. No entanto, a dificuldade de obtenção de valores precisos para os diversos coeficientes torna difícil uma modelagem mais exata de todos os processos envolvidos na operação das células. A maioria dos pesquisadores buscam adequar seus modelos às necessidades de cada empresa e centros de pesquisa, seja para melhorar o projeto das células de combustível, seja para otimizar a sua utilização na geração de energia ou em transportes. O modelo obtido nesta dissertação é mais adequado para sistemas de geração de energia elétrica em pequena escala.

Concluiu-se também que o comportamento dinâmico diferenciado do modelo da célula deve-se ao fato de apresentar um coeficiente de tempo variável, devido às variações da resistência equivalente, em que age o fenômeno “dupla camada”. O modelo matemático resultante pode, então, ser utilizado como um bloco em simulações de sistemas de geração de energia elétrica.

O próximo capítulo apresenta a modelagem e a análise de um conversor CC-CC Boost para que, juntamente com o modelo elétrico da célula de combustível em cascata com um inversor trifásico, possa representar a injeção de potência na rede. Para tal, leva-se em conta o projeto da estabilidade da carga nos terminais da pilha e dos componentes passivos do conversor.

O CONVERSOR BOOST E O INVERSOR TRIFÁSICO PARA CONEXÃO A REDE

O objetivo principal deste capítulo é a introdução dos conversores eletrônicos usados nesta dissertação para controlar o fluxo de energia entre a FC e a rede da concessionária, adequação dos níveis de tensão e injeção ou absorção de energia da rede com um fator de potência unitário.

Diversas opções foram consideradas. Entre elas considerou-se a utilização de conversores boost isolados e/ou não-isolados, como, por exemplo: Push-Pull, Half-Bridge (HB), Full-Bridge (FB) e multiníveis. Os conversores isolados utilizam um transformador para proteção e segurança. Os conversores Push-Pull, Half-Bridge e Full-Bridge apresentam como característica um capacitor conectado em paralelo com a tensão de entrada. Os conversores multiníveis utilizam várias chaves para aplicações de alta potência, apresentando baixa distorção harmônica, baixa EMI, e sofrem pouco stress de tensão nos dispositivos. Podem também reduzir o tamanho de componentes magnéticos, reduzindo assim o custo [50].

Todas as opções apresentadas acima apresentam limitações também. Como os conversores Push-Pull, Half-Bridge e Full-Bridge utilizam um capacitor na entrada, eles provocariam transitoriamente um curto-circuito nos terminais da pilha de células de combustível, não representando um funcionamento correto [26]. Sobre os conversores Push-Pull pode-se dizer que, devido a uma pequena e inevitável diferença nos tempos de chaveamento das chaves, existe sempre um desequilíbrio entre os valores de pico das correntes de chave que pode ser eliminado pelo controle por modo corrente [26]. Para os conversores Half-Bridge (HB) e Full-Bridge (FB), ambos os conversores apresentam a tensão de entrada sobre as chaves. Entretanto, o HB precisa carregar duas vezes mais corrente comparado com o FB. Além disso, nas faixas de grandes potências, é vantajoso o uso de um FB ao invés de um HB para reduzir o número de dispositivos em paralelo na chave [26]. Os

conversores multiníveis apresentam mais problemas de balanço em conversores CC-CC do que CC-CA ou CA-CC. Por causa da saída de tensão assimétrica, poucos estados de chaveamento redundantes ocorrerão em conversores multiníveis. Também a diferença de características de cada componente passivo causará tensão desbalanceada. Em muitos casos, uma estratégia de controle de balanço é necessária para equilibrar a tensão nos capacitores, que requerem o suficiente de redundância de estado de chaveamento, ocorrendo que alguns deles não podem ser utilizados em aplicações CC-CC [50]. Além disso, os conversores isolados precisam de um transformador necessariamente grande e caro para o projeto. Outras características que devem ser consideradas no projeto de conversores são:

- a) frequência de operação de alguns conversores; nesta dissertação trabalhou-se em 12 kHz;
- b) elevação da tensão para a operação desejada na rede trifásica.

Para o estudo dos diversos conversores - multiníveis, Half-Bridge, Full-Bridge, Push-Pull, PWM, isolados ou não-isolados, entre outros – deve-se considerar um sistema de baixo custo, qualidade de energia, alta eficiência, maior confiabilidade, controle simples e segurança. Para aplicações de células de combustível, o comportamento de iniciação da pilha (*start up*) é bastante importante para o projeto dos conversores. Essa característica foi mostrada no capítulo 3.

Uma possível solução é utilizar um sistema de dupla conversão para o acoplamento com a rede. O primeiro estágio é composto por um conversor CC-CC que tem a tarefa de absorver uma corrente da FC com baixo “ripple” e controlar o conversor CC-CC no modo corrente.

Para o conversor CC-CA devem ser observadas características tais como: reduzida distorção harmônica na corrente que circula pela rede e fator de potência próximo da unidade. Devido ao fato de se controlar o conversor CC-CC no modo corrente cabe ao inversor ainda, estabilizar a tensão do barramento CC.

Com relação à injeção na rede, toda a energia produzida pode ser consumida localmente ou enviada à rede conforme o balanço de energia. Se a carga local demandar potência superior àquela gerada pela FC, a rede vai ter que fornecer o déficit.

A Figura 4.1 mostra um diagrama simplificado da estrutura de controle proposta para o conversor Boost e a célula de combustível representada pelo seu modelo elétrico, conforme [16].

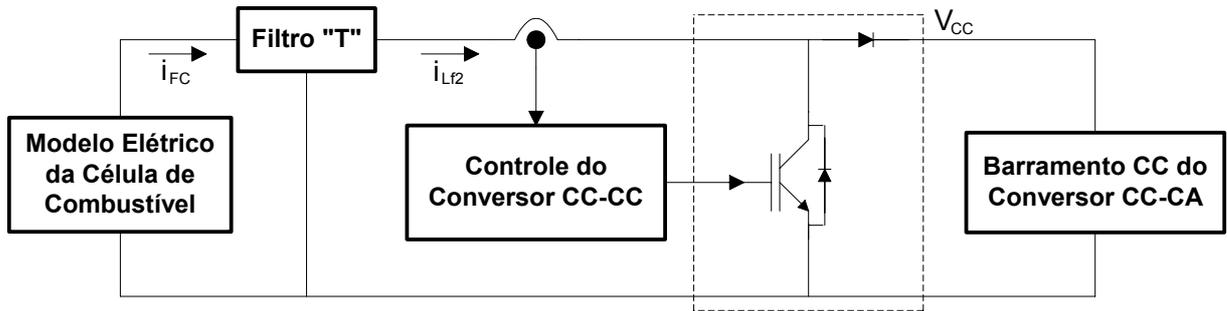


Figura 4.1 – Conversor Boost com controle da corrente de saída do filtro “T”

4.1 Modelagem Dinâmica do Conversor Boost com Controle da Corrente de Saída do Filtro “T”

O conversor Boost é comutado em média frequência, sendo que a modelagem através dos valores médios das variáveis de estado é um método que vem sendo utilizado na literatura [26]. Considerando que o conversor opera no modo de condução contínua, há duas situações topológicas possíveis: quando o transistor conduz (durante o intervalo de tempo normalizado igual à largura de pulso) e quando o diodo conduz (no intervalo complementar). As análises tradicionalmente disponíveis na literatura tratam de conversores em que a entrada é fixa e se deseja controlar a tensão de saída por meio do ajuste da largura de pulso do transistor. Para sistemas cuja fonte primária é uma FC é preciso estabilizar a corrente que é drenada da FC ou a tensão em seus terminais de modo que a FC opere em um ponto no qual haja alto rendimento e se possa drenar uma potência compatível com o custo da pilha ou de sua operação. Assim sendo, este sistema possui quatro variáveis de estado: as correntes i_{FC} e i_{Lf2} e as tensões V_{Cf} e V_d . O objetivo torna-se, então encontrar a função de transferência de pequenos sinais entre a corrente I_{Lf2} e o ciclo de trabalho (δ) em torno dos pontos de operação médios.

A referência [26] refere-se a uma técnica desenvolvida para obter um modelo de variáveis médias em espaço de estado. Esta técnica apresenta como resultado um modelo linear para o estágio de potência que inclui o filtro de saída, sendo este válido para pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Desta forma, cada bloco pode ser representado por uma função de transferência. Os pequenos sinais causadores, ou resultantes, da perturbação são indicados por letras nos formatos \tilde{v} , \tilde{d} e \tilde{i} .

4.1.1 Linearização usando valores médios das variáveis de estado para obter $\tilde{i}_{L_{f2}}(s)/\tilde{d}(s)$

O objetivo da linearização usando os valores médios das variáveis de estado para obter $\tilde{i}_{L_{f2}}(s)/\tilde{d}(s)$ é obter uma função de transferência para pequenos sinais entre a corrente $i_{L_{f2}}$ e o ciclo de trabalho (δ), em torno de seus pontos de operação. A variável em tipo maiúsculo (V_{CC} , por exemplo), refere-se ao valor médio da variável.

A análise que se segue refere-se à operação no modo de condução contínua. Para este modo de operação existem apenas duas configurações topológicas para o circuito, uma quando a chave controlada está conduzindo e outra quando está bloqueada. Durante cada subintervalo, o circuito (linear) é descrito através de seu valor de estado \mathbf{x} , o qual é composto pela corrente através da indutância L_{f2} , pela tensão sobre o capacitor C_f , pela corrente drenada da célula i_{FC} e pela tensão da capacitância da FC, V_d . A variável V_{CC} representa a tensão do barramento CC e as variáveis A_1 e A_2 são matrizes de estado, B_1 e B_2 são conhecidas como matrizes de entrada e \mathbf{u} é o sinal de entrada do controle.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{u} \quad \text{durante } \delta \quad (4.1)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{u} \quad \text{durante } (1-\delta) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{FC} \\ \dot{i}_{L_{f2}} \\ V_{Cf} \\ V_d \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} E_o \\ V_{CC} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A variável a ser controlada pode ser escrita em termos apenas de suas variáveis de estado:

$$\dot{i}_{L\Omega} = \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{x} \quad \text{durante } \delta \quad (4.5)$$

$$\dot{i}_{L\Omega} = \mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{x} \quad \text{durante } (1-\delta) \quad (4.6)$$

Para produzir uma descrição média do circuito em um período de chaveamento, as equações correspondentes às duas variações topológicas são ponderadas em relação à razão cíclica e o resultado é:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{A}_1 \cdot \delta + \mathbf{A}_2 \cdot (1-\delta)] \cdot \mathbf{x} + [\mathbf{B}_1 \cdot \delta + \mathbf{B}_2 \cdot (1-\delta)] \cdot \mathbf{u} \quad (4.7)$$

O mesmo pode ser feito em relação a variável de saída usando as equações 4.5 e 4.6.

$$\dot{i}_{L\Omega} = [\mathbf{C}_1 \cdot \delta + \mathbf{C}_2 \cdot (1-\delta)] \cdot \mathbf{x} \quad (4.8)$$

As variáveis serão decompostas em:

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \tilde{\mathbf{x}} \quad (4.9)$$

$$\dot{i}_{L\Omega} = I_{L\Omega} + \dot{i}_{L\Omega}^{\sim} \quad (4.10)$$

$$\delta = D + \tilde{d} \quad (4.11)$$

Utilizando as equações precedentes e observando que $\dot{\mathbf{x}} = \dot{\tilde{\mathbf{x}}}$ obtém-se:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{x}} + [(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2) \cdot \mathbf{X} + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{u}] \cdot \tilde{d} \quad (4.12)$$

Na equação (4.12) tem-se os termos \mathbf{A} e \mathbf{B} , que correspondem à:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \cdot D + \mathbf{A}_2 \cdot (1-D) \quad (4.13)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 \cdot D + \mathbf{B}_2 \cdot (1-D) \quad (4.14)$$

Há ainda termos contendo os produtos entre \tilde{x} e \tilde{d} , os quais são desprezados, pois correspondem ao produto de duas variações que, por definição, são pequenas. O comportamento em regime permanente pode ser obtido da equação (4.12), fazendo-se nulos os termos variáveis no tempo e as perturbações, resultando em:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.15)$$

o que resulta nos estados em regime permanente $\mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}$.

A componente alternada obtém-se a partir da equação 4.12 zerando os termos CC.

$$\dot{\tilde{x}} = \mathbf{A} \cdot \tilde{x} + [(\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2) \cdot \mathbf{X} + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{u}] \cdot \tilde{d} \quad (4.16)$$

Analogamente,

$$\dot{i}_{L12} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{C} \cdot \tilde{x} + [(\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{X}] \cdot \tilde{d} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_1 \cdot D + \mathbf{C}_2 \cdot (1-D) \quad (4.18)$$

$$I_{L12} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \quad (4.19)$$

$$i_{L12}^{\sim} = \mathbf{C} \cdot \tilde{x} + [(\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{X}] \cdot \tilde{d} \quad (4.20)$$

A relação saída/entrada em regime permanente é obtida pela substituição da equação 4.15 na equação 4.19.

$$I_{L2} = [-C \cdot A^{-1} \cdot B] \cdot u \quad (4.21)$$

Aplicando a transformada de Laplace às equações 4.16 e 4.20 têm-se:

$$\tilde{x}(s) = [s \cdot I - A]^{-1} \cdot [(A_1 - A_2) \cdot X + (B_1 - B_2) \cdot u] \cdot \tilde{d}(s) \quad (4.22)$$

$$\tilde{i}_{L2}(s) = C \cdot \tilde{x}(s) + [(C_1 - C_2) \cdot X] \cdot \tilde{d}(s) \quad (4.23)$$

sendo I uma matriz identidade.

A função de transferência \tilde{i}_{L2}/\tilde{d} obtida é expressa por:

$$\frac{\tilde{i}_{L2}(s)}{\tilde{d}(s)} = C \cdot [s \cdot I - A]^{-1} \cdot [(A_1 - A_2) \cdot X + (B_1 - B_2) \cdot u] + (C_1 - C_2) \cdot X \quad (4.24)$$

Toda esta descrição tem como objetivo fundamental obter uma função de transferência entrada/saída que incorpore os parâmetros do “Boost” e da célula de combustível. Tal análise faz-se necessária para verificar se a planta associando a pilha de célula de combustível ao inversor de potência é estável ou se é possível simplificá-la, o que facilita o projeto dos controladores. A Figura 4.2 mostra o circuito elétrico da célula de combustível com o circuito do conversor CC-CC Boost, incluindo as resistências inerentes aos elementos passivos do filtro “T”. Em particular, a seção filtro T introduzida entre o modelo da pilha e o conversor “Boost” é muito conveniente, pois além de filtrar a ondulação do conversor indo para a pilha, ele amortece os surtos de corrente advindos de variações e surtos de corrente da carga e ainda serve como a indutância Boost de corrente.

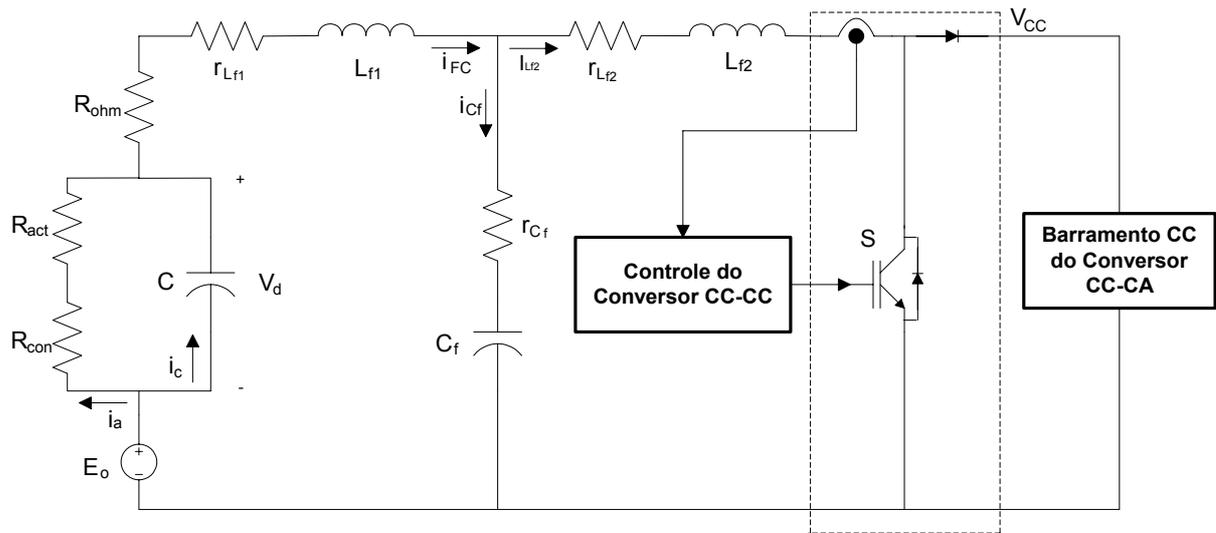


Figura 4.2 - Esquema elétrico completo do conversor

Na forma matricial, as equações anteriores, que são válidas durante o intervalo normalizado δ , podem ser escritas como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}'}{\mathbf{L}_{f1}}\right) & \frac{\mathbf{r}_{Cf}}{\mathbf{L}_{f1}} & -\frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} & -\frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} \\ \frac{\mathbf{r}_{Cf}}{\mathbf{L}_{f2}} & -\left(\frac{\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{r}_{L_{f2}}}{\mathbf{L}_{f2}}\right) & \frac{1}{\mathbf{L}_{f2}} & 0 \\ \frac{1}{\mathbf{C}_f} & -\frac{1}{\mathbf{C}_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\mathbf{C}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{i}_{L_{f2}} = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{x} \quad (4.26)$$

As equações matriciais de estado para o circuito na situação em que o transistor está desligado são:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}'}{\mathbf{L}_{f1}}\right) & \frac{\mathbf{r}_{Cf}}{\mathbf{L}_{f1}} & -\frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} & -\frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} \\ \frac{\mathbf{r}_{Cf}}{\mathbf{L}_{f2}} & -\left(\frac{\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{r}_{Lf2}}{\mathbf{L}_{f2}}\right) & \frac{1}{\mathbf{L}_{f2}} & 0 \\ \frac{1}{\mathbf{C}_f} & -\frac{1}{\mathbf{C}_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\mathbf{C}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\mathbf{L}_{f2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} \quad (4.27)$$

$$\mathbf{i}_{Lf2} = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{x} \quad (4.28)$$

no qual $\mathbf{R}' = \mathbf{R}_{ohm} + \mathbf{r}_{Lf1}$.

Assim, a matriz e o vetor médios são:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \quad (4.29)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{L}_{f1}} & 0 \\ 0 & -\frac{(-1 + \mathbf{D})}{\mathbf{L}_{f2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (4.31)$$

A função de transferência $\tilde{i}_{Lf2}(s)/\tilde{d}(s)$ é:

$$\frac{\tilde{i}_{Lf2}(s)}{\tilde{d}(s)} = V_o \cdot \frac{\mathbf{N}_3 \cdot s^3 + \mathbf{N}_2 \cdot s^2 + \mathbf{N}_1 \cdot s + 1}{[\mathbf{D}_4 \cdot s^4 + \mathbf{D}_3 \cdot s^3 + \mathbf{D}_2 \cdot s^2 + \mathbf{D}_1 \cdot s + \mathbf{D}_0]} \quad (4.32)$$

na qual:

$$\mathbf{N}_3 = \mathbf{C}_f \cdot \mathbf{L}_{f1} \cdot \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C};$$

$$\mathbf{N}_2 = \mathbf{C}_f \cdot (\mathbf{L}_{f1} + (\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}') \cdot \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C});$$

$$\mathbf{N}_1 = \mathbf{C}_f \cdot (\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}' + \mathbf{R}_a) + \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C};$$

$$\mathbf{D}_4 = \mathbf{L}_{f1} \cdot \mathbf{C}_f \cdot \mathbf{L}_{f2} \cdot \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C};$$

$$\mathbf{D}_3 = \mathbf{C}_f \cdot (\mathbf{L}_{f1} \cdot \mathbf{L}_{f2} + \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C} \cdot (\mathbf{L}_{f2} \cdot (\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}') + \mathbf{L}_{f1} \cdot (\mathbf{r}_{Lf2} + \mathbf{r}_{Cf})));$$

$$\mathbf{D}_2 = \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C} \cdot (\mathbf{L}_{f1} + \mathbf{L}_{f2} + \mathbf{C}_f \cdot (\mathbf{r}_{Cf} \cdot (\mathbf{r}_{Lf2} + \mathbf{R}') + \mathbf{R}' \cdot \mathbf{r}_{Lf2})) + \mathbf{C}_f \cdot (\mathbf{L}_{f2} \cdot (\mathbf{R}_a + \mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{R}') + \mathbf{L}_{f1} \cdot (\mathbf{r}_{Lf2} + \mathbf{r}_{Cf}));$$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{L}_{f1} + \mathbf{L}_{f2} + \mathbf{C}_f \cdot ((\mathbf{R}_a + \mathbf{R}') \cdot (\mathbf{r}_{Cf} + \mathbf{r}_{Lf2}) + \mathbf{r}_{Cf} \cdot \mathbf{r}_{Lf2}) + \mathbf{R}_a \cdot \mathbf{C} \cdot (\mathbf{R}' + \mathbf{r}_{Lf2});$$

$$\mathbf{D}_0 = \mathbf{R}' + \mathbf{R}_a + \mathbf{r}_{Lf2}$$

4.2 Projeto dos Elementos Passivos do Conversor Boost

O esquema básico de um conversor elevador de tensão (Boost) é mostrado na Figura 4.3 e sua principal aplicação é absorver uma corrente com baixo “ripple” da FC. Na análise em regime permanente apresentada, o capacitor do barramento CC deve possuir elevada capacitância para garantir uma tensão CC constante $v_{CC}(t) = V_{CC}$. Na entrada do conversor Boost é utilizado um filtro “T” pois, como se disse anteriormente, a corrente i_{FC} , obtida da pilha de células de combustível, precisa ser filtrada para ter pequena ondulação. A utilização de apenas um filtro LC não pode ser realizada, pois conectar apenas um capacitor diretamente na pilha de células de combustível estaria transitoriamente curto-circuitando a mesma nos momentos de chaveamento (conexão inicial ou alteração de carga). Por esta razão, dimensiona-se um indutor a ser usado logo na saída da FC para que se tenha uma solução simples de controle do conversor CC-CC no modo corrente.

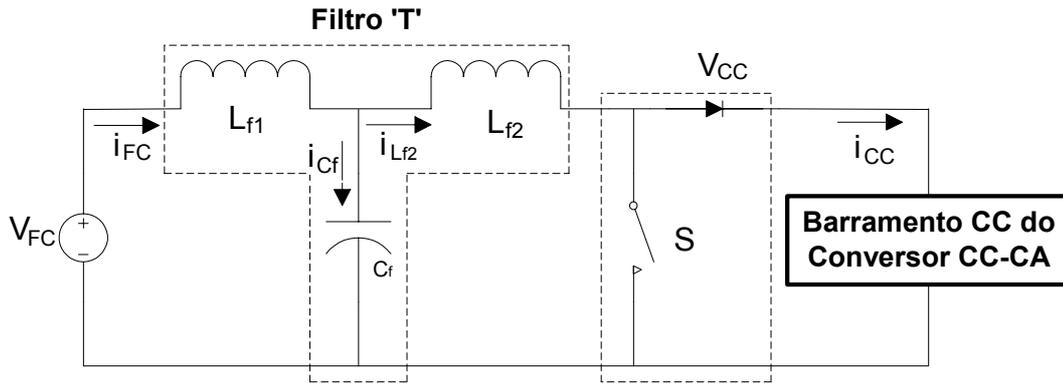


Figura 4.3 – Conversor CC-CC

As características para o projeto do conversor são as seguintes:

- Potência de saída: $P_o = 2 \text{ kW}$;
- Frequência de chaveamento: $f_s = 12 \text{ kHz}$;
- Tensão da pilha de células de combustível: $V_{FC} = 20 \text{ a } 40 \text{ V}$;
- Tensão do barramento CC: $V_{CC} = 300 \text{ V}$.

Para o projeto do conversor CC Boost é necessário conhecer a corrente máxima do barramento CC pela seguinte equação:

$$i_{CC} = \frac{P_o}{V_{CC}} \rightarrow i_{CC} = \frac{2000}{300} \rightarrow i_{CC} = 6,67 \text{ A} \quad (4.33)$$

Para o cálculo do indutor necessita-se saber a razão cíclica do conversor. Para isto usou-se a seguinte equação:

$$D = 1 - \frac{V_{FC}}{V_{CC}} \rightarrow 0,86 < D \leq 0,93 \quad (4.34)$$

Considerou-se o valor da razão cíclica de 0,9 ($D = 0,9$) para os devidos cálculos.

Utilizando a função de transferência simplificada do conversor CC-CC obteve-se a equação 4.35. Essa simplificação deve ser feita, pois as equações obtidas facilitam o projeto dos componentes passivos.

$$L_{f2} = \frac{V_s}{\delta \cdot f_s} - \frac{V_s^2}{\delta \cdot V_{CC} \cdot f_s} \quad (4.35)$$

sendo que $\delta = 15 \cdot 0,2$ (20% da corrente média sobre a indutância).

A indutância L_{f2} calculada é de $\cong 1$ mH. A capacitância do barramento CC é projetada levando em consideração uma ondulação de tensão no capacitor C_{CC} de 20% para o qual:

$$C_{CC} = \frac{i_{CC} \cdot D \cdot T_s}{\Delta V_{CC}} \rightarrow C_{CC} = \frac{6,67 \cdot 8,33 \times 10^{-5} \cdot 0,9}{0,2} \rightarrow C_{CC} = 2,5 \text{ mF} \quad (4.36)$$

A capacitância calculada é de 2,5 mF. Para os elementos do filtro “T” é preciso projetá-los utilizando a frequência de corte do conversor, que é escolhida uma década abaixo da frequência de amostragem.

$$f_c = 500 \text{ Hz} \quad (4.37)$$

Pela equação da frequência de corte são obtidos os valores dos elementos do filtro T. Rearranjando a Equação 4.38, pode-se calcular o valor da capacitância C_f .

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{f2} \cdot C_f}} \quad (4.38)$$

$$C_f = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c}\right)^2}{L_{f2}} \rightarrow C_f = 100 \mu\text{F} \quad (4.39)$$

Para fins do cálculo da indutância L_{f1} é considerada uma ondulação de 2 % e utilizada na seguinte equação (referência [56]):

$$r = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{1}{(16 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2 \cdot L_{f1} \cdot C_f)^2} \rightarrow L_{f1} = \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{16 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2 \cdot \sqrt{r} \cdot C_f} \quad (4.40)$$

A indutância L_{f1} calculada é de 400 μH .

4.3 Projeto dos Elementos Passivos do Inversor Trifásico

O inversor trifásico, que se encontra entre o conversor CC-CC e a carga, consiste de três braços de IGBT numa ponte completa com capacitor do barramento CC seguida dos filtros de saída, conectados em Y, como mostrado na Figura 4.4.

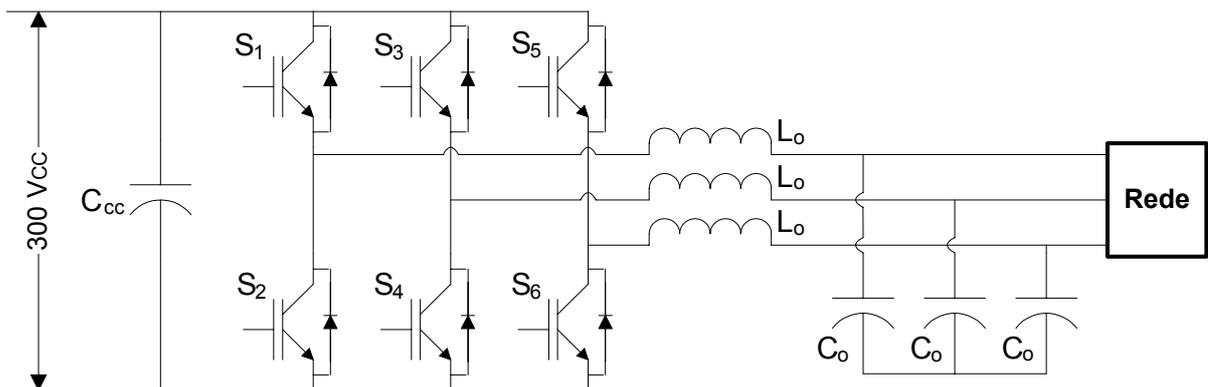


Figura 4.4 - Diagrama do circuito do inversor

Para o projeto do inversor trifásico é necessário determinar-se as faixas dos componentes de potência. A lista detalhada dos requerimentos do inversor é:

- Potência de saída: $P_o = 2 \text{ kW}$;
- Tensão de saída: $V_o = 120 \text{ V}$;
- Frequência de saída: $f_o = 60 \text{ Hz}$;
- THD da tensão de saída: $\text{THD} = 5\%$;
- Regulação de tensão de saída: $Q = \pm 6\%$.

O projeto dos elementos passivos do inversor é considerado 2 kW para um fator de utilização de 0,7, então a saída VA torna-se:

$$VA_o = \frac{2000}{0,7} = 2857,14VA \quad (4.41)$$

A corrente de carga total de cada fase é dada por,

$$i_{o,rms} = \frac{2857,14}{3 \cdot 120} = 7,94A \quad (4.42)$$

Como forma de simplificação, a corrente de saída i_o consiste somente da fundamental ($i_{o,1}$) e da terceira harmônica ($i_{o,3}$). Assim, assumindo $i_{o,3} = 0,7 i_{o,1}$ desde que este seja um caso típico de retificador monofásico não-linear [52],

$$i_{o,rms} \cong \sqrt{i_{o,1}^2 + i_{o,3}^2} = 1,22 \cdot i_{o,1} \quad (4.43)$$

Entretanto, o valor rms da fundamental da corrente de saída de cada fase é,

$$i_{o,1} = \frac{7,94}{1,22} = 6,51A \quad (4.44)$$

O projeto do filtro de saída, assumindo a frequência de chaveamento f_s ser de 12 kHz, a relação de frequência é,

$$n_f = \frac{f_s}{f_1} = 200 \quad (4.45)$$

Um circuito equivalente para o filtro de saída é mostrado na Figura 4.5. A função de transferência H_n para o circuito equivalente pode ser obtida por,

$$H_n = \frac{V_{o,n}}{V_{in}} = \frac{-jX_{Co} \cdot Z_{L,n_f}}{n_f \cdot X_{Lo} \cdot X_{Co} + jZ_{L,n} \cdot (n_f^2 \cdot X_{Lo} - X_{Co})} \quad (4.46)$$

no qual,

$V_{o,n}$: tensão de saída harmônica;

V_{in} : tensão de entrada harmônica;

X_{Co} : impedância do capacitor;

X_{Lo} : impedância do indutor;

$Z_{L,n}$: impedância de carga;

n_f : harmônica devido ao chaveamento.

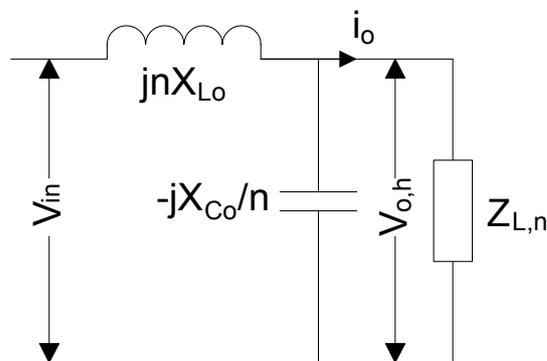


Figura 4.5 – Circuito equivalente para um filtro de saída LC

O ganho da função de transferência na frequência fundamental, $|H_1|$, aproxima-se do valor unitário se

$$X_{Lo} \ll X_{Co} \quad (4.47)$$

Como a impedância de carga $Z_{L,n}$ tende ao infinito, que é, na condição sem carga, o ganho da harmônica de frequência, $|H_n|$, tende à

$$|H_n| = -\frac{X_{Co}}{n^2 \cdot X_{Lo} - X_{Co}} = \frac{1}{n^2 \cdot \frac{X_{Lo}}{X_{Co}} - 1} \quad (4.48)$$

Entretanto, para se obter uma THD menor que 5%, a componente da frequência de chaveamento é considerada como em [52],

$$\frac{1}{n^2 \cdot \frac{X_{Lo}}{X_{Co}} - 1} \leq 0,045 \quad (4.49)$$

Para limitar a ondulação de tensão sobre o capacitor de filtro gerada pela corrente de carga da terceira harmônica, um circuito equivalente é considerado como mostrado na Figura 4.6. O fluxo de corrente através do capacitor de filtro é,

$$i_{Co} = \frac{j \cdot h \cdot X_{Lo}}{-\frac{j \cdot X_{Co}}{h} + j \cdot h \cdot X_{Lo}} \cdot i_{o,h} \quad (4.50)$$

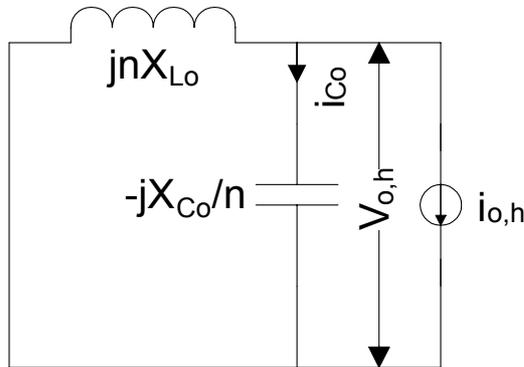


Figura 4.6 – Circuito equivalente para carga não-linear

Então, a tensão através do capacitor de filtro na frequência harmônica torna-se,

$$V_{o,h} = \frac{j \cdot h \cdot X_{Lo}}{1 - h^2 \cdot \frac{X_{Lo}}{X_{Co}}} \cdot i_{o,h} \quad (4.51)$$

no qual,

$V_{o,h}$: tensão equivalente;

i_h : correntes harmônicas;

X_{Co} : impedância do capacitor;

X_{Lo} : impedância do indutor;

h : harmônica devido à carga não-linear.

Isto pode chegar a aproximar,

$$|V_{o,h}| \leq h \cdot X_{Lo} \cdot i_{o,h} \quad (4.52)$$

$$\text{se } h^2 \cdot \frac{X_{Lo}}{X_{Co}} \ll 1 \quad (4.53)$$

Para a terceira harmônica $h = 3$,

$$\frac{|V_{o,3}|}{|V_{o,1}|} \leq \frac{3 \cdot X_{Lo} \cdot i_{o,3}}{|V_{o,1}|} \quad (4.54)$$

A ondulação de tensão do capacitor referente à terceira harmônica é limitada em 3 % da fundamental. Assim, a impedância do indutor do filtro resulta em:

$$X_{L_o} \geq \frac{0,03 \cdot |V_{o,1}|}{3 \cdot i_{o,3}} = \frac{0,03 \cdot 120}{3 \cdot 4,56} = 0,263 \Omega \quad (4.55)$$

Já sua indutância, por fase, é:

$$L_o = \frac{X_{L_o}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,263}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 697 \mu H \quad (4.56)$$

Das equações (4.49) e (4.55) a impedância do capacitor pode ser obtida utilizando-se o valor da reatância capacitiva:

$$X_{C_o} = 453,02 \Omega \quad (4.57)$$

Obtendo o valor da capacitância, por fase, de:

$$C_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{C_o}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 453,02} = 5,86 \mu F \quad (4.58)$$

4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a modelagem e dimensionamento dos circuitos e dispositivos eletrônicos para controlar o fluxo de energia entre uma FC e a rede da concessionária, adequação dos níveis de tensão e injeção ou absorção de energia da rede com fator de potência unitário. Para tal, a solução encontrada foi utilizar um sistema de dupla conversão para acoplamento com a rede. O primeiro estágio é composto por um conversor CC-CC que tem como tarefa absorver da FC uma corrente com baixo “ripple”. Para isso, a solução de controle do conversor CC-CC foi por modo corrente. Na entrada do conversor Boost é utilizado um filtro “T”, pois a corrente i_{FC} , obtida da pilha de células de combustível, precisa estar filtrada para ter uma baixa ondulação. A utilização de apenas um filtro LC não pode ser realizada, por conectar apenas um capacitor diretamente na pilha de células de combustível o que estaria curto-circuitando a mesma durante chaveamentos de cargas.

Para o conversor Boost comutado em média frequência, a modelagem foi feita pelos valores médios das variáveis de estado do conversor propriamente dito e da célula de combustível. Foi realizado um estudo para encontrar a função de transferência de pequenos sinais entre a corrente i_{Lr2} e o ciclo de trabalho (δ) em torno dos pontos de operação médios. A técnica foi desenvolvida para obter um modelo com variáveis médias em espaço de estado. A técnica apresenta como resultado um modelo linear para o estágio de potência que inclui o filtro de saída, sendo este válido para pequenas perturbações em torno do ponto de operação.

Para o conversor CC-CA devem ser observadas algumas características como: reduzida distorção harmônica na corrente que circula pela rede e fator de potência próximo da unidade. Como o controle do conversor CC-CC é no modo corrente, o inversor também estabiliza a tensão do barramento CC. O inversor trifásico consiste de três braços em ponte completa com IGBT e capacitor do barramento CC seguido dos filtros LC de saída, conectados em Y. O sistema todo é projetado para que toda a energia produzida possa ser consumida localmente ou enviada à rede, conforme o balanço de energia. Se a carga local demandar potência superior àquela gerada pela FC a rede é quem fornece o déficit.

CONTROLADORES DIGITAIS PARA INJEÇÃO DE ENERGIA NA REDE

O objetivo principal deste capítulo é controlar o fluxo da energia produzida pela célula de combustível (FC – *Fuel Cell*) e que a energia assim processada possa ter alta qualidade. Uma possível solução para isto é utilizar um sistema de dupla conversão para o acoplamento com a rede. O primeiro estágio será composto por um conversor CC-CC que faz a célula operar num ponto ótimo mais elevado de tensão compatível com um inversor CC-CA a ser colocado nos terminais do segundo estágio, com isto reduzindo perdas nas chaves e melhorando seu rendimento. No segundo estágio é utilizado um conversor CC-CA que tem por objetivo injetar ou absorver corrente e surtos de corrente da rede com reduzida distorção harmônica, fator de potência próximo da unidade e, ainda, estabilizar a tensão do barramento CC.

Conforme o estudo das metodologias de projeto dos inversores, a obtenção do desempenho esperado do inversor é fortemente dependente da tensão do barramento CC, a qual deve estar estabilizada para que se consiga atingir simultaneamente ambas as restrições previamente mencionadas.

Ao empilhar (conexão série) várias FC's para obter tensão elevada, dois aspectos devem ser observados. O primeiro diz respeito à confiabilidade, ou seja, se apenas uma FC estiver danificada toda a estrutura estará comprometida impossibilitando-a de fornecer energia. Para resolver isto, basta fazer um "by-pass" pela célula curto-circuitada. O segundo é com relação a corrente de carga da pilha, onde deve-se evitar variações que poderiam ser danosas para os eletrodos das células, diminuindo a vida útil da pilha.

Assim o conversor CC-CC serve para controlar o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC do conversor CC-CA e evitar transitórios rápidos de potência. Devido ao fato da FC possuir resposta dinâmica lenta o conversor CC-CC deve operar no modo de condução

contínua. Sua variável de controle será a corrente uma vez que, para se obter um rendimento compatível e drenar energia da FC com um aproveitamento razoável da pilha, é preciso operá-la num ponto central da curva estática. O conversor CC-CA, por sua vez, ajustará a corrente injetada na rede de modo a estabilizar a tensão no barramento CC comum tanto ao conversor Boost quanto ao conversor CC-CA e, também, injetar e/ou absorver da rede uma corrente com fator de potência unitário.

5.1 Controle da Corrente CA

Por estar a FC conectada à rede da concessionária através de conversores e inversores, uma possível solução para controle da corrente CA seria controlar o conversor CC-CA no modo corrente. Para tal, cabe a concessionária definir a tensão e a frequência no ponto de acoplamento comum (PCC) ao qual se inserem: as cargas, o produtor local de energia e a rede da concessionária. De acordo com essa premissa, é montado o diagrama de blocos da Figura 5.1. Como este diagrama foi implementado numa plataforma digital, tanto as referências quanto as grandezas medidas devem ser projetadas e analisadas neste domínio. No diagrama da Figura 5.1 estão identificadas:

k_{lem} é a constante de proporcionalidade entre os sensores de corrente e o conversor analógico digital da plataforma digital.

k_{ADC} é a constante que converte as entradas da plataforma digital em valores hexadecimais [2].

O bloco $\frac{1}{s.L_o}$ é a função de transferência tensão-corrente do filtro de saída do conversor CC-CA. Tal aproximação é válida se a impedância carga/rede for muito menor do que a impedância do filtro capacitivo e se a frequência de amostragem for suficientemente grande quando comparada à frequência da corrente fundamental que se deseja sintetizar [2, 8].

Existe ainda o bloco PWM que é igual a $\frac{V_{cc}}{2} \cdot e^{-s.T/2}$. Esse bloco é modelado como a tensão do barramento CC com variação de largura de pulso e a tensão aplicada pelo inversor

ao sistema, sendo que T é a taxa de amostragem é igual ao período de comutação dos interruptores.

As variáveis i_{Lo}^* são as representações das correntes de referência para as indutâncias do filtro de saída e i_{Lo} são as representações das correntes medidas sobre as mesmas indutâncias.

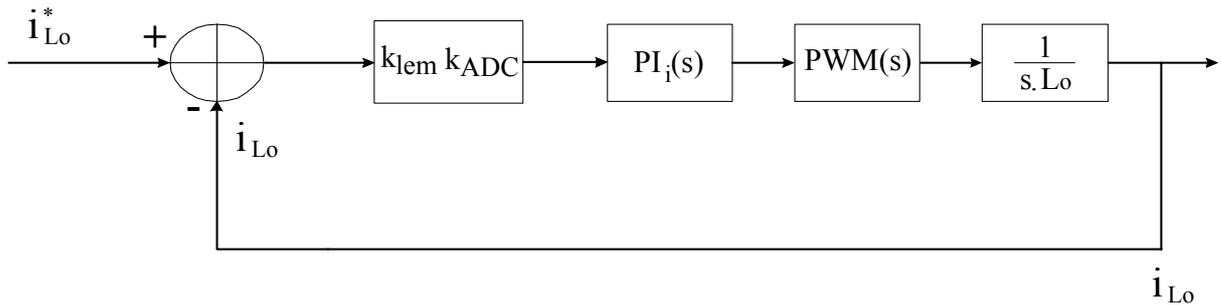


Figura 5.1 – Controle de corrente em malha fechada

Para o projeto adequado do compensador PI é necessária a escolha da margem de fase (mfi) e da frequência de corte que se deseja obter em malha fechada (F_{CLi}). Baseando-se neste diagrama, a equação 5.1 fornece o ganho de malha aberta que servirá para a determinação das constantes do controlador PI. Após definido o ganho em malha aberta, G_{OLi} e com a imposição da frequência de corte de malha fechada, o ganho proporcional do compensador PI (k_{propi}) de corrente será dado pela equação 5.2.

$$G_{OLi} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{CC}}{2^{15}} \cdot k_{lem} \cdot k_{ADC} \cdot \frac{1}{L_o} \quad (5.1)$$

$$k_{propi} = \frac{F_{CLi}}{G_{OLi}} \cdot 2 \cdot \pi \quad (5.2)$$

Já o ganho integral (k_{inti}) é calculado de acordo com a equação 5.3.

$$k_{inti} = \frac{k_{propi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{CLi}}{\tan(mfi)} \quad (5.3)$$

Uma vez definidas ambas as constantes através das expressões obtidas nas equações

5.2 e 5.3 pode-se calculá-las baseados nos parâmetros mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros do sistema – PI corrente					
F_{CLi} (Hz)	mfi ($^{\circ}$)	V_{CC} (V)	L_o (mH)	k_{lem}	k_{ADC}
1000	70	300	0,7	$\frac{1}{5}$	2^{15}

Como a proposta apresentada tem como princípio básico operar conectada a rede e para tal a rede apresenta uma baixíssima impedância, a resposta em frequência será apresentada apenas considerando a impedância da carga e da rede muito baixas ($Z_{carga//rede} \cong 0$).

Com essa consideração, nas frequências de interesse tanto fase quanto ganho não necessitam serem compensados, ou seja, apenas o controlador PI é suficiente para zerar o erro de fase e amplitude. Ressalta-se que esta análise é válida somente se o conversor CC-CA estiver operando no modo corrente e a rede estiver presente.

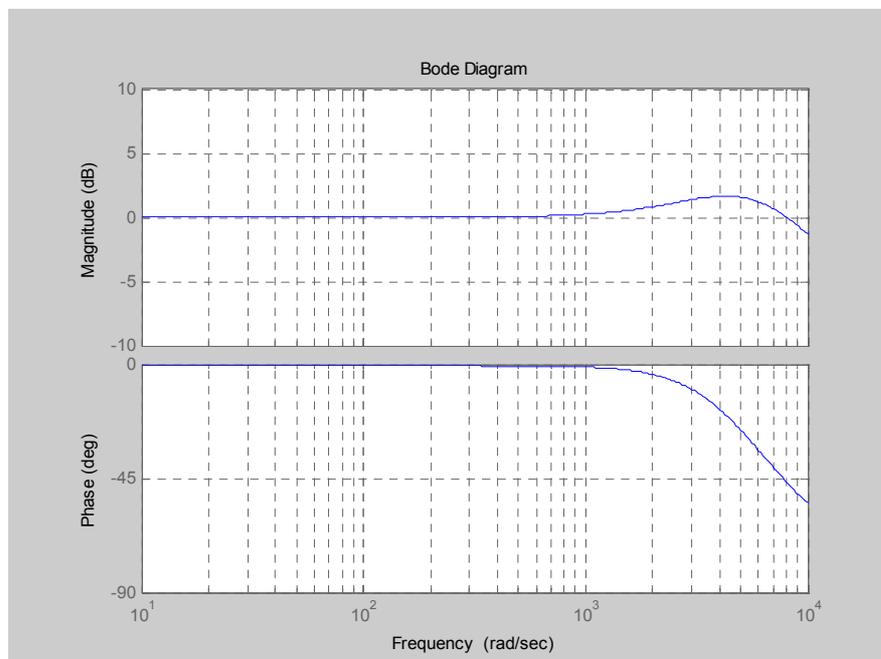


Figura 5.2 – Resposta em frequência do controle de corrente em malha fechada

5.2 Controle PI da Tensão do Barramento CC

O controle da tensão do barramento CC será implementado utilizando como hipótese a grande capacidade do armazenador de energia. Isso significa que tal componente é projetado para apresentar resposta lenta quando submetido a variações em degrau. Levando-se em conta a imposição de dinâmicas lentas para a tensão do barramento CC, também será utilizado um controlador do tipo PI para controlá-la. Devido ao tipo de implementação, a saída do controle da tensão CC multiplicada pela tensão de fase da rede produz a referência para o controle da corrente CA. O diagrama de controle é visualizado na Figura 5.3.

Como se desejam mínimas ondulações sobre a tensão do barramento CC e dado que o capacitor tem valor elevado, resta impor na equação 5.4 que ΔV_{CC} seja aproximadamente igual a zero. Ou seja, tais variações serão exclusivamente proporcionais às variações sobre a corrente do barramento CC.

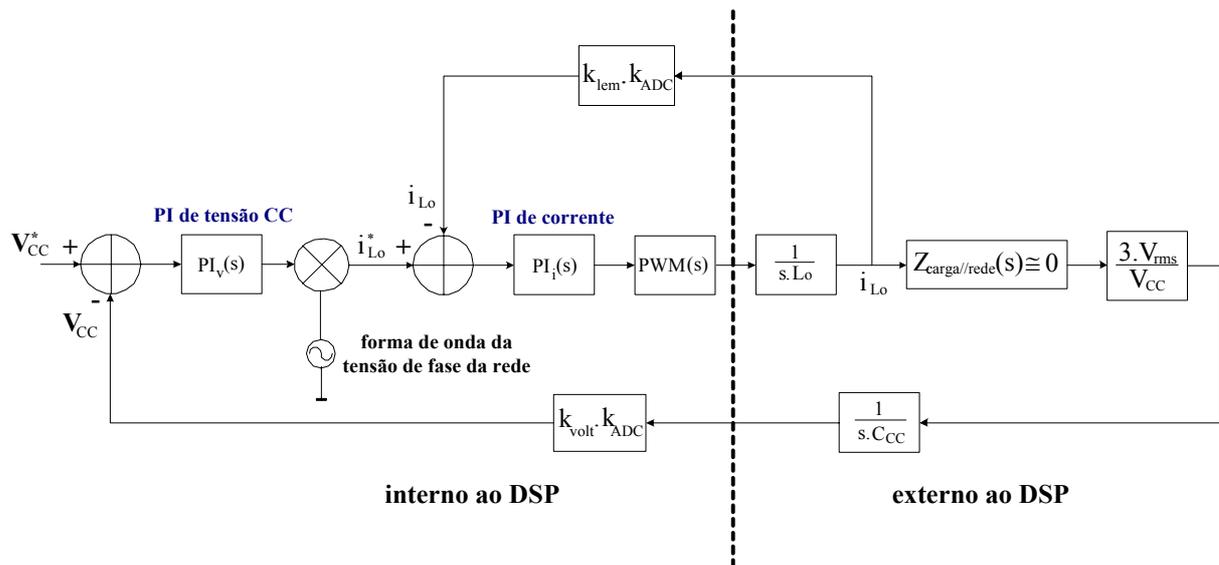


Figura 5.3 – Diagrama do controle CC

$$\Delta P_{CC} = \Delta(V_{CC} \cdot i_{CC}) = \underbrace{\Delta V_{CC} \cdot i_{CC}}_{=0} + V_{CC} \cdot \Delta i_{CC} = V_{CC} \cdot \Delta i_{CC} \quad (5.4)$$

Para um fator de potência aproximadamente 1 a potência P_0 resulta na equação 5.5 cujas variáveis V_{rms} e i_{rms} representam a tensão de fase imposta pela rede da concessionária e a corrente de fase que circula do conversor para a rede/carga ou vice-versa.

$$P_o = 3.V_{rms}.i_{rms} \quad (5.5)$$

Como toda a variação associada a P_o é devida a i_{rms} , tem-se:

$$\Delta P_o = 3.V_{rms}.\Delta i_{rms} \quad (5.6)$$

Igualando a equação 5.4 à equação 5.6 o resultado é Δi_{CC} em função de Δi_{rms} .

$$\Delta i_{CC} = \frac{3.V_{rms}.\Delta i_{rms}}{V_{CC}} \quad (5.7)$$

Com os passos seguintes, determinam-se os ganhos proporcional e integral do controle do barramento CC. Novamente é imposta a margem de fase (mfCC) e a frequência de corte de malha fechada (F_{CLCC}).

Semelhantemente como apresentado no controle da corrente do conversor CC-CA e utilizando o diagrama de blocos da Figura 5.3 obtém-se o ganho de malha aberta de acordo com a equação 5.8. Com F_{CLCC} e mfCC obtém-se os ganhos, proporcional (k_{propCC}) (equação 5.9) e integral (equação 5.10) para o compensador PI da tensão do barramento CC [11 – 14].

$$G_{OLCC} = \frac{3.V_{rms}.k_{volt}}{V_{CC}.2^{15}} \cdot \frac{1}{C_{CC}.k_{lem}} \quad (5.8)$$

$$k_{propCC} = \frac{F_{CLCC}}{G_{OLCC}}.2.\pi \quad (5.9)$$

$$k_{intCC} = \frac{k_{propCC}.2.\pi.F_{CLCC}}{\tan(mfCC)} \quad (5.10)$$

A Tabela 5.2 mostra os parâmetros para o projeto do controlador da tensão CC.

Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema – PI tensão do barramento CC						
F_{CLCC} (Hz)	mfCC (°)	V_{CC} (V)	C_{CC} (μ F)	V_{rms} (V)	k_{ADC}	k_{volt}
15	75	300	2500	80	2^{15}	$1/350$

5.3 Controle do Conversor CC-CC

Devido a característica da célula de combustível de ter a maioria de seus parâmetros ampla variação à medida que a carga em seus terminais se altera, optou-se em controlar a corrente do conversor CC-CC no modo de condução contínua. Com isso, a fonte CC trabalhará em um ponto de operação único e toda energia elétrica produzida pela célula ou será consumida localmente ou injetada na rede monofásica.

O compensador empregado para se obter erro zero entre a corrente de referência e a corrente medida sobre a indutância L_{f2} , em regime permanente, é do tipo PI. A Figura 5.4 apresenta o diagrama de controle no qual k_{lem} , $PI_{i_{L_{f2}}}(s)$ e $PWM_{i_{L_{f2}}}(s)$ representam ganho do sensor de corrente (1 pu = 20 A), a função de transferência do PI que controla a corrente do conversor CC e o ganho do PWM, respectivamente.

O critério de projeto das constantes do $PI_{i_{L_{f2}}}(s)$ é baseado no método “space state averaging”. Esse método é representado pela equação 5.11 e é uma simplificação da função de transferência da planta. O regulador de corrente é projetado como se a carga fosse puramente indutiva. $i_{L_{f2}}$ é a corrente média sobre a indutância L_{f2} e δ é o ciclo de trabalho [7 – 9].

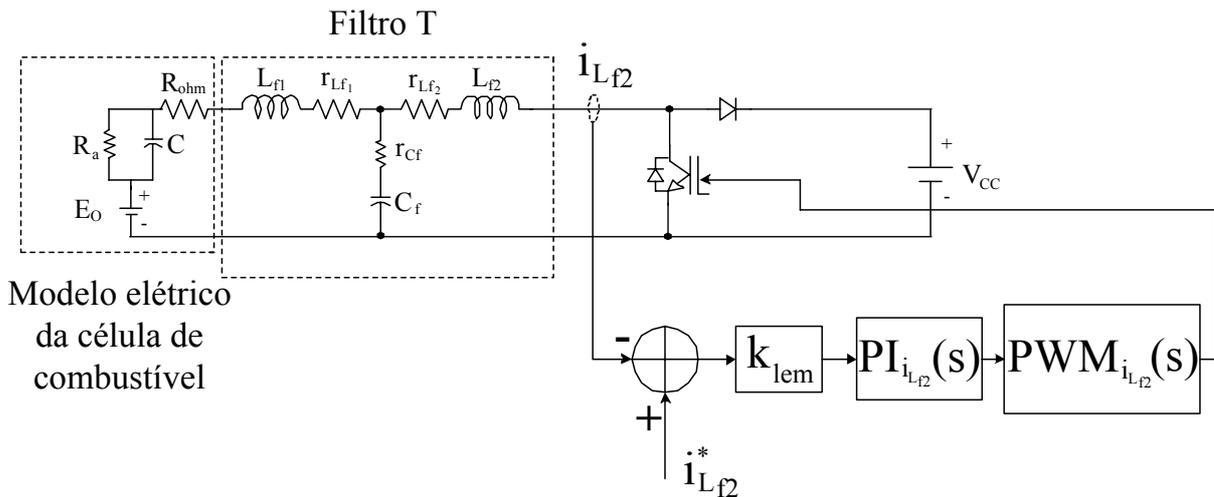


Figura 5.4 – Diagrama de controle do conversor CC-CC

$$i_{L_{f2}} \cong \frac{V_{CC}}{s.L_{f2}} \cdot \delta \quad (5.11)$$

A utilização da equação simplificada pode gerar conclusões errôneas quando for feita a análise de estabilidade. Para evitar isso, será preciso usar um modelo mais completo da planta quando for traçado seu Lugar das Raízes (*Root Locus*) em malha aberta e da planta+controlador em malha fechada.

Semelhantemente aos projetos anteriores, serão definidos dois parâmetros para o $PI_{i_{L_{f2}}}$ (s): margem de fase do “Boost” (mfFC) e frequência de corte em malha fechada imposta pelo controle (F_{CLFC}). Os parâmetros utilizados no projeto são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros do sistema – PI da fonte CC

F_{CLFC} (Hz)	mfFC (°)	V_{CC} (V)	L_{FC} (mH)	k_{lem}	V_{FC} (V)
1000	70	300	1	$1/20$	40

Da mesma forma que nos itens anteriores, as constantes proporcional (k_{propFC}) e integral (k_{intFC}) são dependentes do ganho em malha aberta G_{OLFC} , da frequência de corte e da margem de fase desejada, equações 5.12 e 5.13 [8].

$$k_{propFC} \cdot \frac{G_{OLFC}}{\omega_{FCLFC}} = 1 \quad (5.12)$$

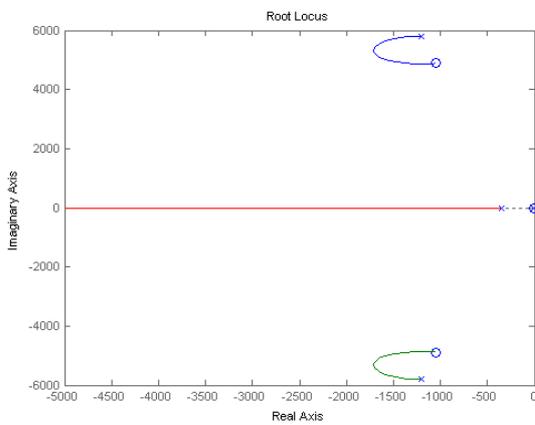
$$k_{intFC} = k_{propFC} \cdot \frac{\omega_{FCLFC}}{\tan(mfFC)} \quad (5.13)$$

5.4 Comportamento da Planta sob Variação de R_a

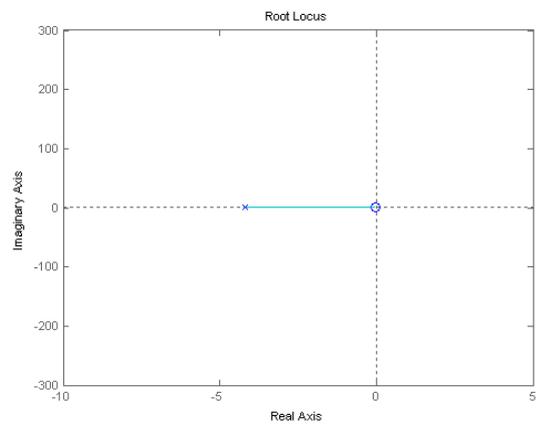
A descrição realizada no capítulo 4 tem como objetivo fundamental obter uma função de transferência entrada/saída que incorpore os parâmetros do conversor Boost e da célula de combustível. Caso seja possível identificar em uma planta tais parâmetros, então se consegue verificar, através de ferramentas do controle clássico, se a variação de componentes passivos como indutores e capacitores ou dos parâmetros da FC são capazes de tornar a planta (FC + conversor CC-CC) instável mesmo em malha aberta.

Sabe-se da literatura que componentes passivos (indutores e capacitores) podem variar aproximadamente 30%, variação esta que pode ser considerada desprezível quando comparada à possibilidade de variação de R_a , ocorrendo devido ao chaveamento de carga, que pode chegar a 7000%.

As Figuras 5.5 e 5.6 representam o lugar das raízes em dois diferentes níveis da resistência de ativação da FC: um quando R_a é um valor baixo (com carga) e outro sem a presença de uma carga nominal (valor alto de R_a).

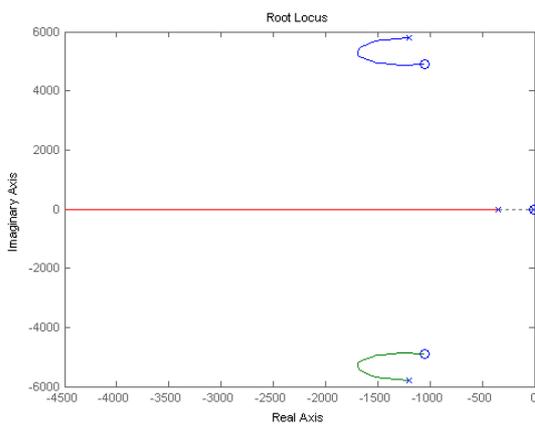


a – Comportamento da função de transferência

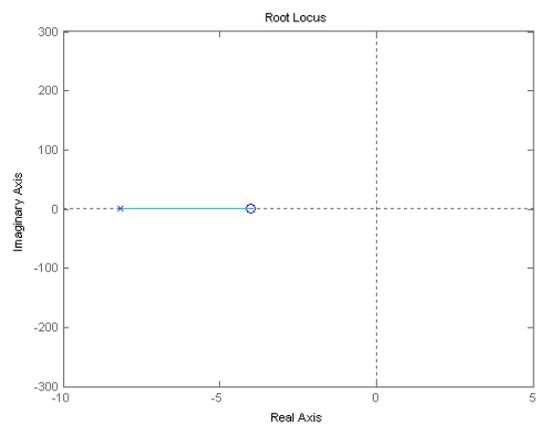


b – Zoom da área imaginária

Figura 5.5 – Lugar das Raízes dos parâmetros nominais (sem carga)



a – Comportamento da função de transferência



b – Zoom da área imaginária

Figura 5.6 – Lugar das Raízes com variação somente do R_a (carga nominal)

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os detalhes de um esquema de controle do fluxo da energia produzida pela célula de combustível de tal forma a se obter uma energia processada de alta qualidade.

Quanto à forma de injeção da energia da FC na rede, a escolha foi utilizar um sistema de dupla conversão. O primeiro estágio é composto por um conversor CC-CC que faz a célula operar num ponto ótimo ao mesmo tempo em que estabiliza a tensão num valor mais elevado de tensão que viabiliza a inversão CC-CA. No segundo estágio é utilizado um conversor CC-CA que tem por objetivo injetar corrente na rede com reduzida distorção harmônica, fator de potência próximo da unidade e ainda, estabilizar a tensão do barramento CC.

Conforme estudo das metodologias de projeto dos inversores, a obtenção do desempenho esperado do inversor é fortemente dependente da tensão do barramento CC, a qual deve estar estabilizada para que consiga atingir simultaneamente ambas as restrições previamente mencionadas.

Assim o uso de um conversor CC-CC é controlar o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC do conversor CC-CA para evitar que transitórios rápidos de potência cheguem à FC. Devido ao fato da FC possuir resposta dinâmica lenta, o conversor CC-CC opera no modo de condução contínua. Sua variável de controle é a corrente, uma vez que, para se obter rendimento razoável e drenar energia da FC, é preciso operar num ponto central da curva estática. O conversor CC-CA, por sua vez, ajustará a corrente injetada na rede de modo a estabilizar a tensão no barramento CC comum tanto ao 'Boost' quanto ao conversor CC-CA e também, injetar e/ou absorver da rede corrente com fator de potência unitário.

Por estar conectado à rede da concessionária, a solução para controlar o conversor CC-CA foi por modo corrente, cabendo à concessionária definir a tensão e a frequência no ponto de acoplamento comum (PCC) ao qual se inserem: as cargas, o produtor local de energia e a rede da concessionária. Assim, o sistema estudado e modelado foi implementado numa plataforma digital, significando que tanto as referências quanto às grandezas medidas foram projetadas e analisadas neste domínio.

O estudo realizado utilizou aproximações como a função de transferência tensão-corrente do filtro de saída do conversor CC-CA. Tal aproximação é válida se a impedância carga/rede for muito menor do que a impedância do filtro capacitivo e se a frequência de amostragem for suficientemente alta quando comparada à frequência da corrente fundamental

que se deseja sintetizar.

No sistema de injeção na rede foi utilizada a modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse-Width Modulation*). Essa modulação é modelada como a tensão do barramento CC com variação de largura de pulso e a tensão aplicada pelo inversor ao sistema, sendo que T é a taxa de amostragem e igual ao período de comutação dos interruptores.

O controle da tensão do barramento CC foi implementado utilizando como hipótese a grande capacidade do armazenador de energia. Isso significa que tal componente é projetado para apresentar uma resposta lenta quando submetida a variações em degrau. Levando-se em conta a imposição de dinâmicas lentas para tensão do barramento CC, também foi utilizado um controlador do tipo PI para controlá-la. Devido ao tipo de implementação, a saída do controle da tensão CC multiplicada pela tensão de fase da rede produz a referência para o controle da corrente CA.

Como se desejam mínimas variações na tensão do barramento CC e dado que o capacitor tem valor elevado, resta impor que ΔV_{CC} seja aproximadamente igual a zero. Ou seja, tais variações serão exclusivamente proporcionais às variações sobre a corrente do barramento CC.

Devido à característica da célula de combustível possuir ampla variação nos seus parâmetros à medida que a carga em seus terminais se altera optou-se em controlar a corrente do conversor CC-CC no modo de condução contínua. Com isso, a fonte CC trabalha em um ponto de operação único e toda energia elétrica produzida pela célula ou será consumida localmente ou injetada na rede monofásica.

O compensador empregado para se obter erro zero entre a corrente de referência e a corrente medida sobre a indutância L_{r2} , em regime permanente, é do tipo PI. O critério de projeto das constantes do PI é baseado no método “space state averaging”. Esse método é uma simplificação da função de transferência da planta. O regulador de corrente é projetado como se a carga fosse puramente indutiva. i_{Lr2} é a corrente média sobre a indutância L_{r2} e δ é o ciclo de trabalho.

Também foi representado o lugar das raízes em dois diferentes níveis da resistência de ativação: um quando R_a é um valor baixo (sem carga) e outro na presença de uma carga nominal (valor alto de R_a). Concluiu-se que o sistema é estável para ambos os casos, mostrando que no caso de carga nominal o sistema apresenta maior estabilidade (por estar mais distante do eixo imaginário) do que sem carga.

A descrição realizada no capítulo 4 tem como objetivo fundamental a obtenção da função de transferência entrada/saída que incorpora os parâmetros do “Boost” e da célula de combustível. Caso seja possível identificar em uma planta tais parâmetros, então se consegue verificar, através das ferramentas do controle clássico, se a variação dos componentes passivos, como os indutores e capacitores ou dos parâmetros da FC, são capazes de tornar a planta (FC + conversor CC-CC) instável mesmo em malha aberta. Apenas como termo de comparação, sabe-se da literatura que componentes passivos (indutores e capacitores) podem variar em aproximadamente 30%, variação esta que pode ser considerada desprezível quando comparada à variação de R_a que poderia chegar a 7000%.

RESULTADOS

Nos capítulos anteriores foram apresentadas a modelagem eletroquímica da célula de combustível, o projeto dos conversores CC-CC e CC-CA para a injeção de energia na rede e o controle do conversor CC-CC para regular o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC do conversor CC-CA. O objetivo desta configuração de conversor é evitar que os transitórios cheguem de forma atenuada à pilha de célula de combustível e estabelecer as linhas gerais tanto do projeto do controlador de ambos os conversores como o de seus componentes passivos. Desta forma, pode-se ajustar a corrente a ser injetada na rede através do inversor CC-CA de modo a estabilizar a tensão do barramento CC comum tanto ao conversor Boost quanto ao conversor CC-CA. O controle deve servir também, para garantir que a injeção e/ou absorção corrente da rede tenha fator de potência unitário.

O objetivo principal deste capítulo é o de apresentar os resultados experimentais obtidos no controle do fluxo de energia, para serem comparados com os resultados de simulação. Basicamente, os dados referem-se à resposta dos controladores analisados no capítulo anterior.

6.1 Resultados de Simulação

As simulações foram realizadas usando o programa PSIM/SIMCAD. O diagrama das interligações entre os conversores e a pilha de células de combustível é mostrado na Figura 6.1. Os resultados apresentam-se como um estudo de caso: em um determinado instante, o sistema está injetando energia de 500 W à rede, quando então ocorre a inserção de uma carga linear de 1200 W. A partir desta descrição é possível observar duas situações bem distintas: na primeira o sistema envia para a rede 500 W e trabalha no modo co-geração; na segunda ela refere-se a uma situação de absorção da rede de cerca 700 W para alimentar a carga como

parte do sistema, mostrando a rede alimentando a carga com 700 W e o sistema da FC fornecendo o restante de potência (500 W) à carga, conforme visto na Figura 6.2.

O segundo gráfico da Figura 6.2 mostra as correntes de fase da carga linear chaveada. O valor de pico destas correntes é de aproximadamente 9 A de pico.

Na Figura 6.3 é representada a corrente do filtro de saída LC de uma das fases, com valores em pu, levemente atrasada em relação a corrente de referência do seu controlador PI. O valor é de aproximadamente 0,23 pu de pico. Também é representada a tensão do barramento CC estabilizado com um valor de aproximadamente de 299,87 V.

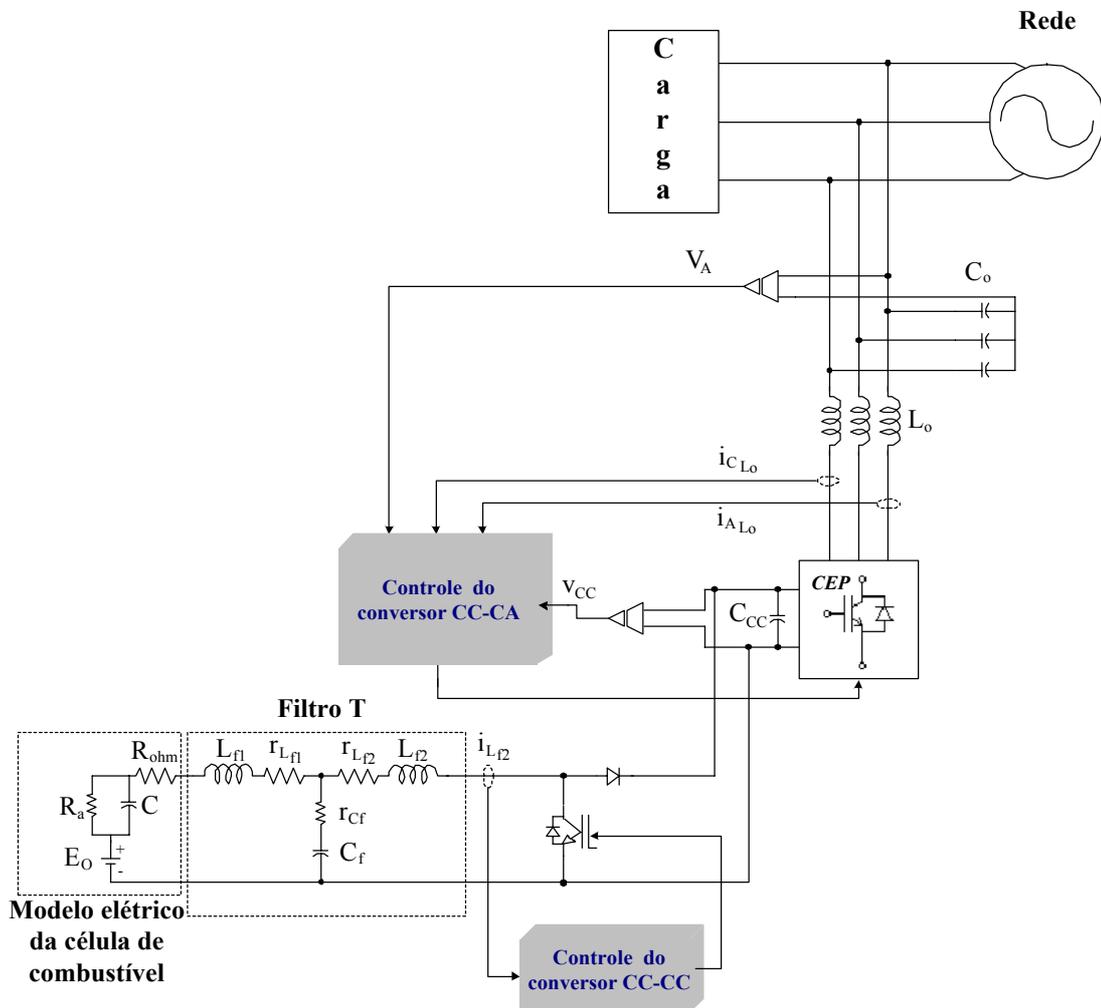


Figura 6.1 – Diagrama completo do sistema

Na Figura 6.4 observa-se o desacoplamento entre a energia fornecida pela célula e as variações impostas ao sistema devido às manobras de carga. Além disso, conclui-se também

que ao utilizar um filtro do tipo “T” e operar o conversor CC-CC no modo de condução contínua evita-se que a célula de combustível seja submetida a transitórios a cada comutação dos semicondutores. O primeiro gráfico mostra o valor da corrente i_{Lf2} , sendo 4 A de pico a pico, e o segundo gráfico apresenta o valor da corrente i_{Lf1} , tendo 1,4 A de pico a pico, ambos em relação a 15 A de valor médio.

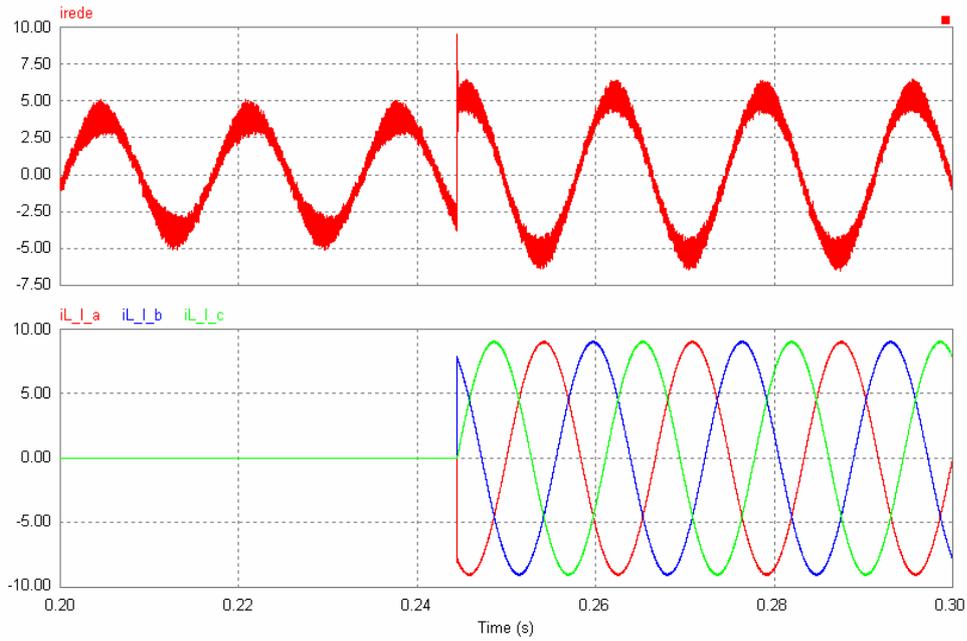


Figura 6.2 – Correntes do sistema trifásico

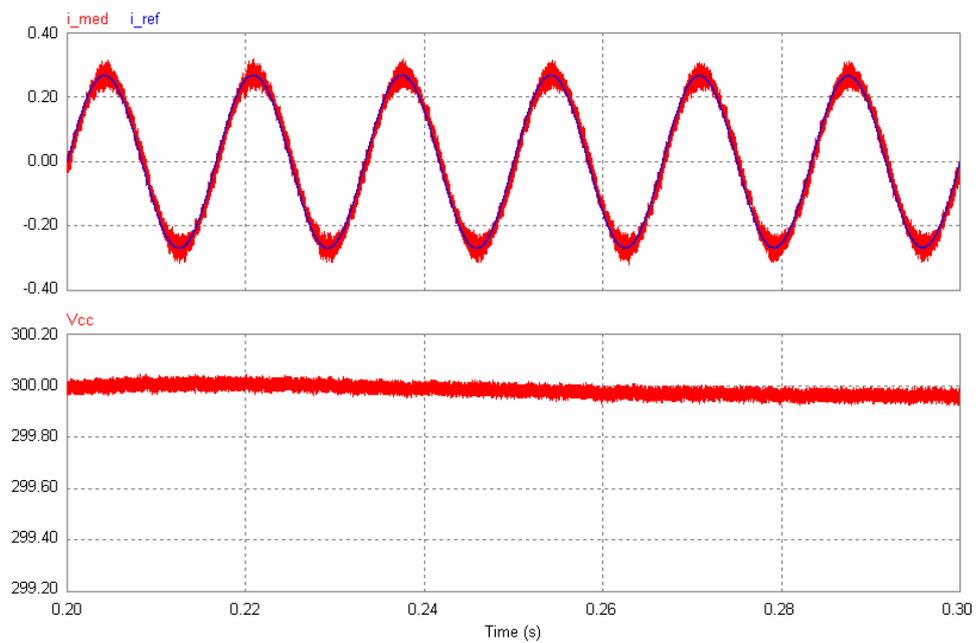


Figura 6.3 – Transitório de carga

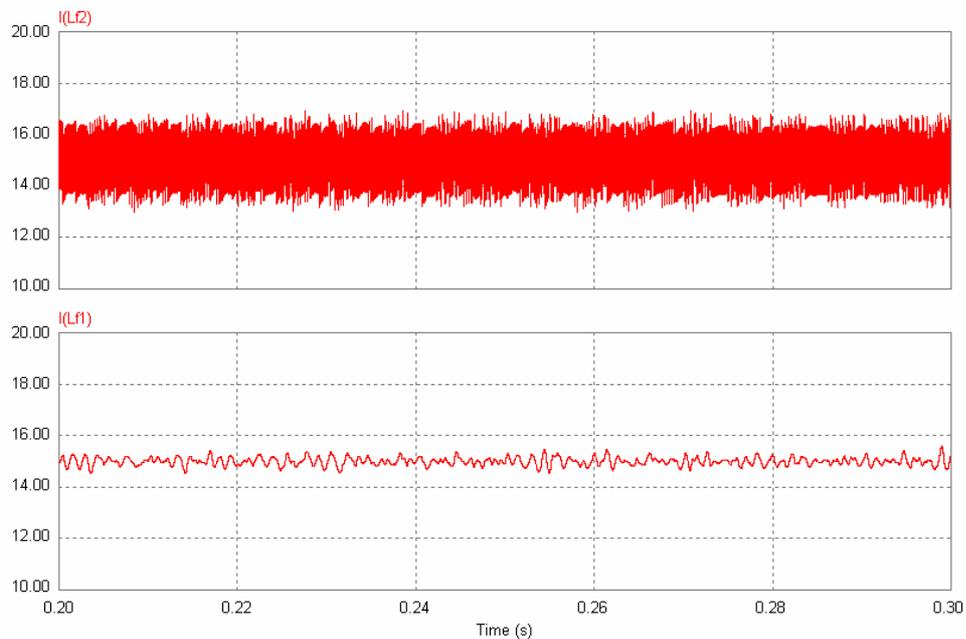


Figura 6.4 – Análise da ondulação das correntes

6.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais apresentados nesta seção referem-se apenas a interação imediata entre a pilha da célula de combustível e o conversor CC-CC, que é o objeto desta dissertação. Quanto aos resultados referentes a interação entre conversores CC-CC/CC-CA e a interação entre o conversor CC-CA e a rede pública, ou seja o funcionamento do conversor Boost conectado entre o conversor CC-CA e a rede, é avaliada no MatLab e PSIM/SIMCAD apenas como referencial para projeto. No caso específico do conversor projetado para a operação com a pilha de células de combustível, escolheu-se uma tensão na faixa de 20 V a 40 V e corrente de operação de 15 A (no ponto ótimo), porém os resultados práticos no modelo reduzido foram obtidos para 3 A como máximo de escala.

Como valores de referência para comprovação das previsões teóricas e de simulação em computador, simulou-se o conversor Boost conectado à célula para os mesmos dados realizados na prática. A Figura 6.5 mostra o diagrama elétrico do conversor Boost simulado, utilizando a ferramenta PSIM/SIMCAD.

Como pode ser visto na Figura 6.5, selecionou-se uma fonte CC de entrada, conectada a um filtro “T”, de tal forma que o primeiro braço indutivo (indutância de 500 μ H) do filtro funcionasse para suavizar a ondulação de corrente indo para as células e o segundo braço

(indutância de 1 mH) fizesse parte do conversor Boost para os quais usou-se os mesmos valores projetados para a operação de 15 A da pilha de células de combustível. Na saída, a tensão de barramento CC é de 300 V e a frequência de chaveamento de 12 kHz.

A Figura 6.6 mostra o sinal de referência e o valor medido, utilizando a escala de 3 A que equivale a 250 mV. Ambos os sinais são utilizados para o controlador Proporcional-Integral. A Figura 6.7 apresenta a corrente medida nos indutores L_{d1} e L_{d2} . O valor médio da corrente de L_{d1} é de 2,56 A. Os valores máximo e mínimo de ondulação de corrente de L_{d1} são 4,30 A e 0,83 A, respectivamente, com uma ondulação de 135 %.

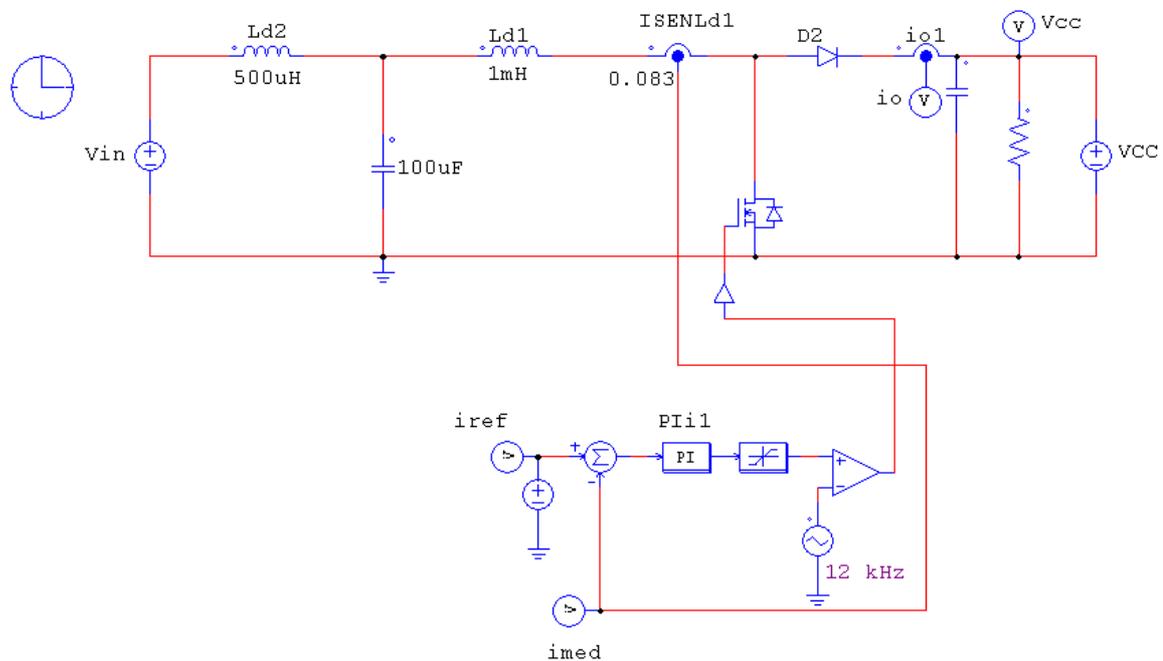


Figura 6.5 – Diagrama elétrico do conversor Boost

A figura 6.8 indica a corrente medida no indutor L_{d2} com melhor visualização. O valor médio de corrente é de 2,558 A. Os valores máximo e mínimo de ondulação de corrente são 2,562 A e 2,553 A, respectivamente, com uma ondulação de 0,35 %.

Para os resultados experimentais, o mesmo sistema foi montado. A corrente média medida na indutância de 1 mH foi de 2,46 A, considerando escala vertical de 1 A por divisão e escala horizontal de 25 μ s por divisão.. A Figura 6.9 mostra os sinais de referência e de medição obtidos pelo DSP da Analog Devices, modelo ADSP – 21992, EZ-KIT Lite Board. Na mesma figura é visto o detalhe (tracejado) de ambos os sinais.

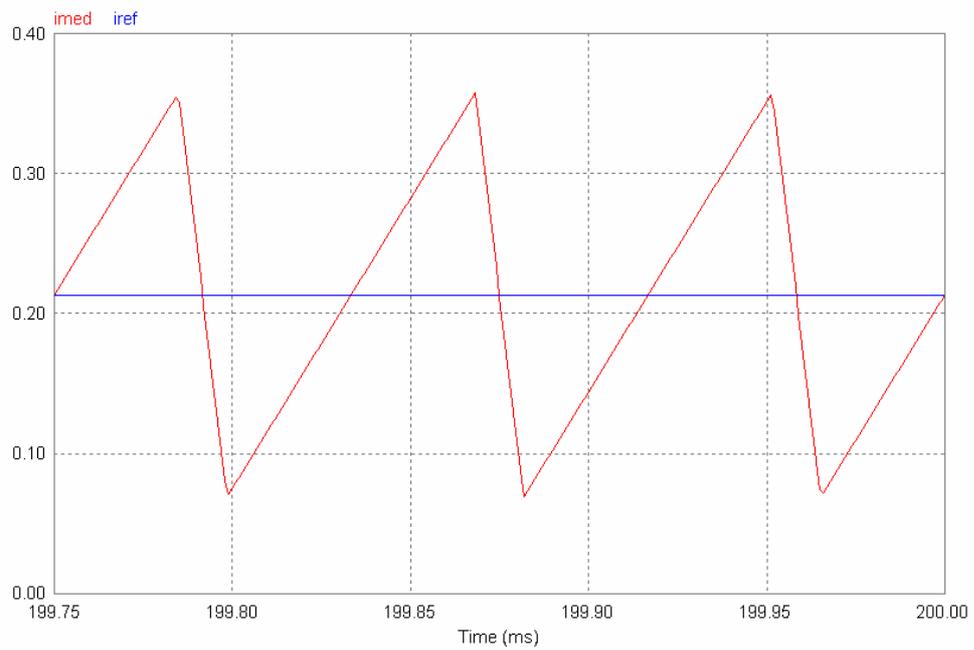


Figura 6.6 – Sinais de referência e de medição

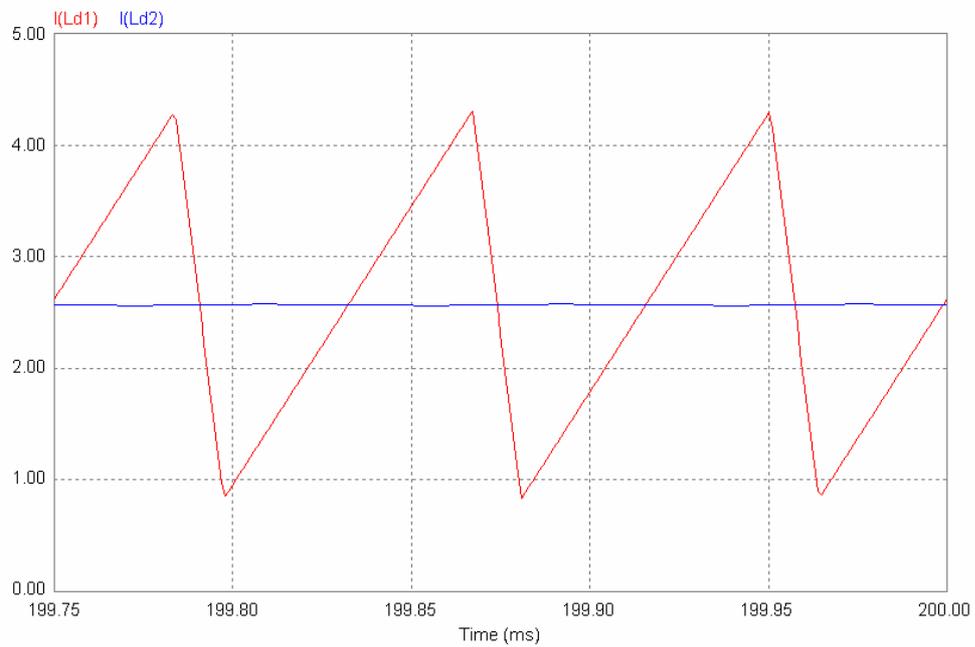


Figura 6.7 – Corrente dos indutores L_{d1} e L_{d2}

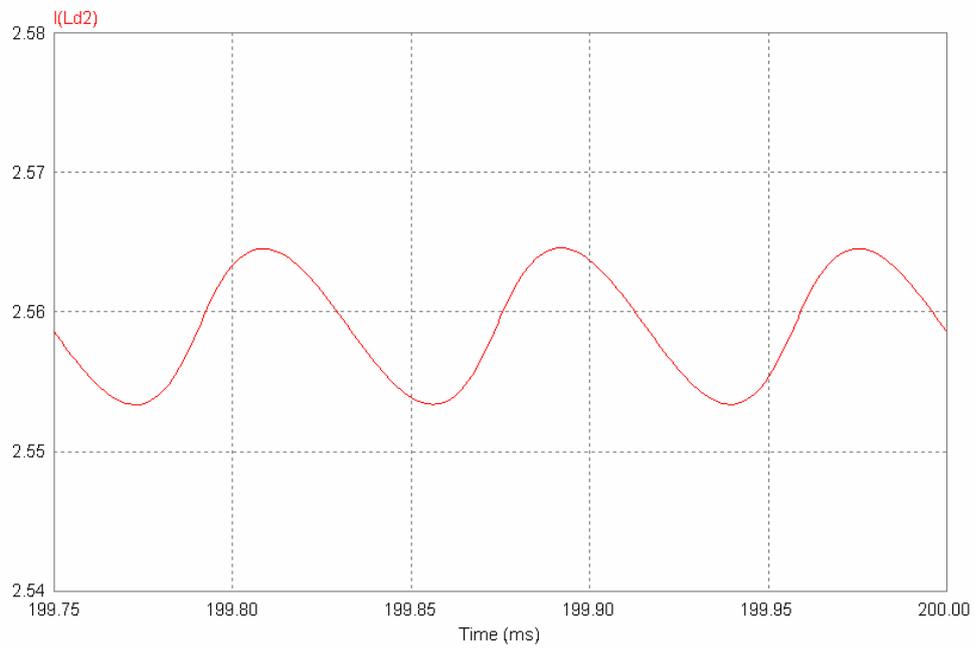


Figura 6.8 – Detalhe da corrente do indutor Ld2

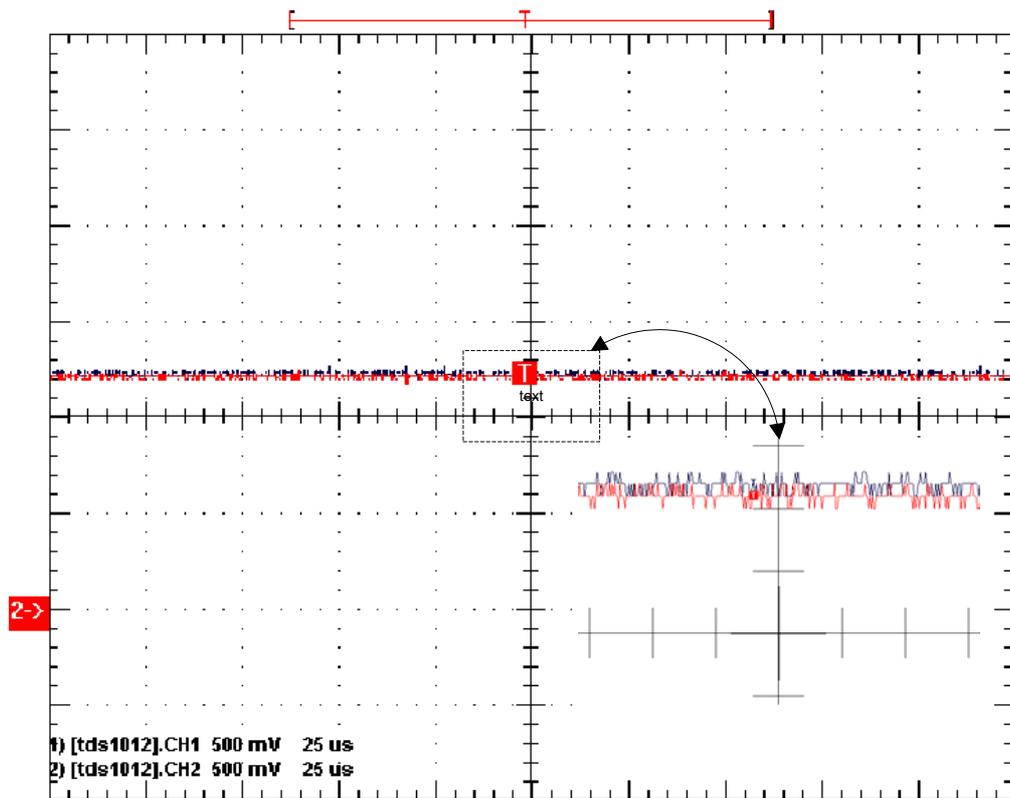


Figura 6.9 – Sinais de referência e de medição do DSP

Pode-se verificar que ambos os sinais estão com um valor médio de 1,23 V. Esta figura comprova que o PI projetado para o conversor Boost está funcionando adequadamente, tendo o sinal seguido a referência conforme as expectativas de projeto.

A Figura 6.10 mostra a corrente da indutância de 1 mH. A escala vertical utilizada na medição foi de 1 A que equivale a 10 mV por divisão e a escala horizontal foi de 25 μ s por divisão. O valor máximo e mínimo de corrente foi de 4,2 A e 0,8 A, respectivamente. O valor médio obtido é de 2,52 A e o delta (variação entre o máximo e o mínimo) foi de 3,2 A. A ondulação de corrente obtida foi de 135 %. Devido às capacitâncias parasitas, são vistos picos de corrente nos instantes de chaveamento que podem ser corrigidos usando "snubbers" de corrente ou trocando a chave e/ou diodo por componentes mais rápidos.

A Figura 6.11 mostra a corrente da indutância de 0,5 mH. A escala vertical utilizada foi de 0,5 A por divisão e a escala horizontal foi de 25 μ s por divisão. Os valores máximo e mínimo foram de 2,52 A e 2,44 A, respectivamente. O valor médio obtido é de 2,48 A e o delta foi de 0,08 A. A ondulação de corrente obtida foi de 3,2 %.

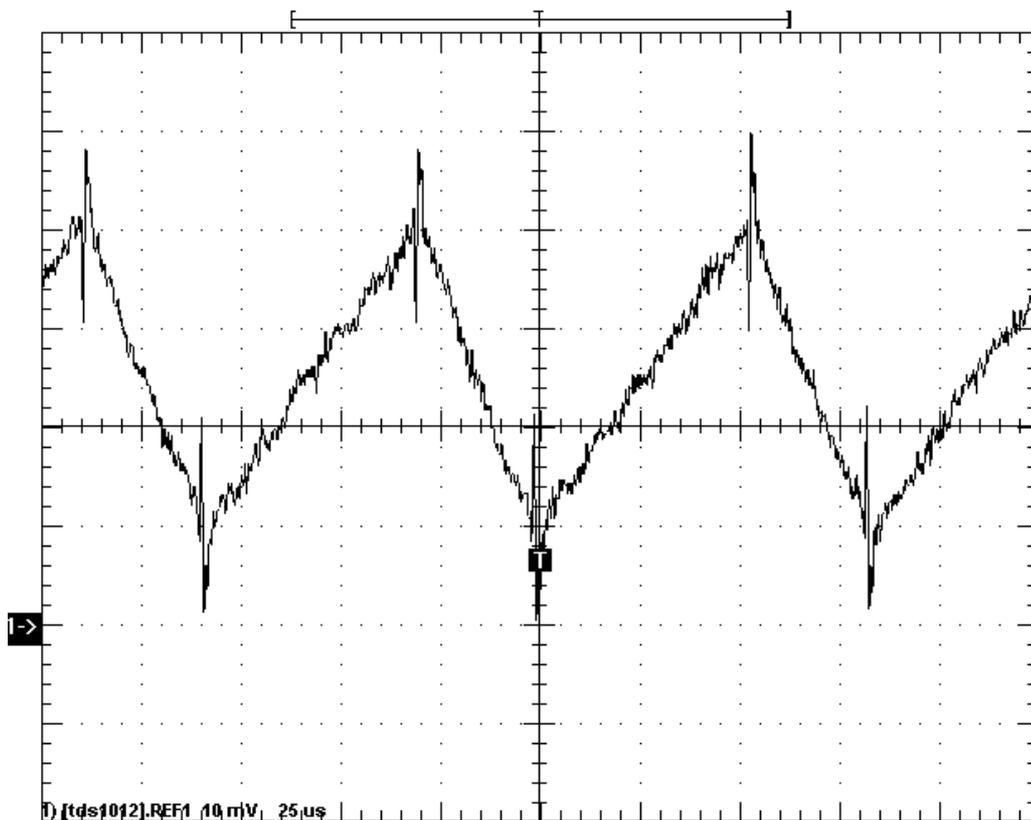


Figura 6.10 – Corrente da indutância de 1 mH

O Boost foi projetado para operar na faixa de 15 A, e na montagem de laboratório utilizou-se os mesmos elementos passivos do filtro “T” projetado anteriormente no capítulo 4. Ainda assim os resultados obtidos numa corrente menor (3 A na simulação e experimental) tornaram-se bastante próximos.

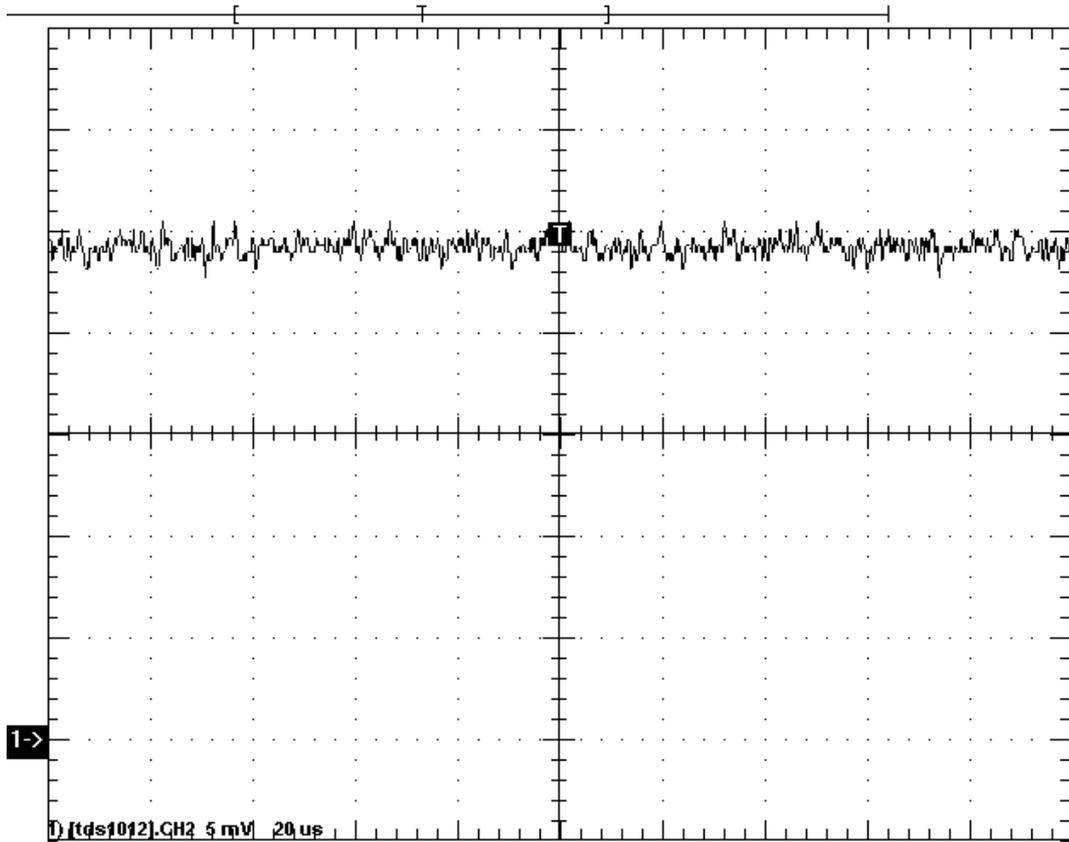


Figura 6.11 – Corrente da indutância de 0,5 mH

6.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma síntese dos principais resultados obtidos do controle de energia, sendo apresentados resultados de simulação da montagem de laboratório, comparando, basicamente, a resposta dos controladores analisados nesta dissertação.

Como comprovação do que foi dito nos capítulos anteriores, foram apresentados as modelagens eletroquímicas da célula de combustível e o projeto dos conversores CC-CC e CC-CA para a injeção de energia a rede. O controle do conversor CC-CC para o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC do conversor CC-CA atuou de forma a evitar transitórios rápidos de potência nos terminais das células de combustível. A simulação complementar do controle do conversor CC-CA serviu para ilustrar a expectativa de corrente injetada na rede para estabilizar a tensão no barramento CC comum tanto ao conversor Boost quanto ao conversor CC-CA e, também, injetar e/ou absorver da rede corrente com fator de potência unitário.

Nos resultados observa-se o desacoplamento entre a energia fornecida pela célula e as variações impostas ao sistema devido às manobras de carga. Além disso, conclui-se também que ao utilizar um filtro do tipo “T” e operar o conversor CC-CC no modo de condução contínua evita-se que a célula seja submetida a transitórios a cada comutação dos semicondutores.

Em relação aos resultados experimentais, o conversor CC-CC foi projetado para operação de uma pilha de células de combustível com tensão entre 20 a 40 V e corrente de operação de 15 A (ponto ótimo), porém, por questões práticas, os resultados práticos foram obtidos apenas para 3 A como limite de escala. Para verificação da interação das células de combustível e o conversor CC-CC, realizou-se a simulação do conversor Boost para os mesmos dados realizados na prática. Mesmo nestas condições, a comparação entre os resultados de simulação e experimental não foi prejudicada e estão bastante próximos, conforme previsto nos capítulos 4 e 5. Por este estudo estar concentrado na interação entre a célula de combustível e o conversor conectado nos seus terminais, não foi realizada a montagem do conversor CC-CA, apenas do conversor CC-CC.

Para os resultados experimentais do controle e monitoramento do sistema, foi utilizado o DSP da Analog Devices, modelo ADSP – 21992, EZ-KIT Lite Board. Os resultados obtidos pelo DSP comprovam que o controlador PI projetado para o conversor Boost funciona adequadamente, tendo o sinal do sistema seguindo a referência conforme o projeto previu.

CONCLUSÃO

7.1 Conclusão Geral

Este trabalho aborda a interação de células de combustível com conversores de potência sobre tais células, com enfoque na tecnologia de células do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) em uma nova modelagem dinâmica modificada de pilhas.

As células PEMFC são estudadas de tal forma a se obter melhorias no modelo usado para análise uni-dimensional das características eletroquímicas e elétricas dos fenômenos envolvidos na geração de energia elétrica com células de combustível, discutindo seus comportamentos estático e dinâmico, resultando em um modelo que permite prever a performance das células frente a condições normalmente encontradas em aplicações tais como unidades geradoras conectadas à rede pública e comportamento isolado. O modelo obtido nesta dissertação é adequado para sistemas de geração de energia elétrica em pequena escala, na faixa até 2 kW. Concluiu-se também que o comportamento dinâmico diferenciado do modelo da célula apresenta um coeficiente de tempo variável, devido às variações da resistência equivalente, em que age o fenômeno “dupla camada” que melhor descreve o comportamento transitório da pilha. O modelo matemático resultante pode ser utilizado como um bloco em simulações de sistemas de geração de energia elétrica.

Na utilização das pilhas de célula de combustível constatou-se a importância da modelagem e dimensionamento dos circuitos e dispositivos eletrônicos para controlar o fluxo de energia entre uma FC e a rede da concessionária, adequação dos níveis de tensão e injeção ou absorção de energia da rede com fator de potência unitário. A partir disto, concluiu-se que é melhor utilizar um sistema de dupla conversão de potência para acoplamento com a rede, um estágio intermediário CC-CC para elevar os níveis de tensão, e um estágio final CC-CA para conexão com a rede. O primeiro estágio tem como tarefa absorver da FC uma corrente com baixa ondulação. O conversor de entrada é do tipo Boost o qual foi associado a um filtro “T”, pois a corrente i_{FC} , obtida da pilha de células de combustível, precisa estar filtrada para

ter uma baixa ondulação e o conversor Boost precisa de uma indutância para elevação da tensão. A utilização de apenas um filtro LC não é recomendável por conectar apenas um capacitor diretamente na pilha de células de combustível o que estaria curto-circuitando a mesma durante transitórios. Foi realizado um estudo para encontrar a função de transferência de pequenos sinais entre a corrente i_{L12} e o ciclo de trabalho (δ) em torno dos pontos de operação médios em espaço de estado. A técnica apresenta como resultado um modelo linear para o estágio de potência que inclui o filtro de saída, sendo este válido para pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Para o conversor CC-CA devem ser observadas algumas características como: reduzida distorção harmônica na corrente que circula pela rede e fator de potência próximo da unidade. O sistema todo é projetado para que toda a energia produzida possa ser consumida localmente ou enviada à rede, conforme o balanço de energia. Se a carga local demandar potência superior àquela gerada pela FC a rede é que deve fornecer o déficit.

Esta dissertação discorre ainda sobre detalhes de um esquema de controle do fluxo da energia produzida pela célula de combustível (FC – *Fuel Cell*) de tal forma a se obter uma energia processada de alta qualidade. Conforme estudo das metodologias de projeto dos inversores, a obtenção do desempenho esperado do inversor é fortemente dependente da tensão do barramento CC, a qual deve estar estabilizada para que consiga atingir simultaneamente ambas as restrições previamente mencionadas. Assim, a finalidade do conversor CC-CC é controlar o fluxo de potência entre a FC e o barramento CC do conversor CC-CA para evitar que transitórios rápidos de potência cheguem à FC. Devido ao fato da FC possuir resposta dinâmica lenta, o conversor CC-CC opera no modo de condução contínua. Sua variável de controle é a corrente uma vez que, para se obter rendimento razoável e drenar energia da FC é preciso operar num ponto central da curva estática.

O conversor CC-CA, por sua vez, ajusta a corrente injetada na rede de modo a estabilizar a tensão no barramento CC comum tanto ao “Boost” quanto ao conversor CC-CA e também, injetar e/ou absorver da rede corrente com fator de potência unitário. Por este conversor estar conectado à rede da concessionária, a solução para controlar o conversor CC-CA foi por modo corrente, cabendo à concessionária definir a tensão e a frequência no ponto de acoplamento comum (PCC) ao qual se inserem: as cargas, o produtor local de energia e a rede da concessionária. No sistema de injeção na rede foi utilizada a modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse-Width Modulation*). O controle da tensão do barramento CC foi implementado utilizando como hipótese uma grande capacidade do armazenador de energia. Isso significa que tal componente é projetado para apresentar resposta lenta quando submetido

a variações em degrau. Levando-se em conta a imposição de dinâmicas lentas para tensão do barramento CC, foi utilizado um controlador do tipo PI para controlá-la. Devido ao tipo de implementação, a saída do controle da tensão CC multiplicada pela tensão de fase da rede produz a referência para o controle da corrente CA. Como se desejam mínimas variações sobre a tensão do barramento CC e dado que o capacitor tem valor elevado, resta impor que ΔV_{CC} seja aproximadamente igual a zero. O compensador empregado para se obter erro zero entre a corrente de referência e a corrente medida sobre a indutância L_{f2} , em regime permanente, é do tipo PI. O critério de projeto das constantes do PI é baseado no método “space state averaging”. Esse método é uma simplificação da função de transferência da planta. O regulador de corrente é projetado como se a carga fosse puramente indutiva. $i_{L_{f2}}$ é a corrente média sobre a indutância L_{f2} e δ é o ciclo de trabalho. Também foi representado o lugar das raízes em dois diferentes níveis da resistência de ativação: um quando R_a é um valor baixo (sem carga) e outro na presença de uma carga nominal (valor alto de R_a) apresentando variação de R_a de 7000%.

Nos resultados de simulação da montagem de laboratório observa-se o desacoplamento entre a energia fornecida pela pilha de células e as variações impostas ao sistema devido às manobras de carga. Além disso, conclui-se também que ao utilizar um filtro do tipo “T” e operar o conversor CC-CC no modo de condução contínua evita-se que a célula seja submetida a transitórios de tensão e corrente a cada período de comutação dos semicondutores. Observou-se um bom desempenho em regime permanente para carga linear nominal e para operação a vazio, mostrando uma rápida resposta transitória. Em relação aos resultados experimentais, não foi realizada a montagem do conversor CC-CA, apenas do conversor CC-CC, pois o interesse maior desta dissertação concentra-se na interação entre a pilha de células e o equipamento imediatamente ligado aos seus terminais. O conversor foi projetado para operação de uma pilha de células de combustível com tensão entre 20 a 40 V e corrente de operação de 15 A (ponto ótimo), porém, os resultados práticos foram obtidos apenas para 3 A como limite de escala. Para verificação da interação das células de combustível e o conversor CC-CC, realizou-se a simulação do conversor Boost para os mesmos dados realizados na prática. Mesmo nestas condições, a comparação entre os resultados de simulação e experimental não foi prejudicada e estão bastante próximos. Para os resultados experimentais do controle e monitoramento do sistema, foi utilizado o DSP da Analog Devices, modelo ADSP – 21992, EZ-KIT Lite Board. Os resultados obtidos pelo DSP comprovam que o controlador PI projetado para o conversor Boost está funcionando

adequadamente, tendo o sinal do sistema seguido a referência conforme a expectativa do projeto.

7.2 Contribuições desta Dissertação

O autor acredita que contribuiu para o estudo sobre células de combustível nos seguintes aspectos:

- 1) Melhorias nos modelos estático e dinâmico das células de combustível através da adequação das soluções matemáticas para o equacionamento já existente;
- 2) Redução e verificação dos fenômenos transitórios existentes durante a conexão e desconexão de uma pilha de células a sua carga ou sua operação em regime pulsado;
- 3) Utilização de um filtro “T” entre a pilha e o conversor de tal forma que um braço do filtro funcione para amortecer as ondulações de corrente indo para a pilha e o outro braço sirva para o conversor boost elevar e regular a tensão de saída do sistema como um todo.

7.3 Sugestões para Continuidade do Trabalho

Como possibilidade de futuras pesquisas, podem-se eleger os seguintes itens:

- O modelo dinâmico apresentado no capítulo 3 não descreve precisamente o comportamento dinâmico da FC. Existem diferenças entre os resultados experimentais e os teóricos, devido a falta de controle da umidade, pressão e temperatura do sistema. É possível que uma investigação na modelagem do fenômeno de dupla camada traga bons resultados. Salienta-se que a modelagem da FC, considerando-se variações de temperatura, entre outros fenômenos, não foi realizada por não fazer parte da proposta inicial do trabalho, e mesmo assim, esta traz consigo grandes dificuldades para a realização de contribuições inéditas, pois está relacionada a outras áreas de pesquisa, como eletroquímica e mecânica.
- Em termos de utilização de conversores, podem-se investigar outras topologias, isoladas ou não, que sejam adequadas para aplicações com células de combustível. Pode-se, também, verificar o uso de conversores conectado a um elemento armazenador de energia de maior capacidade, como supercapacitores ou baterias,

fornecendo energia durante o tempo de pré-aquecimento da FC ou durante as variações de carga ou ainda durante as sobrecargas.

- A dissertação mostra o projeto de conversores, o qual pode ser estendido para um maior detalhamento, ou ainda, podem ser abordadas questões como modelagem, controle e modulação, evidenciando mais algumas vantagens ou desvantagens deste conversor, quando comparado a outras soluções.
- Obtenção de resultados com o controle do conversor CC-CA, juntamente com a célula de combustível e o conversor Boost para injeção e/ou absorção de corrente na rede e estabilização da tensão no barramento CC comum.

Em linhas gerais, espera-se ter contribuído para o melhor conhecimento de aplicações de FC's para que estas se tornem viáveis comercialmente. Este estudo torna-se importante, já que atualmente há a necessidade de tecnologias como esta, com características de reduzido impacto ambiental durante o processamento de energia.

Novamente, tenta-se evidenciar a importância da pesquisa em eletrônica de potência, instrumentação, controle, métodos numéricos e programação computacional para aplicações deste tipo, bem como, chama-se a atenção para as possibilidades de contribuição, quando se trata de uma aplicação com abordagem de sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EPE (Empresa de Pesquisa Energética). “**Balço Energético Nacional 2005 – ano base 2004**”. Ministério de Minas e Energia, Governo Federal, págs. 190.
- [2] R. Q. Machado, S. Buso, J. A. Pomilio e F. P. Marafão. “**Three-Phase to Single-Phase Direct Connection for Rural Co-Generation Systems**”. Proceedings of the APEC’2004.
- [3] R. –J. Wai e C. –Y. Lin. “**High Efficiency, High-Step-Up DC-DC Converter for Fuel Cell Generation System**”. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 152, n° 5, págs. 1371-1378, 9 Set., 2005.
- [4] G. N. Bathurst, N. R. Watson e J. A. Arrilaga. “**Comparison of Converter Models for the Derivation of the AC System Harmonic Impedances**”. Revista IEEE, 0085-8950/02, 2002.
- [5] J. Anzicek e M. Thompson. “**DC-DC Boost Converter Design for Kettering Universitys GEM Fuel Cell Vehicle**”. Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, págs 307-316, 23-26 Out., 2005.
- [6] J. Lee, J. Jo, S. Choi e S. -B. Han. “**A 10 kW SOFC Low-Voltage Battery Hybrid Power Conditioning System for Residential Use**”. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, n° 2, págs. 575-585, Jun., 2006.
- [7] Implementation of PID and Deadbeat Controllers with the TMS320 Family, Application Report: SPRA083, Texas Instruments, 1997.
- [8] R. Q. Machado, S. Buso e J. A. Pomilio. “**A Line-Interactive Single-Phase to Three-Phase Converter System**”, IEEE PESC’04, págs. 753-758, 2004.
- [9] S. Buso, S. Fasolo e P. Mattavelli. “**Uninterruptible Power Supply Multiloop Control Employing Digital Predictive Voltage and Current Regulators**”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, n° 6, págs. 1846-1854, Nov/Dez, 2001.
- [10] J. J. Baschuk e X. Li, “**Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding**”, Journal of Power Sources, n° 86, págs. 181-196, 2000.

- [11] R. F. Mann et al, “**Development and Application of a Generalised Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell**”, Journal of Power Sources, n° 86, págs. 173-180, 2000.
- [12] J. C. Amphlett et al, “**A Model Predicting Transient Responses of Proton Exchange Membrane Fuel Cells**”, Journal of Power Sources, n° 61, págs. 183-188, 1996.
- [13] D. Chu e R. Jiang, “**Performance of Polymer Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stacks – Part I. Evaluation and Simulaton of an Air-Breathing PEMFC Stack**”, Journal of Power Sources, n° 83,págs. 128-133, 1999.
- [14] J. Kim et al, “**Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equation**”, Journal of Electrochem. Soc., n° 142, págs. 2670-2674, 1995.
- [15] J. Larminie e A. Dicks, “**Fuel Cell Systems Explained**”, Ed. John Wiley e Sons, Chichester, Inglaterra, págs. 308, 2000.
- [16] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha e M. S. Godoy, “**An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, n° 5, págs. 1103 – 1112, Out. 2004.
- [17] BCS Technology Inc, “**Data Sheet for a 500W PEM stack**”, 2002.
- [18] K. Ogata, “**Discrete-Time Control Systems**”, 2ª Ed., Ed. Prentice-Hall, págs. 745, 1995.
- [19] C. D. Johnson, “**Process Control Instrumentation Technology**”, 6ª Ed., Ed. Prentice-Hall, págs. 678, 2000.
- [20] K. J. Åström e B.Wittenmark, “**Computer-Controlled Systems**”, 3ª Ed., Ed. Prentice-Hall, págs. 557, 1997.
- [21] M. Yamaguchi et al, “**Analysis of Control Characteristics Using Fuel Cell Plant Simulator**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, n° 5, págs. 378-386, Out. 1990.
- [22] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte e M. A. M. Hendrix, “**Design of a Soft-Switched Three-Port Converter with DSP Control for Power Flow Management in Hybrid Fuel Cell Systems**”, European Conference on Power Electronics and Applications, págs. 10, 11-14 Set., 2005.
- [23] M. D. Lukas et al, “**Development of a Stack Simulation Model for Control Study on Direct Reforming Molten Carbonate Fuel Cell Power Plant**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, n° 4, págs. 1651-1657, Dez. 1999.
- [24] D. Liu e H. Li, “**Dynamic Modeling and Control Design for Bi-Directional DC-DC Converter for Fuel Cell Vehicles with Battery as Energy Storage Element**”, Industry

Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Vol. 3, págs 1632-1635, 2-6 Out., 2005.

[25] Y. H. Kim. e S. S. Kim, “**An Electrical Modeling and Fuzzy Logic Control of a Fuel Cell Generation System**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, n° 2, págs. 239-244, Jun. 1999.

[26] N. Mohan et al, “**Power Electronics: Converters, Application**”, 2nd Edition; Ed. John Willey, Inc, págs. 420, 1995.

[27] M. Kelly e A. Briggs, “**Methods of Hydrogen Storage for Standby Power Units**”, Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2002, 24th Annual International, págs. 331-337, 29 Set.- 03 Out., 2002.

[28] K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin e T. K. Bose, “**Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, n° 3, págs. 633-640, Set. 2004.

[29] E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci e N. Barry, “**A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply**”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, Seventeenth Annual IEEE, págs. 605-613, 2002.

[30] N. Kato, T. Murao, K. Fujii, T. Aoki e S. Muroyama, “**1-kW Portable Fuel Cell System Based on PEFCs**”, Telecommunications Energy Special, TELESICON, The Third International Conference, págs. 209-213, 07-10 May, 2000.

[31] M. Pagano e L. Piegari, “**Electrical Networks Fed by Fuel-Cells for Uninterruptible Electrical Supply**”, Industrial Electronics, ISIE 2002, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium, Vol. 3, págs. 953-958, 26-29 May, 2002.

[32] L. Palma, M. H. Todorovic e P. Enjeti, “**Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications**”, 21th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, págs: 6, 19-23 Mar., 2006.

[33] D. Candusso, I. Valero, A. Walter, S. Bacha, E. Rullière e B. Raison, “**Modelling, Control and Simulation of a Fuel Cell Based Power Supply System with Energy Management**”, IECON '02, IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Vol. 2, págs. 1294-1299, 05-08 Nov., 2002.

[34] W. Choi, P. N. Enjeti e J. W. Howze, “**Development of an Equivalent Circuit Model of a Fuel Cell to Evaluate the Effects of Inverter Ripple Current**”, Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '04, Vol. 1, págs. 355-361, 2004.

- [35] D. Yu e S. Yuvarajan, “**A Novel Circuit Model For PEM Fuel Cells**”, Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '04, Vol. 1, págs. 362-366, 2004.
- [36] M. Ceraolo, C. Miulli e A. Pozio, “**Modelling Static and Dynamic Behaviour of Proton Exchange Membrane Fuel Cells on the Basis of Electro-Chemical Description**”, Journal of Power Sources 113, págs. 131-144, 2003.
- [37] H. Xu, L. Kong e X. Wen, “**Fuel Cell Power System and High Power DC-DC Converter**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, n° 5, págs. 1250-1255, Set. 2004.
- [38] P.R. Pathapati, X. Xue e J. Tang, “**A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System**”, Renewable Energy 30, págs. 01-22, 2005.
- [39] A. M. Tuckey e J. N. Kruse, “**A Low-Cost Inverter for Domestic Fuel Cell Applications**”, IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC '02, Vol. 1, págs. 339-346, 23-27 Jun. 2002.
- [40] R. Sharma e H. Gao, “**A New DC-DC Converter for Fuel Cell Powered Distributed Residential Power Generation Systems**”, 21th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, págs: 5, 19-23 Mar., 2006.
- [41] K. Sedghisigarchi e A. Feliachi, “**Control of Grid-Connected Fuel Cell Power Plant for Transient Stability Enhancement**”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, págs. 383-388, 27-31 Jan. 2002.
- [42] T. A. Nergaard, J. F. Ferrel, L. G. Leslie e J. S. Lai, “**Design Considerations for a 48 V Fuel Cell to Split Single Phase Inverter System with Ultracapacitor Energy Storage**”, IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC '02, Vol. 4, págs. 2007-2012, 23-27 Jun. 2002.
- [43] S. Yerramalla, A. Davari e A. Feliachi, “**Dynamic Modelling and Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cell**”, 2002.
- [44] P. Famouri e R. S. Gemmen, “**Electrochemical Circuit Model of a PEM Fuel Cell**”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, págs. 1436-1440, 13-17 Jul. 2003.
- [45] J. Wang, F. Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph e R. Buffernbarger, “**Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, n° 5, págs. 1315-1322, Set. 2004.
- [46] P. T. Krein e R. Balog, “**Low Cost Inverter Suitable for Medium-Power Fuel Cell Sources**”, IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC '02, Vol. 1, págs. 321-326, 23-27 June 2002.

- [47] M. T. Aydemir, A. Bendre e G. Venkataramanan, “**A Critical Evaluation of High Power Hard and Soft Switched Isolated DC-DC Converters**”, 37th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference, Vol. 2, págs. 1338-1345, 13-18 Oct. 2002.
- [48] C. Liu, A. Ridenour e J. -S. Lai, “**Modeling and Control of a Novel Six-Leg Three-Phase High-Power Converter for Low Voltage Fuel Cell Applications**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, n° 5, págs. 1292-1300, Set., 2006.
- [49] G. M. Martins, J. A. Pomilio e S. Buso, “**A Single-Phase Low-frequency Commutation Inverter for Renewables**”, IEEE 27th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON '01, Vol. 3, págs. 1976-1981, 29 Nov.-02 Dec. 2001.
- [50] F. Zhang, F. Z. Peng e Z. Qian, “**Study of the Multilevel Converters in DC-DC Applications**”, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC '04, Vol. 2, págs. 1702-1706, 20-25 Jun. 2004.
- [51] C. Cecati, A. D. Aquila e M. Liserre, “**A Novel Three-Phase Single-Stage Distributed Power Inverter**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, n° 5, págs. 1226-1233, Set. 2004.
- [52] R. Gopinath, D. Kim, J. H. Hahm, M. Webster, J. Burghardt, S. Campbell, D. Becker, P. N. Enjeti, M. Yearly e J. Howze, “**Development of a Low Cost Fuel Cell Inverter System with DSP Control**”, IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC '02, Vol. 1, págs. 309-314, 23-27 Jun. 2002.
- [53] P. T. Krein, R. S. Balog e X. Geng, “**High-Frequency Link Inverter for Fuel Cells Based on Multiple-Carrier PWM**”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, n° 5, págs. 1279-1288, Set. 2004.
- [54] J. -W. Jung, M. Dai e A. Keyhani, “**Modeling and Control of a Fuel Cell based Z-Source Inverter**”, 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC' 05, Vol. 2, págs. 1112-1118, 6-10 Mar., 2005.
- [55] Y. R. de Novaes, “**Contribuições para Sistemas de Processamento de Energia de Células a Combustível**”, Tese de Doutorado, UFSC, págs. 288, Fev. 2006.
- [56] J. Millman e C. C. Halkias, “**Electronic Devices and Circuits – International Student Edition**”, Ed. MacGraw Hill, New York, págs. 152, 1967.

MODELAGEM MATEMÁTICA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Encontra-se na literatura vários modelos para a avaliação da performance de uma célula de combustível do tipo membrana de troca de prótons (PEMFC) unitária. Alguns modelos apresentados são baseados em ajustes de curvas, obtidas com dados experimentais [14]. Mann et al [11] apresentam um modelo semi-empírico, que combina reduções de performance em equações paramétricas baseadas em condições de operação da célula, como pressão e temperatura. Não é modelada a região de sobrepotencial de concentração. Baschuk et al [10] utiliza um tratamento analítico para prever a performance de células do tipo PEM.

A existência de um modelo matemático preciso para células de combustível ainda não está disponível. As principais limitações para obtenção de tal modelo são devido à existência de um número elevado de parâmetros, alguns empíricos e outros de difícil determinação; os processos envolvidos na geração de energia são complexos, alguns ainda não totalmente estudados ou entendidos e outros de propriedade dos fabricantes. Além disso, a utilização em escala comercial de células de combustível em geração de energia ainda é relativamente recente, e poucos resultados experimentais e estatísticos foram publicados.

Para a análise do desempenho de pilhas de células em sistemas de geração, torna-se necessário utilizar um modelo que reproduza o comportamento da pilha frente às condições normalmente encontradas na prática, como variações de carga, transitórias e variações das condições de operação, tais como temperatura, umidade relativa e pressão. Assim, este anexo apresenta a modelagem matemática de células e pilhas do tipo PEM, incorporando suas principais características eletroquímicas, termodinâmicas e cinéticas. A comparação entre os resultados obtidos com modelo e dados reais mostrou boa concordância de valores, validando-o como um bloco para a análise de sistemas de geração com PEMFC.

I.1 Operação Básica da Célula de Combustível [10]

Uma célula de combustível do tipo PEM converte a energia química do hidrogênio (H_2) e do oxigênio (O_2), em energia elétrica. O esquema básico de uma PEMFC típica é ilustrado na Figura I.1 [10]. No lado do anodo, o combustível (hidrogênio) é fornecido sob uma determinada pressão. Este difunde-se através do eletrodo até alcançar a camada catalítica do anodo, onde reage para formar prótons e elétrons, segundo a reação de oxidação:



No lado do catodo, o oxidante (oxigênio ou ar) flui nos canais da placa e difunde-se através do eletrodo até alcançar a camada catalítica do catodo. O oxigênio é, então, consumido juntamente com os prótons e elétrons. Nesta reação, há a produção de água líquida, juntamente com a geração de calor residual. A reação eletroquímica de redução, que ocorre no catodo, é representada por:



Combinando-se as Equações I.1 e I.2, a reação química global da FC é, assim, representada por:



O eletrólito fisicamente separa os dois reagentes e também previne a condução eletrônica, enquanto permite a passagem dos íons (prótons) do anodo para o catodo. Os elétrons circulam pelo circuito externo, do anodo para o catodo, para suprir a carga. Na junção entre os eletrodos e o eletrólito é utilizado um material catalítico (normalmente platina) para acelerar as reações químicas.

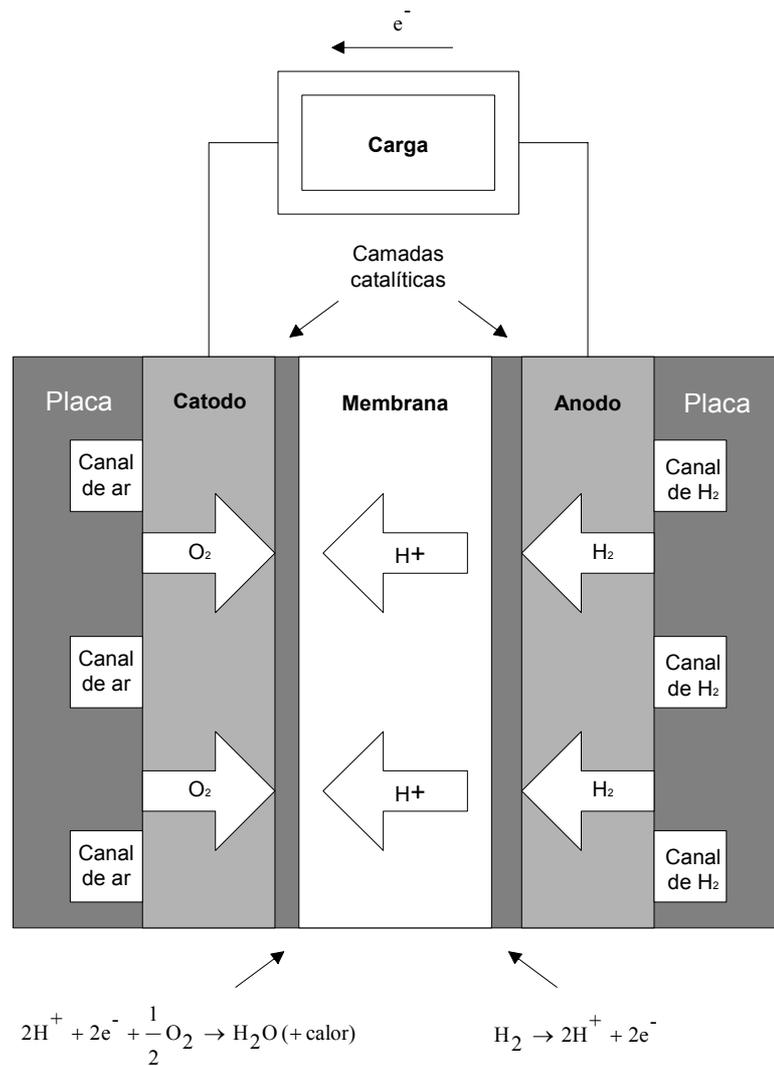


Figura I.1 - Esquema de operação de uma PEMFC típica

3.2 Tensão Reversível e Eficiência [15]

Um sistema de geração de energia elétrica, utilizando células de combustível, envolve diferentes formas de energia: a energia química dos gases de entrada, a energia elétrica de saída e a energia contida no calor gerado, além da água produzida durante a operação, conforme representado na Figura I.2 [15]. Para uma definição matemática da tensão de circuito aberto e da eficiência da célula, todas estas formas de energia devem ser levadas em consideração.

A principal dificuldade é a definição da energia química dos gases reagentes. No caso de células de combustível, a energia livre de Gibbs é importante para a definição desta quantidade de energia química, sendo definida como a energia disponível para realizar trabalho externo, desprezando-se qualquer trabalho realizado por mudanças na pressão e/ou

volume. Em uma FC, é a mudança na energia livre de Gibbs de formação (ΔG_f) que fornece a energia liberada.

Em unidades geradoras com FC, podem ser utilizados equipamentos auxiliares, como compressores, bombas, ventiladores, umidificadores, válvulas solenóides e controladores eletrônicos, que utilizam parte da energia elétrica gerada para a sua operação. Desta forma, a determinação do rendimento total do sistema de geração deve levar em consideração os aproveitamentos que possam ser feitos das energias disponíveis. As Seções I.2.1 e I.2.2 apresentam a metodologia para o cálculo da tensão reversível e da eficiência das células de combustível. A Seção I.2.3 estende o cálculo do rendimento à unidades geradoras com células de combustível, incluindo os equipamentos auxiliares.

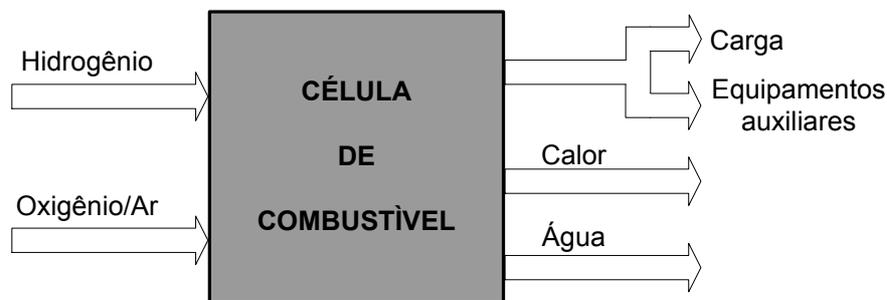


Figura I.2 – Entradas e saídas de uma célula de combustível

I.2.1 Tensão Reversível

Em uma célula de combustível ideal, sem perdas, o processo envolvido na geração de energia é dito reversível, pois toda a energia química dos reagentes é convertida em energia elétrica. Esta informação é utilizada para determinar a tensão reversível de circuito aberto de uma PEMFC.

A partir da operação básica de uma PEMFC, apresentada na Seção I.1, sabe-se que dois elétrons passam através do circuito externo de carga para cada molécula de água produzida e cada molécula de hidrogênio utilizada. Então, para um mol de hidrogênio utilizado, $2N$ elétrons passam através do circuito externo, onde N é o número de Avogadro. Assim, a carga que flui pelo circuito externo, para um mol de hidrogênio é dada por [15]:

$$q = -2 \cdot N \cdot e = -2 \cdot F \tag{I.4}$$

na qual:

q: carga elétrica (C);

F: constante de Faraday - a carga em um mol de elétrons ($F = 96485 \text{ C/mol}$); e

e: carga de um elétron.

Seja E_r a tensão reversível da FC; então o trabalho elétrico w_{el} realizado, em J/mol, para mover esta carga através do circuito é:

$$w_{el} = q \cdot E_r = -2 \cdot F \cdot E_r \quad (\text{I.5})$$

Se o sistema é reversível, então este trabalho elétrico será igual à mudança na energia livre de Gibbs liberada. Assim:

$$\Delta \bar{g}_f = w_{el} = -2 \cdot F \cdot E_r \quad (\text{I.6})$$

onde $\Delta \bar{g}_f$ é a mudança na energia livre de Gibbs de formação molar (J/mol).

Rearranjando-se a Equação I.6, obtém-se:

$$E_r = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (\text{I.7})$$

A Equação I.7 fornece o valor da tensão reversível da FC. Esta é a sua tensão de circuito aberto, considerando o sistema sem perdas e operando à pressão padrão de 100 kPa. Na prática, há algumas perdas no sistema, de tal forma que, mesmo em circuito aberto, a tensão resultante será menor que o valor dado pela Equação I.7, conforme detalhado no Capítulo 3, Seção 3.1.

I.2.2 Eficiência das Células de Combustível

Em uma célula de combustível são utilizados materiais que, normalmente, participam dos processos de combustão para liberar sua energia. Desta forma, na determinação da

eficiência de uma célula, é prático comparar a energia elétrica produzida com o calor produzido pela combustão da mesma quantidade do combustível utilizado. Esta quantidade de calor é definida como a mudança na entalpia de formação molar ($\Delta \bar{h}_f$). Por convenção, o valor de $\Delta \bar{h}_f$ é negativo quando a energia é liberada pelo sistema. Assim, a eficiência da célula é usualmente definida como:

$$\eta_{FC} = \frac{w_{el}}{-\Delta \bar{h}_f} \quad (I.8)$$

onde w_{el} é a trabalho elétrico (energia) produzido por mol de combustível utilizado.

Há dois valores possíveis para a mudança na entalpia de formação molar ($\Delta \bar{h}_f$), na Equação I.8, para a combustão do hidrogênio:

- para água produzida no estado de vapor:

$$\Delta \bar{h}_f = -241,83 \text{ (kJ/mol)}$$

- para água produzida no estado líquido:

$$\Delta \bar{h}_f = -284,84 \text{ (kJ/mol)}$$

O valor de $\Delta \bar{h}_f$ para vapor de água é conhecido como “*lower heating value*” (LHV – poder calorífico inferior), enquanto que para água líquida, $\Delta \bar{h}_f$ é conhecido como “*higher heating value*” (HHV – poder calorífico superior). A diferença entre eles (44,01 kJ/mol) é a entalpia molar de vaporização da água (calor latente molar).

Por definição, a máxima energia elétrica disponível é igual à mudança na energia livre de Gibbs [11]. Desta forma, a eficiência máxima possível para a FC pode ser definida como:

$$\eta_{FC_{max}} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \quad (I.9)$$

Este valor máximo é conhecido como a eficiência termodinâmica. A Tabela I.1 apresenta alguns valores para $\eta_{FC_{max}}$, relativo ao HHV, juntamente com a tensão reversível, E_r , calculada a partir da Equação I.7.

Tabela I.1 – Valores de $\Delta\bar{h}_f$, E_r e $\eta_{FC_{max}}$ (ref. HHV) [15]

Estado da água	T (°C)	$\Delta\bar{g}_f$ (kJ/mol)	E_r (V)	$\eta_{FC_{max}}$
Líquido	25	-237,2	1,23	83%
Líquido	80	-228,2	1,18	80%
Gasoso	100	-225,3	1,17	79%
Gasoso	200	-220,4	1,14	77%
Gasoso	400	-210,3	1,09	74%
Gasoso	600	-199,6	1,04	70%

A Figura I.3 mostra como a eficiência máxima varia com a temperatura [15]. Embora o gráfico mostre que a eficiência máxima é maior em temperaturas menores, as quedas de tensão são sempre menores em temperaturas mais elevadas, como detalhado no Capítulo 3, Seção 3.1. Assim, na prática, o rendimento é maior para temperaturas mais elevadas.

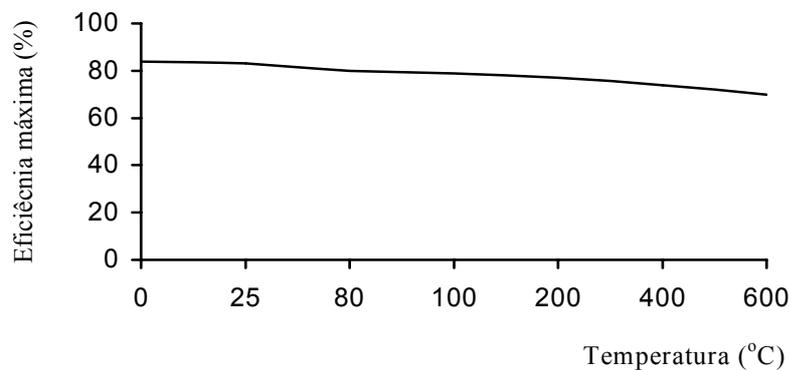


Figura I.3 – Eficiência máxima de células de combustível à pressão padrão (100 kPa), referida ao HHV

Dos dados apresentados na Tabela I.1, percebe-se que há uma relação entre a eficiência máxima e a tensão reversível da célula. Da mesma forma, a eficiência da célula

pode ser relacionada com a sua tensão de operação. A partir da Equação I.7, se toda a energia do hidrogênio fosse transformada em energia elétrica, a tensão reversível seria dada por:

$$E_r = \frac{-\Delta \bar{h}_f}{2 \cdot F} \quad (\text{I.10})$$

Utilizando os valores apresentados para a mudança na entalpia de formação molar do hidrogênio, obtém-se, para a tensão reversível máxima:

$$E_r = \begin{cases} 1,48 \text{ V; usando o HHV} \\ 1,25 \text{ V; usando o LHV} \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Assim, a eficiência da FC pode ser definida pela razão entre a sua tensão real de saída e a tensão reversível para o sistema ideal, calculada a partir da Equação I.10:

$$\eta_{FC} = \frac{V_{FC}}{E_r} \quad (\text{I.12})$$

Para a completa definição do rendimento da FC, deve-se, ainda, analisar a utilização do combustível na operação da célula. Na prática, nem todo o combustível que entra na célula é utilizado; alguma parte sempre passará através da membrana da célula sem reagir. Um coeficiente de utilização do combustível, μ_f , pode ser definido como a relação entre a massa de combustível que participa das reações e a massa de combustível que entra na célula:

$$\mu_f = \frac{(m_{H_2})_{\text{reag}}}{(m_{H_2})_{\text{in}}} \quad (\text{I.13})$$

Assim, utilizando o valor de E_r referente ao HHV, a eficiência das células de combustível do tipo PEM, pode ser definida como:

$$\eta_{FC} = \mu_f \frac{V_{FC}}{1,48} \quad (\text{I.14})$$

Para células de combustível que operam sem re-circulação de hidrogênio (*dead-ended*), o valor do coeficiente de utilização de hidrogênio, μ_f , normalmente situa-se na faixa dos 95%. Utilizando-se a relação definida pela Equação I.14, o rendimento da célula pode ser obtido através da medição da tensão em seus terminais.

3.2.3 Eficiência do Sistema de Geração

Um sistema de geração de energia elétrica utilizando PEMFC pode ser composto de vários elementos, tais como: ventiladores, bombas, compressores, válvulas solenóides, umidificadores e controladores eletrônicos, além da própria pilha. Neste caso, a eficiência total do sistema deve levar em consideração estes equipamentos auxiliares, que utilizam parte da energia gerada pelas células para o seu funcionamento. A Figura I.3 apresenta, de forma esquemática, esta situação.

Uma vez obtida a eficiência da FC (Equação I.14), a potência equivalente de entrada da FC (potência dos gases reagentes) pode ser relacionada com a potência elétrica gerada pela célula, pela equação:

$$P_{in} = \frac{P_{el}}{\eta_{FC}} \quad (I.15)$$

na qual:

P_{el} : potência elétrica total de saída da PEMFC (carga + equipamentos auxiliares);

P_{in} : potência equivalente de entrada da célula.

Considerando-se apenas a potência elétrica utilizada pela carga (P_{carga}), o rendimento do sistema de geração é calculado como:

$$\eta_{sist} = \frac{P_{carga}}{P_{in}} = \eta_{FC} \cdot \frac{P_{carga}}{P_{el}} \quad (I.16)$$

Na determinação da Equação I.16, foi considerado apenas o aproveitamento da potência elétrica gerada pela célula. Em sistemas combinados de calor e potência (CHP –

Combined Heat and Power), o aproveitamento do calor gerado fará com que o rendimento resultante aumente, dependendo da quantidade de calor utilizada.

EQUAÇÕES DO MODELO DA PEMFC

Este anexo apresenta a modelagem eletroquímica dinâmica da PEMFC, para a obtenção da tensão de saída da célula para determinadas condições de operação.

Há três irreversibilidades principais na operação da PEMFC [15], que determinam uma diminuição na tensão de circuito aberto. Assim, considerando estas perdas, a tensão de saída pode ser definida como o resultado da seguinte expressão[10, 15]:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{\text{ohmico}} - V_{con} \quad (\text{II.1})$$

no qual E_{Nernst} é o potencial termodinâmico da célula e representa sua tensão de circuito aberto; V_{act} é a queda de tensão devido à ativação (sobrepotencial de ativação) do anodo e do catodo, uma medida da queda de tensão associada com os eletrodos; V_{ohmico} é a queda de tensão ôhmica (sobrepotencial ôhmico), uma medida das perdas ôhmicas associadas com a condução dos prótons no eletrólito sólido e resistências eletrônicas internas; e V_{con} representa a queda de tensão resultante da concentração ou transporte de massa de oxigênio e hidrogênio (sobrepotencial de concentração).

Há, ainda, uma redução na tensão útil da célula devido à circulação de correntes internamente pela membrana e à passagem direta de combustível no eletrólito sem participar das reações.

O primeiro termo da Equação II.1 representa a tensão de operação da FC sem carga, enquanto que os três últimos termos representam quedas de tensão resultando na tensão útil da célula, V_{FC} , para uma determinada corrente de operação. Cada um dos termos da Equação II.1 está discutido e modelado separadamente nas Seções a seguir.

II.1 Tensão de Circuito Aberto

É demonstrado no Anexo I, Seção I.2.1 (Equação I.7) que o valor para a tensão reversível de circuito aberto de uma PEMFC é dado por:

$$E_r = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (\text{II.2})$$

A mudança na energia livre de Gibbs, em uma reação química, varia com a temperatura, a pressão e a concentração dos reagentes. Conseqüentemente, estas variações fazem com que a tensão de circuito aberto da PEMFC seja afetada por estes fatores.

Para a reação química de uma PEMFC típica, a mudança na energia livre de Gibbs é dada por [15]:

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{H}_2} \cdot a_{\text{O}_2}^{1/2}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (\text{II.3})$$

na qual:

$\Delta \bar{g}_f^0$: é a mudança na energia livre de Gibbs de formação molar, à pressão padrão (100 kPa) e temperatura padrão (25°C);

T é a temperatura de operação da célula (K); e

a: é a atividade dos reagentes e do produto.

Substituindo-se o valor de $\Delta \bar{g}_f^0$, dado pela Equação II.3, na Equação I.7 do Anexo I, e acrescentado-se um termo extra para levar em conta as mudanças na temperatura em relação à temperatura de referência (298,15 K) [10, 11], obtém-se:

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{-\Delta \bar{g}_f^0}{2 \cdot F} + \Delta \bar{s}_f \cdot (T - T_{\text{ref}}) \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{H}_2} \cdot a_{\text{O}_2}^{1/2}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (\text{II.4})$$

no qual $\Delta \bar{s}_f$ é a mudança na entropia de formação molar ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Como esperado, a Equação II.4 mostra que, aumentando-se a atividade dos reagentes, aumenta a tensão de circuito aberto. A Equação II.4 é uma versão modificada da equação de Nernst e o seu resultado, a tensão reversível da célula (E_{Nernst}), é o potencial da célula obtido em equilíbrio termodinâmico em circuito aberto, para dadas temperatura e pressão.

Substituindo-se as relações para as atividades de produtos e reagentes e usando os valores padrões, obtém-se a equação para calcular a tensão de circuito aberto da FC:

$$E_{\text{Nernst}} = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \left[\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \cdot \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (\text{II.5})$$

na qual P_{H_2} e P_{O_2} representam as pressões parciais do hidrogênio e do oxigênio (atm), respectivamente.

II.2 Potencial de Ativação

As perdas por ativação são causadas pela redução na velocidade das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos. Uma proporção da tensão gerada é perdida nas reações químicas que transferem os elétrons de/ou para o eletrodo. Para o cálculo desta queda de tensão, são apresentadas na literatura, algumas equações empíricas [13 - 15], semi-empíricas [11, 12] e analíticas [10]. Neste trabalho a equação proposta por Mann et al [11] é utilizada, onde o potencial de ativação, incluindo anodo e catodo, pode ser calculado por:

$$V_{\text{act}} = -\left[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(c_{\text{O}_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i_{\text{FC}}) \right] \quad (\text{II.6})$$

no qual:

i_{FC} : é a corrente de operação da célula (A);

c_{O_2} : é a concentração de oxigênio no catodo (mol/cm^3); e

ξ_i ($i = 1...4$): são coeficientes paramétricos que possuem diferentes valores para cada modelo de célula. Estes valores são baseados em equações teóricas com fundamentos de cinética, termodinâmica e eletroquímica. Valores genéricos para estes coeficientes são apresentados na literatura e utilizados nesta dissertação [11]. O Anexo III apresenta as definições matemáticas para os coeficientes ξ_i .

A concentração de oxigênio está relacionada com a pressão parcial e com a temperatura por:

$$c_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{O}_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{-498}{T+273,15}}} \quad (\text{II.7})$$

II.3 Potencial Ôhmico

A polarização ôhmica resulta da resistência à transferência de elétrons nas placas coletoras e eletrodos de grafite mais a resistência à transferência de prótons na membrana sólida. A resistência à transferência de elétrons é aproximadamente constante dentro da faixa de temperatura de trabalho da célula, normalmente entre 50 e 90°C. Para a definição da resistência da membrana, uma expressão geral para a resistividade foi definida para incluir todos os parâmetros importantes da membrana [11]. A resistência equivalente da membrana é calculada por:

$$R_M = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (\text{II.8})$$

na qual:

ρ_M : resistividade específica da membrana para o fluxo de prótons ($\Omega \cdot \text{cm}$);

A: área ativa da célula (cm^2); e

l: espessura da membrana (cm).

Membranas do tipo Nafion[®], uma marca registrada da empresa Dupont, são largamente utilizadas em PEMFC e são as membranas consideradas nesta dissertação. A seguinte expressão numérica para a resistividade de membranas Nafion é utilizada:

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left[1 + 0,03 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) + 0,062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\psi - 0,634 - 3 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4,18 \cdot \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II.9})$$

no qual:

181,6/($\psi-0,634$): resistividade específica ($\Omega \cdot \text{cm}$) com corrente igual a zero e temperatura de 30°C.

O termo exponencial no denominador é o fator de correção de temperatura, para a célula operando em temperaturas diferentes de 30°C. O parâmetro ψ é considerado um fator ajustável, com um valor máximo possível de 23. Este parâmetro é influenciado pelo procedimento de preparação da membrana e é uma função da umidade relativa e razão estequiométrica do gás do anodo. Pode ter um valor da ordem de 14 sob condições ideais de 100% de umidade relativa e há valores reportados na ordem de 22 e 23 sobre condições supersaturadas.

Utilizando-se as Equações II.8 e II.9, a seguinte expressão determina o sobrepotencial ôhmico:

$$V_{\text{ôhmico}} = i_{\text{FC}} \cdot (R_{\text{M}} + R_{\text{C}}) \quad (\text{II.10})$$

na qual R_{C} representa a resistência dos contatos ao fluxo de elétrons (Ω).

II.4 Potencial de Concentração ou Transporte de Massa

O transporte de massa afeta as concentrações de hidrogênio e oxigênio, o que, por sua vez, causa uma diminuição das pressões parciais destes gases. A redução na pressão de oxigênio e hidrogênio depende da corrente elétrica e das características físicas do sistema.

Para determinar uma equação para o cálculo desta queda de tensão, define-se uma densidade de corrente máxima, J_{max} , na qual o combustível está sendo usado a uma taxa igual à máxima velocidade de fornecimento. A densidade de corrente não pode ultrapassar este limite por que o combustível não pode ser fornecido à uma taxa maior. Valores típicos para J_{max} situam-se na faixa de 1000 a 1500 mA/cm² [15].

Assim, a queda de tensão devido ao transporte de massa pode ser calculada através da relação:

$$V_{\text{con}} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}} \right) \quad (\text{II.11})$$

sendo:

B: constante que depende da FC e seu estado de operação (V); e

J: representa a densidade de corrente atual da célula (A/cm²).

O valor teórico para B é determinado por:

$$B = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \quad (\text{II.12})$$

Valores práticos encontrados para B normalmente situam-se na faixa de 0,016 a 0,05 V [20].

II.5 Correntes Internas e Passagem Direta de Combustível [15]

Embora o eletrólito de uma FC seja escolhido por sua capacidade para condução iônica, ele sempre poderá suportar pequenas porções de condução eletrônica. Um equivalente a estas correntes internas é o cruzamento de combustível. Este processo ocorre quando alguma porção de hidrogênio se difunde do catodo para o anodo, reagindo diretamente com o oxigênio e não produzindo nenhuma corrente externa. Estes efeitos causam uma redução adicional na tensão, mesmo em circuito aberto. Para a sua modelagem, considera-se uma densidade de corrente constante (J_n), da ordem de alguns poucos mA/cm². Para uma PEM, este valor pode ser estimado em 2 a 3 mA/cm². Esta densidade de corrente é, então, adicionada à densidade de corrente da célula para a determinação da tensão de saída.

II.6 Geração de Energia Elétrica

Um sistema genérico de geração de energia elétrica utilizando uma pilha de PEMFC pode ser representado conforme o diagrama de blocos simplificado da Figura II.1. A Figura II.1 apresenta a pilha destacando a alimentação de hidrogênio, de oxigênio (ou ar) para as reações e de ar (ou água) para o resfriamento, assim como os seus produtos de saída, água quente e eletricidade.

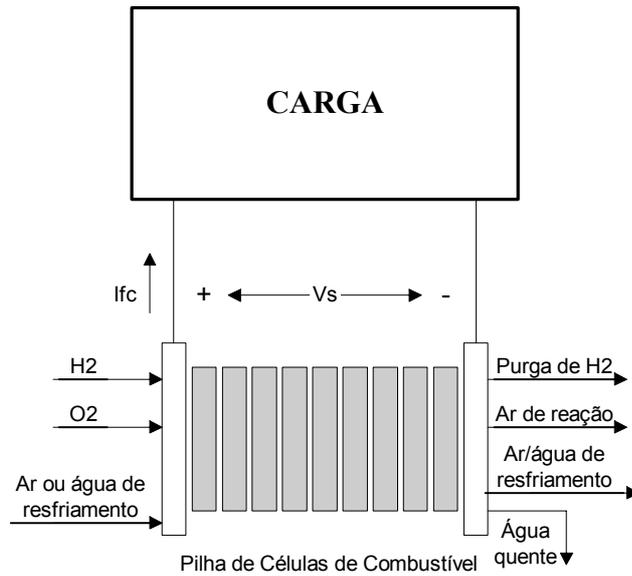


Figura II.1 – Diagrama de blocos de um sistema de geração de energia elétrica

A densidade de corrente das células, J (A/cm^2), é definida pela expressão:

$$J = \frac{i_{FC}}{A} \quad (II.13)$$

A potência elétrica instantânea fornecida pela pilha à carga pode ser determinada pela equação:

$$P_S = V_S \cdot i_{FC} \quad (II.14)$$

no qual:

V_S : é a tensão de saída da pilha (V); e

P_S : é a potência elétrica gerada (W).

A tensão da pilha é o somatório das tensões individuais de cada célula. Neste modelo, é assumido que todas as células possuem a mesma tensão média em seus terminais. Desta forma:

$$V_S = n \cdot V_{FC} \tag{II.15}$$

sendo n o número de células que compõem a pilha.

PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO POTENCIAL DE ATIVAÇÃO

Os parâmetros ξ_i , utilizados no cálculo do sobrepotencial de ativação são determinados, matematicamente por [11]:

$$\xi_1 = -\frac{\Delta G_a}{2 \cdot F} - \frac{\Delta G_c}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \quad (\text{III.1})$$

$$\xi_2 = \frac{R}{\alpha_c \cdot F} \cdot \ln \left[F \cdot A \cdot k_c^0 \cdot (c_{\text{H}_2})^{(1-\alpha_c)} \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}})^{\alpha_c} \right] \quad (\text{III.2})$$

$$\xi_3 = \frac{R \cdot (1 - \alpha_c)}{\alpha_c \cdot F} \quad (\text{III.3})$$

$$\xi_4 = -\left(\frac{R}{2 \cdot F} + \frac{R}{\alpha_c \cdot F} \right) \quad (\text{III.4})$$

no qual:

ΔG_a : energia livre de ativação para o estado padrão (J/mol), referida ao anodo;

ΔG_c : energia livre de ativação para o estado padrão (J/mol), referida ao catodo;

α_c : parâmetro da atividade química para o catodo;

F: constante de Faraday;

R: constante universal dos gases;

A: área ativa da célula (cm²);

k_c^0 : constante de taxa intrínseca para a reação do catodo (cm/s);

c_{H_2} : concentração de hidrogênio (mol/cm³);

c_{H_2O} : concentração de água (mol/cm³);

Baseado em medições de células em operação e cálculos destes coeficientes para as células Mark IV e Mark V, fabricadas pela empresa canadense Ballard, os seguintes valores genéricos são propostos para os coeficientes paramétricos e são utilizados nesta dissertação [11]:

$$\xi_1 = -0,948(\pm 0,004)$$

$$\xi_2 = 0,00286 + 0,0002 \cdot \ln A + 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot \ln c_{H_2}$$

$$\xi_3 = (7,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$$

$$\xi_4 = -(1,93 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$$

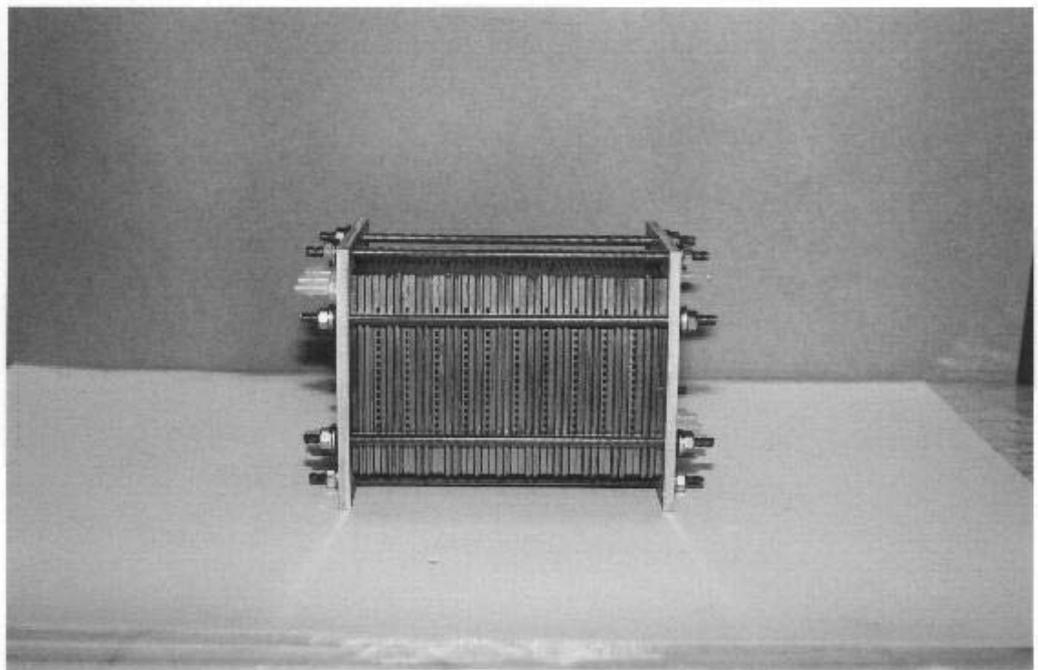
MANUAL DA PILHA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Este anexo apresenta as páginas do manual da pilha de células de combustível do tipo PEM de 500 Watts da fabricante BCS Technology, Inc. [17]. No manual são encontradas características da mesma como lista das partes que formam a pilha, diagrama de conexão, tabela relacionando a estequiometria do ar e do hidrogênio com a corrente, linhas gerais para operação da FC e as curvas de polarização e de potência da mesma.

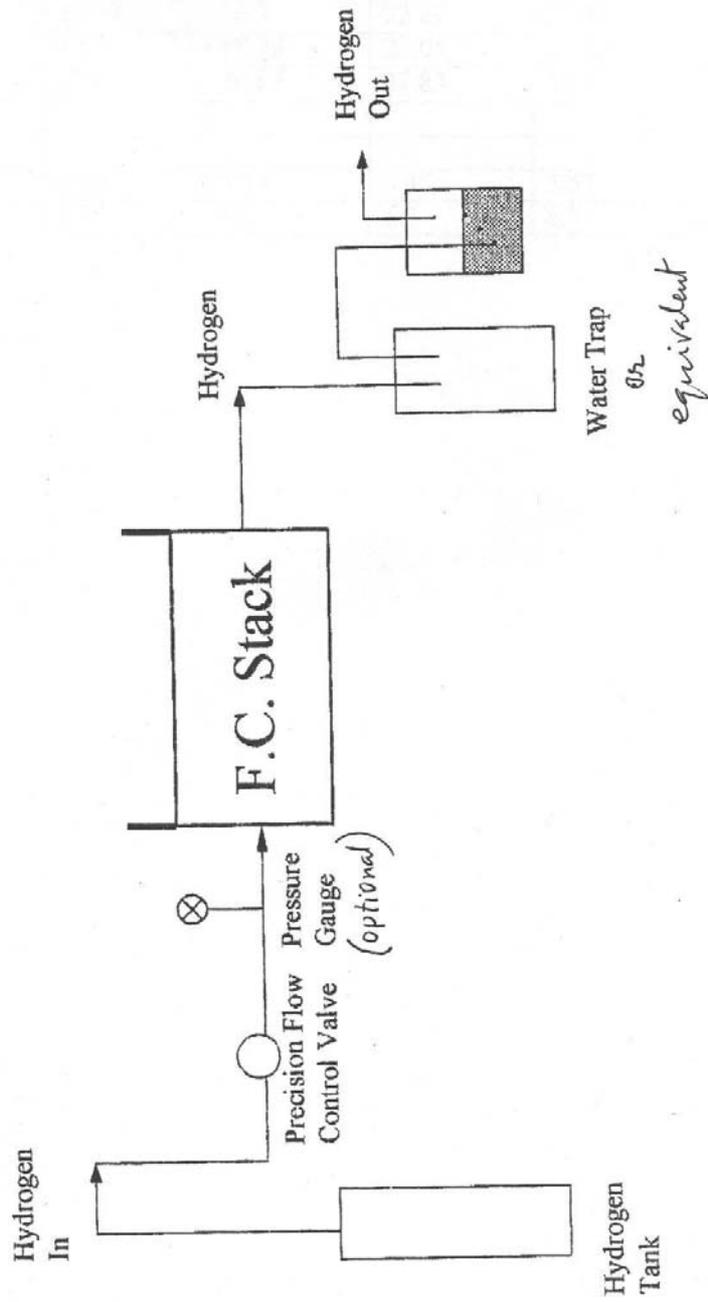
Parts List

500W stack

- One fuel cell stack
- 4 cooling fans (two sets)
- One pressure tubing to be attached to the air exit
- 2 connecting bolts with washers attached to two terminals of the stack
- One booklet containing all instructions
- One piece of tubing (≈ 6.75 " long) to be connected to complete the waterline



Connection Diagram of Fuel Cell Stack



Stoichiometry chart for air and hydrogen flows (liters/min) for 32-cell 500W stack

	Current (A)					
Air stoich	5	10	15	20	25	30
2.0	5.57	11.15	16.7	22.27	27.84	33.41
2.25	6.27	12.54	18.79	25.05	31.32	37.58
2.5	6.96	13.92	20.87	27.83	34.8	42.14
H stoich						
1.0	1.11	2.23	3.34	4.45	5.57	6.68
1.2	1.3	2.7	4.0	5.3	6.7	8.0

BCS Technology, Inc.
2812 Finfeather Road, Bryan, Texas 77801, USA
Tel. 979-823-7138 Fax: 979-823-8475
E-Mail: bcstech@txcyber.com

Guidelines for Operation of Forced-Flow Fuel Cell Stack (#64-32-16R)

(Please read this instruction completely before operating the stack)

There are 32 cells in this stack. This is a self-humidified stack. This stack does not require any humidification of reactants.

There are several air-cooling cells in this stack. Air enters through these cells during cooling by fans. There are no fuel cells in the air-cooling cells.

This stack has been extensively tested for performance and gas leaks within the stack specifications at the laboratory of BCS Technology, Inc. It has been found to be running satisfactorily. It is **not** necessary to test for leaks to start operating this stack. We have collected the representative data. The performance should improve with time for some time.

This stack will work with hydrogen/air, reformat/air.

For measurements of cell voltages of individual cells, the entire stack can be divided into groups of five cells. There are white markings placed after every five cells. The customer will require meters for measuring voltages of the stack.

1. Place the stack on two pieces of wood or plastic of the same height. The stack orientation would be such that one can read the lettering properly.
2. For monitoring stack temperature, insert a thermocouple to one of the cooling cells.
3. Stack can be cooled with cooling fans or passing distilled water through channels marked "cooling water in" and "cooling water out". Four cooling fans are provided with the stack. Mount the cooling fans on the two sides of the stack, and connect them to a DC power supply capable of providing up to 12V. For water cooling, a water pump and a heat exchanger are required.
4. Cooling is needed above 60-65°C. While cooling with fans, start the cooling at about 45-50°C. This will give time for the cooling action to start. (In the absence of a temperature-measuring device, start cooling while beginning stack operation). While cooling with water, start cooling at 55-60°C.
5. Keep inlet pressure of hydrogen within 5 psi or below.
6. The stack is started initially at the room temperature. For starting subsequently, it is not necessary to bring down the stack to the room temperature.
7. Start-up procedure: Hydrogen/Air. Air should be filtered of any particles such as dust, grease, etc.

Make fuel cell connections to a hydrogen source through a **precision flow control** valve

(please see the connection diagram). A precision flow control valve is one, which is able to control precisely the hydrogen flow. Without a fine control valve, it may be difficult to pass the required amount of hydrogen to the fuel cell. (Alternatively, one can experiment with whatever control valve one has, and see if that particular valve is able to control the required hydrogen flow.) If one can set the flow in such a way that about 5-10 bubbles exit in every second, that will be sufficient to run the stack.

A bubbler can be used to see the hydrogen flow. When hydrogen is stopped, or the amount of hydrogen is insufficient at a certain current, water can be sucked into the stack. This should be avoided. No damage will occur for a momentary entry of water into the stack. If the water stays for a longer time, the cells can get damaged. **An intermediate trap for water must be placed before the water bubbler.**

If water trap is not immediately available, the end of the tube coming out of the hydrogen outlet can be submerged in water in a beaker or glass to see the hydrogen bubbles. However, the end of the tube must not be kept inside the water all the time, only when it is necessary to check the hydrogen flow. When the stack is operating, it is advisable to remove the end of the tube from the water. It is a safeguard to prevent any unintentional transfer of water into the stack.

Initially purge the both sides of the stack to remove accumulated water in the channels. To accomplish this, do the following: Pass air through the air channels at the rate of 10-15 liter/min from the top for about 5-10 seconds. Then do the same with the hydrogen channels also passing from the top. **Make sure in both cases, the outlets are not blocked. (Keep inlet air pressure within 10 psi).**

For stack operation, air stoichiometry is about 2 to 2.5. Hydrogen stoichiometry is about 1.1 to 1.2. Pass sufficient reactants for about 10A current. The OCV should be in the range 28-30V.

Pressure on the air-side can be applied using a thin tube (supplied with the stack) connected at the air outlet. It will apply up to about 10 psi pressure at full power. Do not apply pressure when using oxygen as the reactant.

No pressure is required at the hydrogen side.

Draw current in the range 5-10A. Operate for a few minutes until the temperature starts increasing. Measure voltages of all the quarters of the stack. If some cells are very low, momentarily increase the flows to remove any water blockages. At this point reactant flows and currents output can be increased.

Hydrogen/Oxygen. Operate stack at the atmospheric pressure. Do not pressurize stack while using oxygen. This is for safety reasons. This stack is preferably operated with hydrogen/air.

It is advisable to operate stack at a lower current (5-15 A) initially until the operation of the

- stack is understood.
9. Do not operate stack unattended until its characteristics have been understood.
 10. **Stack cooling.** Up to about 150-200W of power, the stack can be cooled using the cooling fans provided with the stack. To run the fans, connect them to a DC power supply.

Above 200W, pass **distilled water** through the cooling loop of the stack. The cooling pump is not supplied. Maintain water flow about 0.5 to 2 liter/minute. Both air-cooling and water-cooling can be done at the same time.

It is not necessary to cool the stack to room temperature. The stack can be left to cool on its own at 50-55°C.

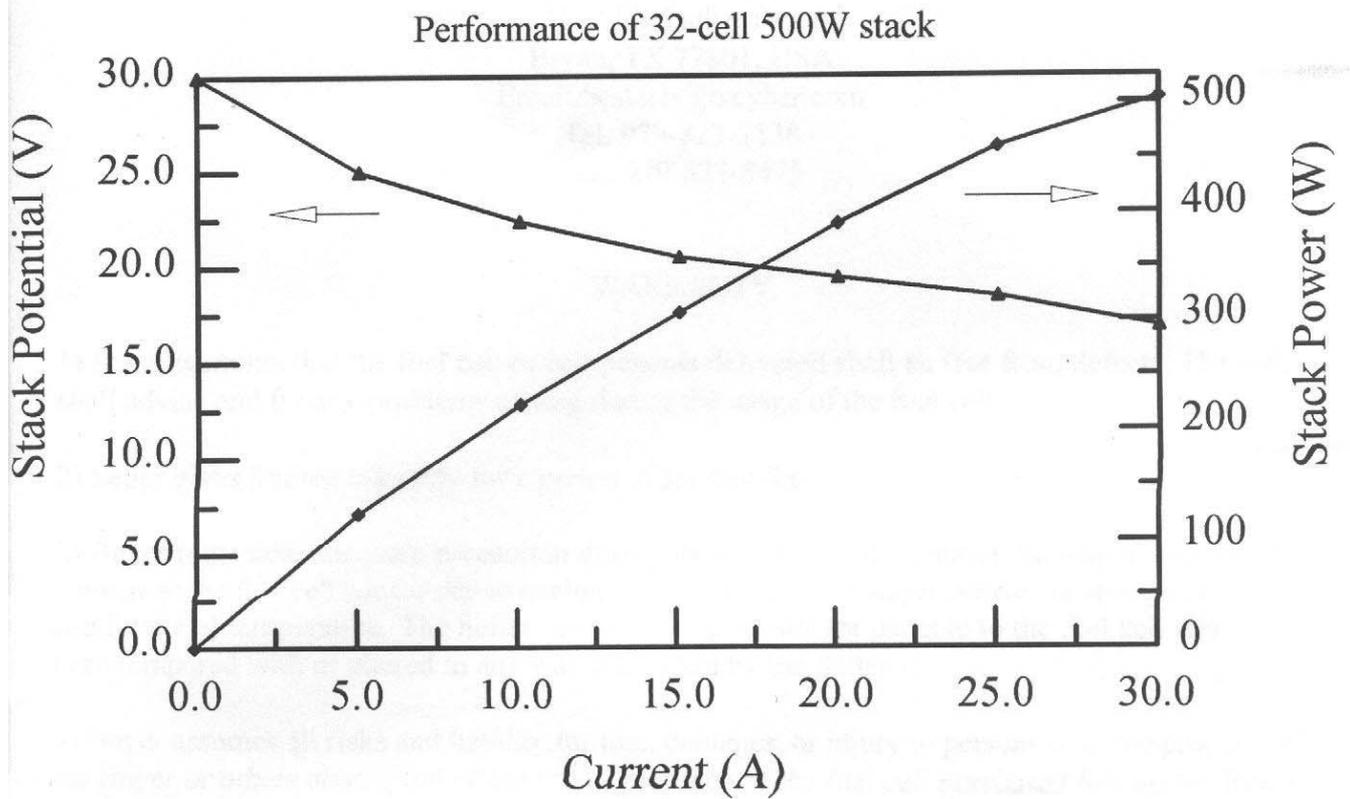
11. To stop operation, stop air and hydrogen flows. Drain power from the stack and bring down the voltage to a low value.
12. As the final step, it is also recommended that both sides of the stack are purged again as done under step 7.

Other points

1. When moving or carrying the stack, always hold on to the body of the stack and not to the fittings or the guiding rods.
2. The inlet air should be always filtered to remove any particles, oil or grease.
3. Avoid using any valves or items using oil or grease. All valves should be opened and checked for the presence of grease.
4. Always protect the 2 plastic stack-guiding rods from breakage.
5. When collecting water from the stack, take care that the drainage tube does not touch the water level. This is to avoid back suction of water into the stack. This could be damaging for the cells.
6. Take personal care not to get electrical shocks from the stack. After the running the stack, always bring voltage to zero by drawing power from the stack.

Stack Specifications

Number of cells: 32, Electrode area: 64 cm², Reactants: H₂/air, reformat/air. Torque on bolts: 30 inch.pound, Power output: 500 W. Max operating temperature: 65°C. Operating pressure: 1-10 psi air, 0-3 psi hydrogen.



BCS Technology, Inc.
 Reactants: Hydrogen/air
 T: 60-65°C
 P: air 0-10 psi; Hydrogen 0-1 psi
 Air stoich: 2.0-2.25
 Hydrogen stoich: 1.1-1.2

BCS Technology, Inc.

2812 Finfeather Road

Bryan, TX 77801, USA

Email:bcstech@txcyber.com

Tel. 979-823-7138

Fax: 979-823-8475

WARRANTY

- 1) Seller warrants that the fuel cell or components delivered shall be free from defects. The seller shall advise and fix any problems arising during the usage of the fuel cell.
- 2) Seller gives limited warranty for a period of six months.
- 3) Buyer must take adequate precaution during its use. The Seller cannot be responsible for any damage to the fuel cell caused due to negligence, accident, abuse, improper care or storage, abnormal conditions of temperature. The Seller cannot be responsible for damage to the fuel cell which has been tempered with or altered in any way other than by the Seller.
- 4) Buyer assumes all risks and liability for loss, damages, or injury to persons or to the property of the Buyer or others arising out of the use or presence of the fuel cell purchased hereunder. Buyer agrees to indemnify and hold harmless Seller against any liability, damages, losses, costs, and expenses in connection with any suit or claim, including but not limited to, any loss of use, loss of profits, damage, or injuries to person or property arising out of or relating to any use of the fuel cell purchased by Buyer herein, whether such claim is made by Buyer, Buyer's customers, or other third party.

PROGRAMA MATLAB

Este anexo apresenta as linhas de programação feita no programa computacional Matlab para a modelagem eletroquímica dinâmica de células de combustível do tipo PEM. O programa mostra o modelo da célula SR-12, de 500 W, da empresa Avista.

```

%%%%%%%%%%
%      FUEL CELL SIMULATION                               %
%      FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA                 %
%      ELECTRICAL ENGINEERING GRADUATION PROGRAM        %
%                                                       %
%      BY: Diego Dias Marquezini                        %
%      Felix Alberto Farret                             %
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
%      VARIABLES                                         %
%%%%%%%%%%
close all;
clear;

Ts=0.001; %0.001 %simulation time step
Tmax=6; %6 %simulation total time
kmax=6000; %Tmax/Ts; %maximum number of iterations

n=48; %32 %number of cells
F=96487; %constant of Faraday
uf=0.95; %fuel utilization coefficient
R=8.314; %universal constant of gases

T=60+273; %25, 35, 40, 60, 35, 80 %cell operating temperature (K)
PH2=1.3; %hydrogen partial pressure (atm)
PO2=0.26; %oxygen partial pressure (atm)

area=62.5; %50, 62.5, 64, 200, 320 %cell active area (cm²)

```

```

B=0.2; %parameter used to calculate the concentration voltage drop (V)
L=0.0250; %0.09, 0.0250 1.2, 0.0178; %membrane thickness (cm)
Phi=16; %23; %parameter used to calculate the membrabe resistance
e1=-0.948; %parameter Epsilon1, used to calculte the activation voltage drop
e3=7.6E-5; %7.6E-5 %parameter Epsilon3, used to calculate the activation voltage drop
e4=-1.93E-4; %-1.93E-4 %parameter Epsilon4, used to calculate the activation voltage drop
Ca=0.0072 %0.5; %equivalent dynamic capacitor (F)
Rc=2e-3; %0.3E-3 %contact resistance (ohm)
Jn=22e-3; %internal current density (A/cm2)
Jmax=0.672 %0.469; %maximum current density (A/cm2)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      INICIALIZATION                                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

J(1)=0; %current density (J) in the instant k=1 it is zero
k=1;
Vd(1)=0; %dynamic voltage (Vd) in the instant k=1 it is zero
Vd1(1)=0;
Vd2(1)=0;
Vd3(1)=0;
Vd4(1)=0;

```

```

t= zeros(1,kmax);
Iint= zeros(1,kmax);
J= zeros(1,kmax);
Ifc= zeros(1,kmax);
Eernst= zeros(1,kmax);
Vohmic= zeros(1,kmax);
Vact= zeros(1,kmax);
Vcon= zeros(1,kmax);
Vd= zeros(1,kmax);
Vs= zeros(1,kmax);
Vfc= zeros(1,kmax);
rend= zeros(1,kmax);
Power= zeros(1,kmax);

```

```

dynamics=1; %=1 -> dynamic simulation
           %=0 -> simulation of the polarization curve

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Inicia Barra de Progressão                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

wb = waitbar(0,'Simulating the Fuel Cell...');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      MAIN PROGRAM                                           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
while k < kmax
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      SIMULATION TIME                                                    %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
t(k)=k*Ts;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      CURRENT CALCULATION                                                %  
% for the polarization curve, the current density is defined on          %  
% the program, with increments of 0.001 A/cm2                            %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Iint(k)=Jn*area; %internal current
```

```
if dynamics==0
```

```
  if k>1
```

```
    J(k)=J(k-1)+0.001; %updating of the current density J
```

```
    if J(k)>=Jmax
```

```
      J(k)=Jmax-0.0001; %last updating of J tends the subtraction of 1/10 of updating
```

```
    end;
```

```
  end;
```

```
  Ifc(k)=(J(k)*area)+Iint(k);
```

```
  else %dynamics==1
```

```
% I(k)=0+Iint(k); %to do Ifc to depend of Vfc and load (Vfc/RL)
```

```
% Ifc(k)=I(k);
```

```
% if t(k)>=200 %increased time of 20 to 30, to show the stabilization
```

```
% %load resistance very high
```

```
% I(k)=14.808+Iint(k); %change the load current
```

```
% Ifc(k)=I(k);
```

```
% end;
```

```
% if t(k)>=2
```

```
% Vs1(1)=39;
```

```
% r=2;
```

```
% Ifc(k+1)=Vs1(k)./r;
```

```
% end;
```

```
% if t(k)>=325
```

```
% I(k)=0+Iint(k);
```

```
% Ifc(k)=I(k);
```

```
% end;
```

```
J(k)=Ifc(k)/area;
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

% NERNST POTENTIAL %
%%%%%%%%%

aux1=log(PH2)+0.5*log(PO2);
aux2=4.308E-5*T*aux1;
aux3=8.54E-4*(T-298.15);
aux4=1.229-aux3;

Enernst(k)=n*(aux4+aux2);

%%%%%%%%%
% OHMIC VOLTAGE DROP %
%%%%%%%%%

n1=1+0.03*(Ifc(k)/area);
n2=0.062*((T/303)^2)*((Ifc(k)/area)^2.5);
num=181.6*(n1+n2);

d1=Phi-0.634-3*(Ifc(k)/area);
d2=4.18*(T-303)/T;
den=d1*exp(d2);

Rm=num/den;
Re=(Rm*L)/area;

Vohmic(k)=-n*(Ifc(k)*(Re+Rc));

%%%%%%%%%
% HYDROGEN CONCENTRATION %
%%%%%%%%%

ax1=exp(-498/T);
ax2=5.08E6*ax1;
CH2=PH2/ax2;

%%%%%%%%%
% OXYGEN CONCENTRATION %
%%%%%%%%%

ay1=exp(-498/T);
ay2=5.08E6*ay1;
CO2=PO2/ay2;

%%%%%%%%%
% ACTIVATION VOLTAGE DROP %
%%%%%%%%%

A1=4.3E-5*log(CH2);
e2=0.00286+(0.0002*log(area))+A1;

```

A2=e1+e2*T+(e3*T*log(CO2));

if Ifc(k)==0
    Vact(k)=0;
else
    Vact(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ifc(k))));
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      CONCENTRATION VOLTAGE DROP      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

B1=J(k)/Jmax;
B2=1-B1;

if J(k)>=Jmax
    Vcon(k)=0;
else
    Vcon(k)=n*(B*log(B2));
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      CELL DYNAMIC VOLTAGE      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if dynamics==1

    Vdin(k)=Vact(k)+Vcon(k);

    if Ifc(k)>=0.01
        Ra(k)=abs(Vdin(k)/Ifc(k));
    else
        Ra(k)=0.887; %1;
    end;

    Tal(k)=Ca*Ra(k);

    AA=-1/Tal(k);          %d(Vd)/dt=(1/C)*Ifc-(1/Tal)*Vd
    BB=1/Ca;
    CC=1;
    DD=0;

    sys=ss(AA,BB,CC,DD);  %creates a continuous-time state space model
    sysd=c2d(sys,Ts);     %converts the continuous-time LTI model to a discrete-time
model with sample time Ts

    Vd(k+1)=sysd.a*Vd(k)+sysd.b*Ifc(k); %the subsequent updating of Vd is made by the
vector 'a' of matrix multiplied current Vd, more the vector 'b' of matrix multiplied current Ifc

```

%%%

dVdin(k+1)=(Vd(k+1)-Vd(k))/Ts; %derivada da tensão dinâmica

Ica(k)=Ca*dVdin(k); %corrente do capacitor

Ira(k)=Ifc(k)-Ica(k); %corrente das perdas de tensão

Jra(k)=Ira(k)/area; %densidade de corrente das perdas de tensão

Vact1(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ira(k)))); %tensão de ativação corrigido

B3=Jra(k)/Jmax; %parâmetros da tensão de concentração corrigido

B4=1-B3;

if J(k)>=Jmax

 Vcon(k)=0;

else

 Vcon1(k)=n*(B*log(B4)); %tensão de concentração corrigido

end;

if dynamics==1

Vdin1(k)=Vact1(k)+Vcon1(k); %tensão dinâmica corrigida

if Ifc(k)>=0.01

 Ra1(k)=abs(Vdin1(k)/Ira(k));

else

 Ra1(k)=0.887; %1;

end;

Ta1(k)=Ca*Ra1(k);

AA1=-1/Ta1(k); %d(Vd)/dt=(1/C)*Ifc-(1/Ta1)*Vd

BB1=1/Ca;

CC1=1;

DD1=0;

sys1=ss(AA1,BB1,CC1,DD1); %creates a continuous-time state space model

sysd1=c2d(sys1,Ts); %converts the continuous-time LTI model to a discrete-time model with sample time Ts

Vd1(k+1)=sysd1.a*Vd1(k)+sysd1.b*Ira(k); %the subsequent updating of Vd is made by the vector 'a' of matrix

end;

```

else
    dVdin(k+1)=(Vd(k+1)-Vd(k))/Ts;

    Ica(k)=Ca*dVdin(k);

    Ira(k)=Ifc(k)-Ica(k);

    Jra(k)=Ira(k)/area;

    Vact1(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ira(k))));

    B3=Jra(k)/Jmax;
    B4=1-B3;

    if J(k)>=Jmax
        Vcon(k)=0;
    else
        Vcon1(k)=n*(B*log(B4));
    end;

    Vd(k)=- (Vact(k)+Vcon(k)); %be carefull with signal!!
    Vd1(k)=- (Vact1(k)+Vcon1(k));
end;

Rohm(k)=Vohmic(k)./Ifc(k);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      STACK RESULTING VOLTAGE                                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Vs(k)=Energst(k)+Vohmic(k)-Vd(k); %stack voltage
Vs1(k)=Energst(k)+Vohmic(k)-Vd1(k);
Vfc(k)=Vs(k)/n; %cell voltage
Vfc1(k)=Vs1(k)/n;

gate=0;
if gate==1
    r=2;
    Ifc(k+1)=Vs1(k)./r;
else
    r(k)=50; %20,40,50, 100, 300%3000
    Ifc(k+1)=Vs1(k)./r(k);
end;

if t(k)>=2
    r(k)=2; %2.15, 2.5
    Ifc(k)=Vs1(k)./r(k);

```

```

end;
if t(k)>=3
    r(k)=50; %20,40,50, 100, 300 %3000;
    Ifc(k)=Vs1(k)./r(k);
end;

```

```

J(k)=Ifc(k)/area;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      NERNST POTENTIAL                                          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Eernst(k)=n*(aux4+aux2);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      OHMIC VOLTAGE DROP                                        %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

n1=1+0.03*(Ifc(k)/area);
n2=0.062*((T/303)^2)*((Ifc(k)/area)^2.5);
num=181.6*(n1+n2);

```

```

d1=Phi-0.634-3*(Ifc(k)/area);
d2=4.18*(T-303)/T;
den=d1*exp(d2);

```

```

Rm=num/den;
Re=(Rm*L)/area;

```

```

Vohmic(k)=-n*(Ifc(k)*(Re+Rc));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      HYDROGEN CONCENTRATION                                    %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

ax1=exp(-498/T);
ax2=5.08E6*ax1;
CH2=PH2/ax2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      OXYGEN CONCENTRATION                                      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

ay1=exp(-498/T);
ay2=5.08E6*ay1;
CO2=PO2/ay2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
%      ACTIVATION VOLTAGE DROP      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
A1=4.3E-5*log(CH2);
```

```
e2=0.00286+(0.0002*log(area))+A1;
```

```
A2=e1+e2*T+(e3*T*log(CO2));
```

```
if Ifc(k)==0
```

```
    Vact(k)=0;
```

```
else
```

```
    Vact(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ifc(k))));
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      CONCENTRATION VOLTAGE DROP      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
B1=J(k)/Jmax;
```

```
B2=1-B1;
```

```
if J(k)>=Jmax
```

```
    Vcon(k)=0;
```

```
else
```

```
    Vcon(k)=n*(B*log(B2));
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      CELL DYNAMIC VOLTAGE      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if dynamics==1
```

```
    Vdin(k)=Vact(k)+Vcon(k);
```

```
    if Ifc(k)>=0.01
```

```
        Ra(k)=abs(Vdin(k)/Ifc(k));
```

```
    else
```

```
        Ra(k)=0.887; %1
```

```
    end;
```

```
Tal(k)=Ca*Ra(k);
```

```
AA=-1/Tal(k);
```

```
%d(Vd)/dt=(1/C)*Ifc-(1/Tal)*Vd
```

```
BB=1/Ca;
```

```
CC=1;
```

```
DD=0;
```

```

sys=ss(AA,BB,CC,DD);    %creates a continuous-time state space model
sysd=c2d(sys,Ts);      %converts the continuous-time LTI model to a discrete-time
model with sample time Ts

```

```

Vd(k+1)=sysd.a*Vd(k)+sysd.b*Ifc(k); %the subsequent updating of Vd is made by the
vector 'a' of matrix multiplied current Vd, more the vector 'b' of matrix multiplied current Ifc

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

dVdin(k+1)=(Vd(k+1)-Vd(k))/Ts;    %derivada da tensão dinâmica

```

```

Ica(k)=Ca*dVdin(k);            %corrente do capacitor

```

```

Ira(k)=Ifc(k)-Ica(k);          %corrente das perdas de tensão

```

```

Jra(k)=Ira(k)/area;           %densidade de corrente das perdas de tensão

```

```

Vact1(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ira(k)))); %tensão de ativação corrigido

```

```

B3=Jra(k)/Jmax;                %parâmetros da tensão de concentração corrigido
B4=1-B3;

```

```

if J(k)>=Jmax
    Vcon(k)=0;
else
    Vcon1(k)=n*(B*log(B4));      %tensão de concentração corrigido
end;

```

```

if dynamics==1

```

```

Vdin1(k)=Vact1(k)+Vcon1(k);    %tensão dinâmica corrigida

```

```

if Ifc(k)>=0.01
    Ra1(k)=abs(Vdin1(k)/Ira(k));
else
    Ra1(k)=1;
end;

```

```

Ta1(k)=Ca*Ra1(k);

```

```

AA1=-1/Ta1(k);                %d(Vd)/dt=(1/C)*Ifc-(1/Ta1)*Vd
BB1=1/Ca;
CC1=1;
DD1=0;

```

```

sys1=ss(AA1,BB1,CC1,DD1);    %creates a continuous-time state space model

```

```

    sysd1=c2d(sys1,Ts);           %converts the continuous-time LTI model to a discrete-time
    model with sample time Ts

```

```

    Vd1(k+1)=sysd1.a*Vd1(k)+sysd1.b*Ira(k); %the subsequent updating of Vd is made by
    the vector 'a' of matrix
    end;

```

```

else
    dVdin(k+1)=(Vd(k+1)-Vd(k))/Ts;

```

```

    Ica(k)=Ca*dVdin(k);

```

```

    Ira(k)=Ifc(k)-Ica(k);

```

```

    Jra(k)=Ira(k)/area;

```

```

        Vact1(k)=n*(A2+(e4*T*log(Ira(k))));

```

```

    B3=Jra(k)/Jmax;

```

```

    B4=1-B3;

```

```

    if J(k)>=Jmax

```

```

        Vcon(k)=0;

```

```

    else

```

```

        Vcon1(k)=n*(B*log(B4));

```

```

    end;

```

```

    Vd(k)=-(Vact(k)+Vcon(k)); %be carefull with signal!!

```

```

    Vd1(k)=-(Vact1(k)+Vcon1(k));

```

```

end;

```

```

Rohm(k)=Vohmic(k)/Ifc(k);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      STACK RESULTING VOLTAGE                                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Vs(k)=Enernst(k)+Vohmic(k)-Vd(k); %stack voltage

```

```

Vs1(k)=Enernst(k)+Vohmic(k)-Vd1(k);

```

```

Vfc(k)=Vs(k)/n;           %cell voltage

```

```

Vfc1(k)=Vs1(k)/n;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      CONVERSION EFFICIENCY                                     %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

rend(k)=uf*Vfc(k)/1.48;

```

```

rend1(k)=uf*Vfc1(k)/1.48;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% STACK POWER %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Power(k)=Ifc(k)*Vs(k);  
Power1(k)=Ifc(k)*Vs1(k);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Potência Interna %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if Vs1(k)<=0.1  
Pint(k)=Iint(k)*0.1;  
else  
Pint(k)=Iint(k)*Vs1(k);  
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Potência Total %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Power2(k)=Power1(k)+Pint(k);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Calor Gerado %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if Vfc1(k)<=0.01  
Qger(k)=Power2(k)*((1.48/0.01)-1);  
else  
Qger(k)=Power2(k)*((1.48/Vfc1(k))-1);  
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Variação de Temperatura de Operação da Pilha %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
res(k)=0.4;  
MCs=12;
```

```
Ti(k)=25;  
Temp(k)=Ti(k)+1;
```

```
Qrem(k)=Qger(k)*res(k);  
DeltaQ(k)=Qger(k)-Qrem(k);
```

```
deltat=100e-3;
```

```
To(k)=(DeltaQ(k)/MCs)*deltat+Ti(k);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Temperatura de Operação da Pilha
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

$$T_{pilha}(k) = T_o(k) + T_i(k);$$

```

if Tpilha(k) >= 55
    res(k) = 0.5;
end;
if Tpilha(k) <= 40
    res(k) = 0;
else
    res(k) = 0.4;
end;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Umidade Relativa da Membrana
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

$$T_{in}(k) = T_i(k);$$

$$UR_{in} = 0.5;$$

$$P_o(k) = 1;$$

$$est = 5;$$

$$r_5(k) = 2.7e-5 * T_{in}(k)^5;$$

$$r_4(k) = 2.885e-7 * T_{in}(k)^4;$$

$$r_3(k) = 2.54274e-5 * T_{in}(k)^3;$$

$$r_2(k) = 1.4971540e-3 * T_{in}(k)^2;$$

$$r_1(k) = 0.0431459533 * T_{in}(k);$$

$$r_0 = 0.6182727799;$$

$$P_{satin}(k) = r_0 + r_1(k) + r_2(k) + r_3(k) + r_4(k) + r_5(k);$$

$$P_{pin}(k) = UR_{in} * P_{satin}(k);$$

$$P_{pout}(k) = P_o(k) * ((est + 0.188) / 0.421);$$

$$T_{out}(k) = T_{pilha}(k);$$

$$s_5(k) = 2.7e-5 * T_{out}(k)^5;$$

$$s_4(k) = 2.885e-7 * T_{out}(k)^4;$$

$$s_3(k) = 2.54274e-5 * T_{out}(k)^3;$$

$$s_2(k) = 1.4971540e-3 * T_{out}(k)^2;$$

$$s_1(k) = 0.0431459533 * T_{out}(k);$$

$$s_0 = 0.6182727799;$$

$$P_{satout}(k) = s_0 + s_1(k) + s_2(k) + s_3(k) + s_4(k) + s_5(k);$$

```
URout(k)=((Ppin(k)+Ppout(k))/Pstatout(k));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      Resistances r, Rohm, Ra e Req                                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
req3(k)=r(k)-Rohm(k);  
req1(k)=Ra1(k)*req3(k);  
req2(k)=Ra1(k)+req3(k);  
Req(k)=req1(k)./req2(k);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      INCREMENT k                                                    %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if J(k)>=(Jmax-0.0001)  
    k=kmax-1          %not to accomplish one more updating, it is unnecessary  
end;
```

```
k=k+1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      END OF THE MAIN PROGRAM                                       %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Atualiza a barra de progressão                                     %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
waitbar(k/kmax);
```

```
end;  
close(wb);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%      GRAPHS GENERATION                                             %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if dynamics==1  
    tdyn=5999;  
    plot(t(1:tdyn),Vs1(1:tdyn));      %graph of stack voltage x time - colocar em função do  
    comprimento do vetor. Ex: length(t)-1  
    xlabel('Time (s)')  
    ylabel('Stack Voltage (V)')  
    title('Dynamic Behavior')  
    grid on
```

```
figure;          %show other figure, without turning off the previous
```

```
% plot(t(1:tdyn),Ira(1:tdyn));
```

```

% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Ira (A)')
% title('Voltage Drops Current')
% grid on
%
% figure;

plot(t(1:tdyn),Ica(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ica (A)')
title('Capacitor Current')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn),Ifc(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ifc (A)')
title('Fuel Cell Current')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn),Power2(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ps (W)')
title('Stack Power')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn), rend1(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Efficiency')
title('Efficiency')
grid on

figure;

% plot(t(1:tdyn), Tpilha(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Tpilha (°C)')
% title('Stack Temperature')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), Qger(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Qger (W)')

```

```

% title('Calor Gerado')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), URout(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('URout (%)')
% title('Umidade de Saída')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), Temp(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('DeltaT (°C)')
% title('Variação de Temperatura')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), Vohmic(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Vohmic (V)')
% title('Perda Ôhmica')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), Vcon1(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Vcon (V)')
% title('Perda de Concentração')
% grid on
%
% figure;
%
% plot(t(1:tdyn), Vact1(1:tdyn));
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Vact (V)')
% title('Perda de Ativação')
% grid on
%
% figure;

plot(t(1:tdyn), Ra1(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ra (Ohms)')
title('Resistência')
grid on

```

```

figure;

plot(t(1:tdyn), (100/1.81)*Ra1(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ra (%)')
title('Resistência Ra')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn), r(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Load (Ohms)')
title('Load')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn), -Rohm(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Rohm (Ohms)')
title('Resistência Rohm')
grid on

figure;

% req3(k)=r(k)-Rohm(k);
% req1(k)=Ra1(k)*req3(k);
% req2(k)=Ra1(k)+req3(k);
% Req(k)=req1(k)./req2(k);

plot(t(1:tdyn), Req(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Req (Ohms)')
title('Resistência Equivalente')
grid on

figure;

plot(t(1:tdyn), 100*Req(1:tdyn));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Req (%)')
title('Equivalent Resistance')
grid on

else

test=469.9;

```

```
plot(Ifc(1:test),Vs1(1:test));    %graph of stack voltage x current density
xlabel('Ifc (A/m2)')
ylabel('Vs (V)')
title('Polarization Curve')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(J(1:test),Vfc1(1:test));    %graph of stack voltage x current density
xlabel('J (A/m2)')
ylabel('Vfc (V)')
title('Corrigided Polarization Curve')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(J(1:test),Vs1(1:test));    %graph of stack voltage x current density 2
xlabel('J (A/m2)')
ylabel('Vs (V)')
title('Correct Polarization Curve')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test),J(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('J (A/m2)')
title('Current Density')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test),Vs(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Vs (V)')
title('Stack Voltage')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test),Power(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Power(W)')
title('Stack Power')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test),Power2(1:test));
xlabel('Time (s)')
```

```
ylabel('Power(W)')
title('Correct Stack Power')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), rend1(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Rendimento')
title('Efficiency')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), Tpilha(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Tpilha (°C)')
title('Stack Temperature')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), Qger(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Qger (W)')
title('Calor Gerado')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), URout(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('URout (%)')
title('Umidade de Saída')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), Temp(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('DeltaT (°C)')
title('Variação de Temperatura')
grid on
```

```
figure;
```

```
plot(t(1:test), Vohmic(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Vohmic (V)')
title('Perda Ôhmica')
```

```

grid on

figure;

plot(t(1:test), Vcon1(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Vcon (V)')
title('Perda de Concentração')
grid on

figure;

plot(t(1:test), Vact1(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Vact (V)')
title('Perda de Ativação')
grid on

figure;

plot(t(1:test), Ra1(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Ra (Ohms)')
title('Resistência')
grid on

figure;

plot(t(1:test), Rohm(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Rohm (Ohms)')
title('Resistência ôhmica')
grid on

figure;

plot(t(1:test), r(1:test));
xlabel('Time (s)')
ylabel('Load (Ohms)')
title('Carga')
grid on

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      FILES GENERATION
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      STACK VOLTAGE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
% OBS: it is necessary to define the path and the file name %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Vs1.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Vs1);  
fclose(fid);
```

```
fid=fopen('d:\Vfc1.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Vfc1);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% SIMULATION TIME %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\time.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',t);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% CURRENT DENSITY %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\J.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',J);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% EFFICIENCY %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\rend1.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',rend1);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% STACK (OR LOAD) CURRENT %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Ifc.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Ifc);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% STACK (OR LOAD) POWER %  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Power2.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Power2);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      TEMPERATURE STACK                                     %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Tout.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Tout);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      CALOR GERADO                                         %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Qger.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Qger);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      CORRENTE DAS PERDAS DE TENSÃO                       %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Ira.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Ira);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      CORRENTE DO CAPACITOR                               %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Ica.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Ica);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      RESISTENCIA RA                                      %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\Ra1.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Ra);  
fclose(fid);
```

```
%%%%%%%%%%  
%      CARGA                                               %  
%%%%%%%%%%
```

```
fid=fopen('d:\r.txt','w');  
fprintf(fid,'%10.4f\n',Load);  
fclose(fid);  
% save('c:\matlabR12\work\cobep\pra_valer\AeAw_40pi.txt','AeAw','-ascii','-tabs')
```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)