

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INTEGRAÇÃO DE PILHAS DE CÉLULAS A  
COMBUSTÍVEL COM OUTRAS FONTES  
ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Luciano Porto de Lima**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

# **INTEGRAÇÃO DE PILHAS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL COM OUTRAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

**por**

**Luciano Porto de Lima**

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

**Mestre em Engenharia Elétrica**

**Orientador:**

**Felix Alberto Farret, PhD**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**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

**INTEGRAÇÃO DE PILHAS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL COM  
OUTRAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

elaborada por

**Luciano Porto de Lima**

como requisito parcial para obtenção do grau de

**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Felix Alberto Farret, PhD. (UFSM)**  
(Presidente / Orientador)

---

**Jocemar Biasi Parizzi, Dr. (Unipampa)**

---

**Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM)**

Santa Maria, 31 de março de 2009

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus queridos pais, Orlando e Eni, que sempre estiveram ao meu lado, proporcionando a minha formação e compartilhando as vitórias por mim alcançadas.

Aos meus irmãos Sandro e Adriano, grandes amigos, que acreditaram nos meus sonhos e me apoiaram sempre.

À minha noiva Eliane, por me dar tantas alegrias e incentivos, além da dedicação, amor, pelos fins de semana de renúncia durante este trabalho, pelas palavras certas nas horas certas, pelo carinho e paciência durante esta caminhada.

Ao meu orientador, Professor Felix Alberto Farret, expressei minha admiração e faço um agradecimento especial, pelos inestimáveis ensinamentos transmitidos, pelo apoio e pela confiança que sempre demonstrou depositar em mim, pela sua paciência ao ajudar a construir este trabalho, pela sua valiosa orientação, dedicação, incentivo e acima de tudo amizade, meus mais sinceros agradecimentos.

A todos os colegas do CEEMA, pela amizade e ajuda na elaboração deste trabalho e pelos momentos de descontração.

Em especial aos amigos Álvaro, Jordan, Giovani, Jocemar, Fredi e Diego, cujas importantes contribuições enriqueceram essa dissertação.

Ao professor Ricardo Quadros Machado, por suas contribuições no início deste trabalho e ao amigo, MSc Henrique Stangarlin, que sempre esteve disposto a compartilhar seus conhecimentos e dedicou parte do seu tempo para permitir a conclusão deste projeto.

Pelos momentos de trabalho e dedicação compartilhados, nos finais de semana, o autor agradece aos amigos Álvaro Serdotte e Jordan Trapp, enfim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

Ao grande amigo Siqueira, que nos momentos mais difíceis me deu força e incentivo para me guiar no caminho certo e retomar minha jornada.

Aos funcionários do PPGEE e NUPEDEE, que se mostraram disponíveis e pelo auxílio administrativo e técnico durante o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

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

### **INTEGRAÇÃO DE PILHAS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL COM OUTRAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA**

Luciano Porto de Lima  
Orientador: Felix Alberto Farret, PhD

Santa Maria, 31 de março de 2009

Esta dissertação refere-se ao desenvolvimento de um sistema de integração entre uma pilha de células a combustível (CaCs), e outros módulos geradores de energia alternativa utilizando gerador eólico, gerador fotovoltaico e um acumulador de energia formado por um banco de baterias. Este sistema foi implementado no Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente-CEEMA, no Centro de Tecnologia da UFSM. As fontes alternativas de energia foram conectadas de forma a injetarem corrente CC em um barramento comum de forma a evitar a circulação de corrente entre as fontes devido à diferença de tensão das mesmas. A tensão no barramento é controlada pelo chaveamento de uma carga secundária em paralelo com a carga principal. É utilizado o algoritmo "Hill Climbing Control" (HCC) para maximizar a potência gerada pela associação do gerador eólico com o gerador fotovoltaico. Evidencia-se neste estudo o princípio de funcionamento das CaCs, suas características elétricas estáticas e dinâmicas quando associada a outras fontes de energia. No desenvolvimento dos trabalhos usou-se um simulador de CaC com cargas elétricas reais. Um conversor CC-CC do tipo *Boost* conecta cada fonte primária ao barramento CC e para o banco de baterias utiliza-se um conversor CC-CC do tipo *Buck-Boost* para controle do estado de carga e descarga. Os resultados obtidos nas simulações do sistema híbrido e em seguida os resultados dos ensaios de laboratório foram obtidos com a implementação prática de um protótipo que permite variações de cargas e variação da potência gerada nas fontes.

*Palavras-chave:* Células a combustível, fontes alternativas de energia, integração, sistemas híbridos de energia, geração distribuída.

## **ABSTRACT**

Master Thesis

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

### **INTEGRATION OF FUEL CELLS STACKS WITH OTHER ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY**

Luciano Porto de Lima  
Advisor: Felix Alberto Farret, Ph.D.  
Santa Maria, 31st March 2009

This dissertation presents a project of a integrated system with distinct energy generating modules using a wind generator, photovoltaic generator, fuel cells stack (FCs) and an accumulator of energy formed by a bank of batteries. This system was implemented in the Center of Studies in Energy and Environment-CEEMA-UFSM. The alternative sources of energy were connected in such a way as to inject current to a common DC bus avoiding so current circulation among sources due to individual voltage differences. The bus voltage is controlled by modulation of a secondary load in parallel with the main load. Along all tests, it was used the algorithm "Hill Climbing Control" (HCC) to maximize the generated power in the wind generator and in the photovoltaic generator. The FC operating principles are shown in more details with respect to their static and dynamic characteristics. In this MSc dissertation a FC simulator was used connected to real electric loads. A DC-DC Boost-type converter connects each primary source to the DC bus, and a Buck-Boost DC-DC converter with an integrated to control the charge and discharge states of the storage system (bank of batteries). Finally, numerical results were presented for all electric simulations so completing the hybrid system. After discussion of these results, a practical implementation was made to verify the numerical simulations with variable loads fed by the maximized generated powers from the sources.

*Keywords* – Fuel cells, alternative sources of energy, integration, hybrid systems of energy, distributed generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama genérico de um Sistema Híbrido de Energia. ....	9
Figura 3.2 – Esquema básico de uma CaC do tipo PEM. ....	14
Figura 3.3 – Quedas de tensão típicas de uma CaC.....	19
Figura 3.4 – Efeito da variação da temperatura na característica de saída de um PV. ....	21
Figura 3.5 – Efeito da variação da radiação solar. ....	21
Figura 3.6 – Fator de forma (FF) dos geradores fotovoltaicos. ....	22
Figura 3.7 – Modelo do circuito equivalente dos geradores fotovoltaicos. ....	23
Figura 3.8 – Curva de saturação e reatância capacitiva para dois valores de frequência.....	26
Figura 3.9 – Constituição interna de um acumulador de chumbo-ácido.....	28
Figura 3.10 – Número de ciclos em função da profundidade de descarga .....	29
Figura 4.1 – Elementos de um sistema híbrido de energia. ....	31
Figura 4.2 – Esquema do sistema híbrido implementado. ....	32
Figura 4.3 – Sistema Híbrido de Energia no PSIM.....	32
Figura 4.4 – Contribuição de corrente das fontes geradoras. ....	33
Figura 4.5 – Circuito típico de um conversor Buck.....	34
Figura 4.6 – Formas de ondas típicas do modo de condução contínua e descontínua de um conversor Buck. ....	36
Figura 4.7 – Circuito típico de um conversor Boost.....	37
Figura 4.8 – Formas de ondas típicas do modo de condução contínua e descontínua de um conversor Boost. ....	39
Figura 4.9 – Malha de controle do conversor Boost com compensador PI. ....	40
Figura 4.10 – Atuação do controlador HCC .....	41
Figura 4.11 - Diagrama de blocos do controlador HCC.....	42
Figura 4.12 – Foto de um cartucho da CaC SR-12 com 4 células. ....	43
Figura 4.13 – Foto de um gerador SR-12 de 48 células (12 cartuchos).....	44
Figura 4.14 – Modelo matemático de uma CaC no PSim . ....	44
Figura 4.15 – Bloco para cálculo do valor de Ra e demais parâmetros do modelo. ....	45

Figura 4.16 – Controle da corrente no conversor Boost e compensador PI da CaC.....	45
Figura 4.17 – Foto do Simulador de pilhas de CaC.....	46
Figura 4.18 – Diagrama de blocos do simulador de pilhas de CaC [11].....	47
Figura 4.19 – Curva Potência(W) x Velocidade do vento(m/s) do manual do gerador eólico.....	48
Figura 4.20 – Foto do túnel de vento construído no laboratório do CEEMA. ....	48
Figura 4.21 – Curva de potência obtida com base nos dados reais do gerador WM2.5.....	49
Figura 4.22 – Modelo de simulação do Gerador Eólico WM2.5. ....	49
Figura 4.23 – Modelo de simulação do conversor Boost e compensador PI do gerador eólico.....	50
Figura 4.24 – Foto do gerador fotovoltaico utilizado.....	51
Figura 4.25 – Curvas práticas de Tensão e Potência x Corrente.....	51
Figura 4.26 – Modelo de simulação do Gerador Fotovoltaico Siemens Pro 4JF.....	52
Figura 4.27 – Modelo de simulação do conversor Boost e compensador PI do gerador fotovoltaico.....	53
Figura 4.28 – Modelo de simulação do banco de baterias.....	53
Figura 4.29 – Conversor Buck-boost e compensador PI do banco de baterias. ....	54
Figura 4.30 – Circuito de controle da tensão no barramento CC. ....	56
Figura 5.1 - Forma de onda simulada da corrente no indutor do Boost da CaC. ....	58
Figura 5.2 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.....	58
Figura 5.3 – Potência dos geradores e das cargas principal e secundária. ....	59
Figura 5.4 – Corrente nas cargas principal e secundária.....	60
Figura 5.5 – Transitório da tensão no barramento CC para inserção de carga.....	61
Figura 5.6 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.....	61
Figura 5.7 – Potência dos geradores do SHE.....	62
Figura 5.8 – Corrente no indutor do conversor da CaC.....	62
Figura 5.9 – Tensão nos terminais da CaC.....	63
Figura 5.10 – Corrente nos terminais da CaC.....	63
Figura 5.11 – Corrente nas cargas principal e secundária.....	64
Figura 5.12 – Transitório da tensão no barramento CC para retirada de carga.....	65
Figura 5.13 – Potência dos geradores do SHE.....	65
Figura 5.14 – Corrente no indutor do conversor da CaC.....	66

Figura 5.15 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.....	66
Figura 5.16 – Tensão nos terminais da CaC.....	67
Figura 5.17 – Corrente nos terminais da CaC.....	67
Figura 5.18 – Potência dos geradores do SHE. ....	68
Figura 5.19 – Tensão dos geradores do SHE e do barramento CC.....	69
Figura 5.20 – Detalhe do aumento da corrente do gerador eólico. ....	69
Figura 5.21 – Corrente no indutor dos conversores dos geradores do SHE. ....	70
Figura 5.22 – Corrente no indutor do conversor da CaC.....	70
Figura 5.23 – Transitório da tensão no barramento CC. ....	71
Figura 5.24 – Tensão nos terminais da CaC.....	71
Figura 5.25 – Corrente nos terminais da CaC.....	72
Figura 5.26 – Tensão no barramento CC.....	72
Figura 5.27 – Corrente nas cargas principal e secundária. ....	73
Figura 5.28 – Transitório na tensão do barramento CC. ....	73
Figura 5.29 – Tensão do barramento CC para incremento de carga. ....	74
Figura 5.30 – Tensão do barramento CC para redução de carga.....	74
Figura 5.31 – Corrente no indutor do conversor do banco de baterias. ....	75
Figura 5.32 – Corrente no indutor do conversor da CaC.....	75
Figura 5.33 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.....	76
Figura 5.34 – Potência dos geradores do SHE. ....	76
Figura 5.35 – Tensão nos terminais da CaC para incremento de carga. ....	77
Figura 5.36 – Tensão nos terminais da CaC para redução de carga.....	77
Figura 5.37 – Corrente nos terminais da CaC para incremento de carga. ....	78
Figura 5.38 – Corrente nos terminais da CaC para redução de carga. ....	78
Figura 5.39 – Placa do DSP e placa de condicionamento de sinais. ....	79
Figura 5.40 – Foto da placa do circuito dos conversores. ....	80
Figura 5.41 – Protótipo do SHE implementado .....	80
Figura 5.42 – Tensão do barramento CC corrente na carga principal.....	81
Figura 5.43 – Tensão no barramento CC e corrente no gerador fotovoltaico .....	82
Figura 5.44 – Tensão e corrente no banco de baterias.....	82
Figura 5.45 – Tensão e corrente no simulador de CaC.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFC	Alkaline Fuel Cell
Bat	Banco de Baterias
CA	Corrente Alternada
CaCs	Células a Combustível
CC	Corrente Contínua
CEEMA	Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CT	Centro de Tecnologia
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DSP	Digital Signal Processor
FC	Fuel Cell
FF	Fator de Forma
GD	Geração Distribuída
GE	Gerador Eólico
HCC	Hill Climbing Control
HFAC	High Frequency Alternate Current
PSim	Power Simulator
PI	Proporcional Integral
MCC	Modo de Condução Contínua
MCD	Modo de Condução Descontínua
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PD	Profundidade de Descarga
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PV	Gerador Fotovoltaico (photovoltaic)
PWM	Pulse Width Modulation
SHE	Sistema Híbrido de Energia
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto (open circuit)
$I_{sc}$	Corrente de curto circuito (short circuit)
$V_{mp}$	Tensão de máxima potência
$I_{mp}$	Corrente de máxima potência
$I_L$	Corrente no indutor L
$I_d$	Corrente da junção p-n do modelo PV
$I_p$	Corrente na resistência paralela do modelo PV
$\Delta$	Ligação trifásica em triângulo
Y	Ligação trifásica em estrela
$R_s$	Resistência série
$R_p$	Resistência paralela
$I_0$	Corrente de saturação reversa do diodo
$e$	Carga do elétron
$m$	Fator de idealidade do diodo
$k$	Constante de Boltzmann
$T_c$	Temperatura absoluta da célula fotovoltaica
$X_{Cn}$	Reatância capacitiva
W	Passo do HCC
$V_{BUS}$	Tensão no barramento
$H_2$	Hidrogênio gasoso
$O_2$	Oxigênio gasoso
$E_0$	Tensão de circuito aberto ou Potencial de Nernst
$v_{act}$	Tensão de ativação
$v_{con}$	Tensão de concentração
$v_{ohm}$	Tensão ôhmica
$\Delta G$	Variação da energia de Gibbs

$P_{H_2}$	Pressão do hidrogênio gasoso
$P_{O_2}$	Pressão do oxigênio gasoso
$J$	Densidade de corrente
$J_0$	Densidade de corrente de troca
$H^+$	Íon hidrogênio
$R_{ohm}$	Resistência ôhmica
$i_{fc}$	Corrente da CaC
$R_m$	Resistência da membrana
$R_c$	Resistência dos contatos
$\rho_m$	Resistividade da membrana
$\ell$	Espessura da membrana
$A_e$	Área efetiva da membrana
$\alpha$	Constante do coeficiente de transferência
$T$	Temperatura da pilha (K)
$F$	Constante de <i>Faraday</i> ( $F = 96485,34.C.mol^{-1}$ ).
$R$	Constante universal dos gases
$J_{max}$	Densidade máxima de corrente
$J_n$	Densidade de corrente interna
$V_i$	Tensão de entrada
$i_o$	Corrente de saída
$V_o$	Tensão de saída
$t_s$	Tempo de condução
$\tau$	Período de chaveamento
$t_x$	Tempo durante corrente nula
$\delta_{crit}$	Ciclo de trabalho crítico
$\delta$	Ciclo de trabalho
$I_{o_{min}}$	Corrente de saída mínima
$L_{min}$	Indutância mínima
$\Delta V_o$	Variação da tensão de saída

$\Delta I_i$	Varição de corrente de entrada
$K_p$	Ganho proporcional
$T_i$	Tempo integral
$\varepsilon_i$	Erro de corrente
$V_{cont}$	Tensão de controle
$I_{Gn}$	Corrente da fonte geradora n
$\psi$	Parâmetro influenciado pelo procedimento de preparação da membrana

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos desta Dissertação .....	2
1.2 Organização dos Capítulos.....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>3 INTEGRAÇÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA .....</b>	<b>8</b>
3.1 Introdução.....	8
3.2 Sistemas Híbridos de Energia .....	9
3.2.1 Formas de Integração das Fontes Alternativas de Energia.....	10
3.3 A Célula a Combustível .....	11
3.3.1 Tipos de Célula a Combustível .....	12
3.3.2 Operação Básica da Célula a Combustível do tipo PEM .....	13
3.3.2.1 Tensão Reversível – $E_0$ .....	15
3.3.2.2 Tensão de Ativação – $v_{act}$ .....	15
3.3.2.3 Tensão Ôhmica – $v_{ohm}$ .....	17
3.3.2.4 Tensão de Concentração – $v_{con}$ .....	18
3.3.2.5 Correntes Internas e Passagem Direta de Combustível.....	19
3.4 O Gerador Fotovoltaico.....	20
3.4.1 Efeitos da Temperatura e da Radiação Solar .....	20
3.4.2 Modelo Equivalente do Gerador Fotovoltaico .....	22
3.5 O Gerador Eólico .....	24
3.5.1 Gerador Síncrono com Imã Permanente.....	25
3.5.2 O Gerador de Indução - GI.....	26

3.6 O Banco de Baterias.....	27
3.7 Resumo .....	30
<b>4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA .....</b>	<b>31</b>
4.1. Introdução.....	31
4.2 Condicionamento da Energia Gerada.....	33
4.2.1. Conversor Buck.....	34
4.2.2 Conversor Boost.....	37
4.3 O Controlador PI.....	40
4.4 O Controlador HCC “Hill Climbing Control” .....	41
4.5 Descrição do Sistema Híbrido Implementado.....	43
4.5.1 A Célula a Combustível.....	43
4.5.2 Controle da Corrente na Célula a Combustível.....	45
4.5.3 O Gerador Eólico.....	47
4.5.4 Controle da Corrente do Gerador Eólico .....	50
4.5.5 O Gerador Fotovoltaico .....	50
4.5.6 Controle da Corrente do Gerador Fotovoltaico .....	52
4.5.7 O Banco de Baterias .....	53
4.5.8 Controle da Tensão do Banco de Baterias.....	54
4.6 Controle da Tensão na Carga Principal.....	55
4.7 Resumo .....	56
<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÕES .....</b>	<b>57</b>
5.1 Introdução.....	57
5.2 Resultados das Simulações.....	57
5.2.1 Regime Permanente .....	58
5.2.2 Incremento de 20% na Carga Principal.....	59
5.2.3 Retirada de 20% da Carga Principal .....	64
5.2.4 Variação na Potência das Fontes.....	68
5.2.5 Variação de Carga $\pm$ 20% com Banco de Baterias .....	72
5.3 Resultados Experimentais .....	78
5.3.1 Levantamento dos Resultados Práticos .....	78
5.4 Resumo .....	83
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>89</b>

<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>97</b>
<b>ANEXO 01</b> .....	<b>102</b>
A.1 Simulador Eletroquímico .....	104
A.2 Modelagem do Conversor CA/CC .....	107
<b>ANEXO 02</b> .....	<b>110</b>
<b>ANEXO 03</b> .....	<b>112</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

O setor elétrico brasileiro vem sendo reestruturado devido ao aumento constante da demanda de energia elétrica. Formas de energias alternativas que, embora ainda não sejam muito competitivas sob o ponto de vista econômico, podem ajudar de forma importante os sistemas convencionais, principalmente no atendimento de comunidades isoladas, contribuindo para a sociedade e para os setores de geração e transmissão de energia elétrica. Esta ajuda deve-se, sobretudo, a crescente dificuldade de implantação de novas fontes de geração de energia baseadas em combustíveis fósseis ou que tenham grande impacto sobre o meio ambiente. Sendo assim as fontes alternativas de energia, ganham espaço cada vez maior, adquirindo mais adeptos no seu desenvolvimento e aplicações, tornando-se uma alternativa viável para a atual situação energética do país e do mundo.

Além dos benefícios relacionados ao meio ambiente, as fontes alternativas podem aumentar a confiabilidade dos sistemas atuais através da redução da dependência de combustíveis fósseis, ou no caso do Brasil, da dependência hídrica, com isso diversificando a matriz energética. Os preços elevados e instáveis do petróleo e a redução nos custos totais das tecnologias alternativas tornaram as fontes alternativas e/ou renováveis mais atraentes. Mas ainda exigindo investimentos à longo prazo.

O baixo índice de degradação ao meio ambiente, o funcionamento silencioso, alta eficiência e caráter modular são características que tornam as Células a Combustível (CaCs) muito atraentes para produção de energia. Neste contexto, há necessidade de maior conhecimento sobre o comportamento deste tipo de tecnologia, funcionando tanto isolada quanto conectada à rede ou conectada a outras fontes alternativas.

O conjunto de múltiplas fontes alternativas de energia em pequena escala, representa maior flexibilidade no sistema e nos investimentos, atribuindo a estes menores custos, modularidade e, conseqüentemente, menores riscos.

Recursos naturais tais como a incidência solar e o vento, por exemplo, não são contínuos, ocasionando em certos períodos a interrupção da energia primária necessária à produção de energia elétrica. Quando se considera a utilização da geração de energia distribuída baseada em fontes alternativas, torna-se necessário a conexão com a rede elétrica ou a um sistema de armazenamento de energia. Nestes casos, para que não seja interrompida a continuidade de abastecimento de energia à carga, é necessário o uso de sistemas de armazenamento de energia que possam suprir a demanda.

Neste trabalho estudam-se sistemas híbridos isolados constituídos de geradores fotovoltaicos, geradores eólicos, células a combustível e sistemas armazenadores de energia. Todavia, os resultados daí advindos poderiam facilmente ser estendidos a outras tecnologias de geração elétrica, a partir de recursos energéticos renováveis ou não. Para isso, basta que sejam consideradas as características específicas de cada uma dessas novas fontes.

### **1.1 Objetivos desta Dissertação**

Esta dissertação tem por objetivo realizar o estudo, a modelagem e implementação de um sistema híbrido de geração de energia elétrica baseado em fontes alternativas, com atenção maior voltada para a análise do comportamento das pilhas de CaCs do tipo PEM integradas ao sistema e, otimizar o índice de aproveitamento das demais fontes, com baixo custo, modularidade e funcionalidade para qualquer tipo de fonte alternativa.

Possibilitar estudos para análise da interação e o emprego entre os diferentes tipos de fontes alternativas, e o estudo em particular sobre pilhas de CaCs. Espera-se contribuir assim, para a difusão do uso das diferentes formas de energias alternativas que se caracterizem pelo reduzido impacto sobre o meio ambiente, custos reduzidos e o estabelecimento de um protótipo de referência a ser utilizado para testes na UFSM. Estes estudos são essenciais para assegurar a correta operação das pequenas centrais, tais que evitem danos nos geradores e/ou no sistema como um todo (redução da vida útil), eventos estes que poderiam prejudicar, ou seja, interromper o fornecimento de energia elétrica.

## 1.2 Organização dos Capítulos

Os capítulos nesta dissertação são organizados como segue:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os tópicos relevantes da dissertação.
- O capítulo 3 descreve brevemente as fontes de geração que foram utilizadas neste trabalho com um maior detalhamento sobre os conceitos e funcionamento das células a combustível, em especial das CaCs do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*).
- O capítulo 4 descreve o sistema de potência utilizado (conversores) para a integração, a estratégia de controle das fontes alternativas e o sistema de armazenamento.
- O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com o sistema híbrido de energia, a simulação de todo o sistema e o protótipo implementado no laboratório.
- O capítulo 6 apresenta as principais conclusões, e contribuições dessa dissertação e também sugere tópicos para a continuidade deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Os sistemas de geração de energia podem ser implementados a partir de fontes típicas, como hídrica, combustíveis fósseis, ou através de fontes alternativas, como solar, eólica, biomassa, células a combustível, etc. A escolha da fonte mais adequada deve ser feita pelo compromisso, disponibilidade, e a relação custo-benefício característica de cada fonte primária Farret et. al., Neto, Vale et. al., Tanrioven [1]-[4].

Farret et. al. [1] apresentam várias formas e métodos viáveis de integração de fontes de energia e armazenamento de forma eficiente. Os autores abordam sobre as formas de integração das diversas fontes de energia para a produção de energia elétrica. Neto [2] faz uma análise do desempenho da integração de diversos tipos de fontes alternativas transformadas em fontes de corrente, o autor implementou um controlador modular para sistemas híbridos de geração de energia elétrica baseado no algoritmo "Hill Climbing Control" (HCC) para maximização da potência gerada em cada fonte, de modo a se obter o melhor proveito das instalações, porém não foram realizados testes com fontes reais. Vale et. al. [3] apresentou um estudo da inserção de CaCs em sistemas híbridos para geração de energia em comunidades isoladas. Foram realizados estudos econômicos para avaliar o custo da geração de energia de cada fonte do sistema híbrido e o tempo de retorno do investimento. Tanrioven [4] apresentou estudos da confiabilidade e o custo benefício da inserção das CaCs e outras fontes de geração de energia renováveis num sistema isolado, mostrando que se deve considerar além dos aspectos técnicos também geográficos para inserção destas fontes e deve ser realizado um projeto prevendo um possível aumento na demanda. Righi [5] propõe a conexão de fontes renováveis de energia com um controle de geração unificado.

A resposta dinâmica da pilha, comportamento essencial para o tratamento em geração de energia, é mostrado por Baschuk et. al. [6], Amphlett et. al. [8] e Pathapati et. al. [9]. Em Larminie [10], é apresentado um circuito equivalente para o comportamento elétrico dinâmico da CaC, simplificando o seu equacionamento, além de facilitar o entendimento. É mostrado que a variação da corrente de carga

representa o comportamento de um circuito de primeira ordem à resposta dinâmica da célula.

As características dos modelos apresentados por Baschuk et. al. [6], Mann et. al. [7], Amphet et. al. [8], e Larminie [10] combinados levam à definição de um modelo adequado para a aplicação em geração de energia elétrica. Tal combinação é utilizada por Corrêa [11] 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. Novaes [12] traz os principais elementos envolvidos na operação das pilhas de células de combustível reais. São descritos os principais tipos de células e as características de cada tipo.

Palma [13] explora as considerações sobre projeto de uma CaC conectada a um conversor CC-CC, utilizando um circuito equivalente da pilha PEMFC para avaliar o comportamento transitório do sistema para variações de carga e determinar os efeitos no conversor CC-CC. Candusso [14] apresenta duas topologias descritas e analisadas. A primeira associa um conversor CC-CC e um inversor PWM. E a segunda utiliza um sistema híbrido: um banco de ultracapacitores, conectados ao barramento CC através de um Chopper e o sistema da CaC, e atua como um armazenador do pico de potência. Wai et. al. [15] apresentam o estudo de um conversor Boost, de alta frequência, e utilização de técnicas de chaveamento suave em sistemas de PEMFC.

Tanrioven e Alam [16] apresentam em seu trabalho o modelo, simulação e controle de um sistema baseado em CaCs do tipo PEM para aplicação residencial. Um controlador PI foi proposto para satisfazer as condições de tensão e qualidade de energia do sistema. Barbosa et al [20] apresentam uma ferramenta que utiliza-se da lógica difusa para determinação da viabilidade de implantação de sistemas híbridos de pequeno porte em regiões isoladas, baseada em dados locais para obtenção da lógica e conjunto de regras utilizadas.

Bolaños [22] apresenta em seu trabalho um controlador inteligente para gerenciamento de sistemas híbridos de energia de pequeno porte. O sistema é baseado em redes neurais artificiais e lógica neuro-fuzzy, o qual é capaz de realizar previsões de velocidade de vento e variação de demanda de curto prazo, possibilitando tomada de decisões otimizadas para gerenciamento e despacho da energia gerada. Foi utilizado um modelo computacional para cálculo do balanço

energético do sistema híbrido, os resultados deste controlador foram comparados com os resultados de outros tipos de controladores utilizados na literatura. Cobas [23] apresenta uma análise de células a combustível do tipo SOFC, e sua operação integrada com microturbinas a gás em ciclo combinado. Foram desenvolvidos três modelos matemáticos para o estudo da SOFC onde utilizou-se um programa de simulação comercial para simulação da microturbina integrada. Com estes modelos desenvolvidos foi feita uma avaliação da influencia da temperatura e pressão na operação da SOFC isolada e integrada com a microturbina a gás.

No trabalho de Blasques [28] é apresentada uma análise da viabilidade de implementação de sistemas híbridos para geração de energia elétrica. Foi apresentado estudos sobre aspectos técnicos e econômicos para geração de energia, a partir de sistemas híbridos. Foi desenvolvido um software denominado AVES-H como ferramenta para auxiliar nos projetos de sistemas híbridos.

Serpa [29] apresenta um estudo sobre um sistema de geração baseado em células a combustível, com simulações comparadas a dados experimentais, Andersen [30] apresenta um sistema de interligação de mais de um módulo de geradores de células a combustível integrados a um sistema acumulador de energia formado por um banco de baterias, este sistema é simulado e posteriormente comparado com o protótipo implementado.

Corrêa [31] apresenta um sistema de geração distribuída de energia baseada em uma micro-rede de alta frequência para integração de fontes alternativas de energia.

Em sistemas de controle e análise em tempo real deve ser levado em conta, a complexidade dos sistemas computacionais. Marafão [32] compara algumas técnicas usuais de controle, onde as questões relativas à precisão, robustez e complexidade computacional são abordadas detalhadamente.

Martins [33] apresenta um sistema de geração distribuída para baixas potências composto por uma CaC, um conversor do tipo Boost e um inversor trifásico chaveado em baixa frequência para injeção da energia na rede. Reis [34] apresenta um estudo de um sistema híbrido de energia, baseado em geradores eólico, fotovoltaico e biogás. Foi desenvolvido e modelado um sistema de controle baseado na lógica fuzzy no software Matlab, também foi implementado um sistema de supervisão com o auxílio do software Labview.

Wang [46] apresenta o desenvolvimento de um modelo dinâmico para CaCs tipo PEM usando um circuito elétrico com auxílio de ferramentas do Matlab/Simulink e PSpice. O modelo é comparado com dados experimentais de uma CaC tipo PEM SR12 de 500W. Al-Baghdadi [48] propõe um modelo de CaC tipo PEM baseado em equações semi-empíricas como ferramenta para projetos utilizando CaCs. Neste modelo é levado em conta além da densidade de corrente, fatores como pressão do gás, temperatura, umidade, os quais são importantes para a determinação do comportamento de uma CaC real.

Marquezini [59] mostra um estudo e resultados da interação entre as células a combustível e um conversor de potência conectado aos seus terminais. Foi utilizado um conversor CC-CC associado a um filtro do tipo "T". A fim de evitar a grande ondulação de corrente absorvida pela CaC e manter constante o fluxo de potência entre a CaC e o barramento CC. Foi projetado um conversor CC-CA trifásico para injetar ou absorver corrente da rede com reduzida distorção harmônica e estabilidade. Foram utilizados controladores para a corrente CC, a tensão CC e a corrente CA.

## 3 INTEGRAÇÃO DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

---

### 3.1 Introdução

Com a crescente demanda de energia elétrica, e o aumento da consciência dos problemas ambientais relacionados com as formas tradicionais de geração de energia, formas alternativas de geração devem ser avaliadas. A geração distribuída (GD) se apresenta como um estímulo no sentido de promover o aproveitamento dos potenciais energéticos de cada região, assim como os Sistemas Híbridos de Energia (SHEs) de tal forma complementar os atuais parques energéticos. A energia proveniente das transformações diretas dos recursos naturais, tais como: o vento, a hidráulica, a biomassa e a solar, tem se apresentado como importantes opções na atual conjuntura energética, revelando-se como alternativas viáveis para complementaridade dos aproveitamentos convencionais.

As restrições ambientais impostas à expansão ao setor elétrico do modelo convencional vêm aumentando e dificultando o crescimento do mesmo, em contrapartida a demanda de energia vem aumentando num ritmo acelerado. Estas razões configuram-se como um parâmetro determinante para se avaliar e comparar as opções entre distintas fontes e tecnologias alternativas que podem contribuir para a expansão do setor elétrico, agora considerando aspectos econômicos e ambientais.

Desta forma, a integração das fontes convencionais e alternativas de geração de energia, geralmente através de sistemas híbridos, representa um amplo campo de estudos em desenvolvimento e otimização dos sistemas de geração como um todo.

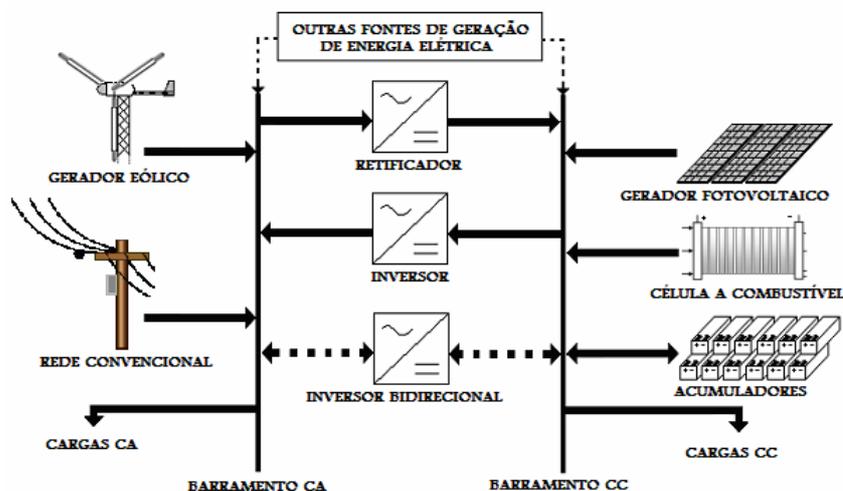
Neste trabalho discute-se o comportamento de um SHE composto por uma CaC, gerador eólico, gerador fotovoltaico e banco de baterias. Esta configuração foi escolhida por que muitos trabalhos já antevêm a inserção das CaCs nos SHEs,

principalmente pela sua elevada eficiência na conversão eletroquímica e também térmica [03], [37] e [39].

### 3.2 Sistemas Híbridos de Energia

Segundo BARBOSA [27] os SHEs são definidos como aqueles que utilizam mais de um tipo de fonte primária de energia em sua matriz, dependendo da disponibilidade dos recursos de uma determinada região. Assim, produzir e distribuir energia elétrica de forma otimizada e com custo reduzido, considerando a capacidade de uma fonte suprir a carga quando da falta temporária de outra, permitindo que operem com um mínimo de interrupções [35] e [36].

Os SHEs instalados, na sua grande maioria são compostos por sistemas isolados e geralmente incorporam tecnologias de geração renováveis (painéis solares, geradores eólicos, turbinas hidráulicas, etc.), grupos geradores a diesel, banco de baterias (no caso de sistemas isolados, para armazenamento da energia para quando as fontes têm problemas para suprir a demanda na falta de energia primária), conversores de potência (inversores e retificadores), conectados aos barramentos CC e/ou CA e também podem ser conectados a rede convencional [38]. A Figura 3.1 ilustra uma configuração típica desses sistemas.



Fonte: Barbosa [27]-modificado

Figura 3.1 – Diagrama genérico de um Sistema Híbrido de Energia.

Um SHE integra pelo menos duas fontes de energia em paralelo, de forma que estas fontes tornam o sistema flexível no que se refere à matriz energética, e com isso aumentando a confiabilidade da geração considerando-se o potencial da região.

### 3.2.1 Formas de Integração das Fontes Alternativas de Energia

Para utilizarmos as fontes alternativas de energia de forma viável em GD ou SHEs, na maioria dos casos, há que se lançar mão dos conversores de potência. Estes conversores são utilizados para adequar as formas de tensão e/ou corrente disponíveis nos terminais do gerador, para interligar as diferentes fontes, além da possibilidade de conexão com a rede convencional.

Pelos aspectos distintos e característicos de cada fonte como: tensão, dinâmica, frequência, etc, torna-se necessário encontrar uma forma comum para integração das fontes e dispositivos de armazenamento, uma vez que as tensões geradas possuem características e dinâmicas diferentes. Para a escolha da melhor forma de integração das fontes geradoras de energia, devemos considerar muitos destes aspectos como: os níveis de potência envolvidos, a necessidade de conexão com a rede convencional, a distância entre as fontes e as cargas, os diferentes tipos de fontes a serem utilizadas, entre outros. Entre as configurações para integração de fontes dos sistemas de GD mais utilizados pode-se citar: conexão em série de fontes de energia em CC, distribuição em corrente contínua, distribuição em corrente alternada convencional, distribuição em corrente alternada com alta frequência (HFAC – High Frequency Alternate Current), e configuração com conversores multiníveis [40].

### 3.2.2 Controle Individual das Fontes Geradoras

As fontes geradoras de energia, independente da sua origem, seja ela eólica, hídrica, solar, térmica, diesel, células a combustível, ou qualquer outra, apresenta

uma dinâmica de comportamento peculiar, pelas suas características construtivas, respostas transitórias, condições climáticas e/ou ambientais, disponibilidade e instabilidade de recursos para as fontes primárias (sol, vento, etc.). Estas características individuais devem ser analisadas para que a escolha do tipo de controle e a forma como estes geradores irão interagir entre si seja de forma confiável e com robustez [41].

O controle individual de cada fonte levando em consideração às características dos geradores permite a integração delas, ligadas em paralelo, porém, evitando-se a circulação de corrente entre elas, a produção de harmônicos, a instabilidade, etc. Para evitar que haja níveis de tensões diferentes, e assim evitar a circulação de corrente entre os geradores, todas as fontes geradoras podem ser transformadas em fontes de corrente, isto é, o barramento CC pode ser considerado como um nó de corrente, para onde convergem todas as correntes individuais das fontes. A seguir são apresentadas algumas características das fontes que integrarão o SHE.

### **3.3 A Célula a Combustível**

As células a combustível (CaCs) podem ser definidas como geradores eletroquímicos, que convertem diretamente a energia química dos reagentes em energia elétrica, calor e água. Apresentam funcionamento similar ao das baterias. Mas diferentemente das baterias, a energia não é armazenada internamente, mas é gerada enquanto houver fluxo dos reagentes (combustível e oxidante) [10].

As CaCs atraem a cada dia maior interesse de pesquisadores devido principalmente a sua elevada eficiência, ao fato de não possuírem partes móveis, funcionarem com baixa emissão de poluentes, e serem silenciosas. Por isto, elas são vistas como uma promissora fonte alternativa de energia [45]. Elas são atrativas especialmente por seu caráter modular e pela possibilidade de serem conectadas em diversos pontos do sistema de distribuição, sem limitações ambientais e geográficas, o que não ocorre com as demais fontes [46].

A principal desvantagem das CaCs ainda é sem dúvida o seu custo muito elevado, o que torna lenta a sua disseminação em grande escala, sendo considerada uma tecnologia ainda em desenvolvimento.

### 3.3.1 Tipos de Célula a Combustível

As células a combustível podem ser classificadas de acordo com diferentes parâmetros, dentre eles pode-se citar: o tipo de combustível consumido, o tipo de eletrólito utilizado, a temperatura de operação, etc. A classificação que se usa atualmente considera o tipo de eletrólito utilizado [10] e [17], entre os quais se podem destacar:

- *Alkaline Fuel Cell (AFC)* – Primeira célula a combustível utilizada em aeronaves tripuladas em missões espaciais (Apollo). O eletrólito é composto por uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH) concentrado. A temperatura de operação varia entre 50 e 200°C.
- *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* – O eletrólito das células do tipo PEM é formado por uma camada de polímero sólido que permite a passagem de prótons do anodo para o catodo, e impede a passagem de elétrons. Células deste tipo utilizam hidrogênio e oxigênio como combustíveis, e apresentam elevada densidade de potência. As temperaturas de operação estão entre 50 e 100°C.
- *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)* – O eletrólito é composto por ácido fosfórico concentrado ( $H_3PO_4$ ) e opera com temperaturas entre 150 e 200°C. Podem atingir eficiência de aproximadamente 85%, em sistemas de co-geração.
- *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)* – O eletrólito é formado por uma solução líquida de carbonatos (Lítio, Potássio e/ou Sódio) imersa em uma matriz cerâmica de  $LiAlO_2$ . Opera com elevadas temperaturas entre 600 e 700°C para alcançar um nível suficiente de condutividade do eletrólito.
- *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)* – Seu eletrólito é formado por material sólido não poroso rígido (óxidos de ítrio/óxido de zircônio), permitindo

operar com temperaturas bastante elevadas de até 1000°C. Apresenta uma eficiência de aproximadamente 65%, podendo chegar entre 80 a 85% se considerar-se a co-geração.

- *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) – Seu eletrólito é composto por uma membrana composta de polímeros. Utiliza metanol como combustível. Opera em temperaturas entre 60 e 120°C. Apresenta rendimento inferior ao dos outros tipos de CaCs.

Nesta dissertação como mencionado anteriormente é dado ênfase ao estudo das CaCs do tipo PEM.

### 3.3.2 Operação Básica da Célula a Combustível do tipo PEM

Uma CaC do tipo PEM é composta por dois eletrodos (anodo e catodo) geralmente catalisados com platina, separados por uma membrana (uma camada polimérica sólida), que age como eletrólito. A membrana, normalmente de *Nafion*, é montada entre dois eletrodos de fibra de carbono. O eletrodo tem duas regiões: uma porosa, parcialmente hidrofóbica com uma camada interna de fibra carbono, e a outra região, muito fina, coberta com teflon e platina catalisadora na face frontal da membrana. Entre as células existe um separador que as conecta eletricamente em série e separa o combustível  $H_2$  de uma célula do oxidante  $O_2$  da outra. O gás  $H_2$  flui para o anodo onde é dissociado em íons positivos que fluem através da membrana para o catodo, e elétrons, que circulam sob forma de corrente elétrica em um circuito externo. O gás  $O_2$  flui para o catodo e se combina com os elétrons e prótons resultando em água. Estas reações químicas são apresentadas na Figura 3.7 e em (3.6), (3.7) e (3.8).

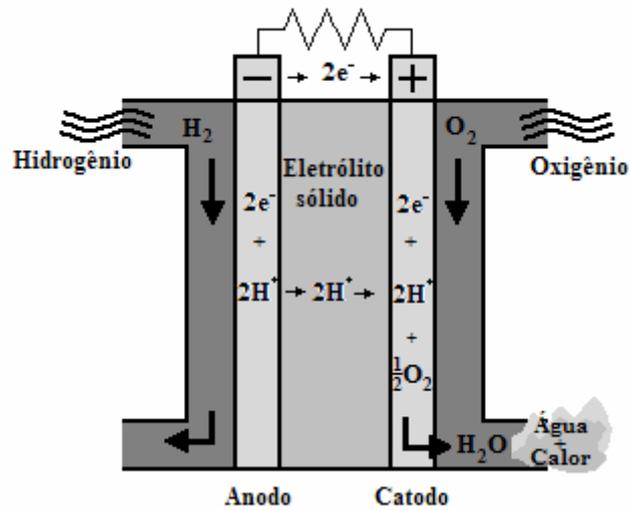


Figura 3.2 – Esquema básico de uma CaC do tipo PEM.

A circulação dos reagentes pelos eletrodos de uma célula a combustível resulta nas reações eletroquímicas que seguem [10]:

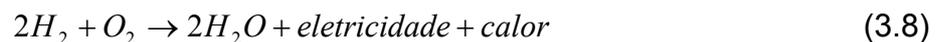
- Reação no catodo:



- Reação no anodo:



- Reação na célula:



Na operação de uma CaC existem três irreversibilidades principais que determinam a tensão de saída da CaC, diminuindo a tensão de circuito aberto. Assim a tensão de saída pode ser definida através de [10] e [17] como:

$$V_{FC} = E_0 - v_{act} - v_{con} - v_{ohm} \quad (3.9)$$

onde:

- $E_0$ : é o potencial termodinâmico da célula e representa sua tensão de circuito aberto (Potencial de Nernst);
- $v_{act}$ : é a queda de tensão devido à ativação do anodo e do catodo, uma medida da queda de tensão associada com os eletrodos;
- $v_{con}$ : é a queda de tensão resultante da concentração ou transporte de massa de oxigênio e hidrogênio (sobrepotencial de concentração);
- $v_{ohm}$ : é a queda de tensão ôhmica (sobrepotencial ôhmico), uma medida das perdas ôhmicas associadas com a condução dos íons positivos no eletrólito sólido e das resistências eletrônicas internas.

### 3.3.2.1 Tensão Reversível – $E_0$

A tensão reversível ou Potencial de Nernst é a máxima tensão que uma célula pode gerar para uma determinada condição de operação (temperatura, pressão e concentração dos reagentes). Ela depende da variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ), para realizar trabalho proveniente da reação química. Os termos em (3.9) com base em Larminie, [10] e Maxoullis [47], são considerados como segue.

Para a tensão de circuito aberto ou Potencial de Nernst tem-se:

$$E_0 = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (3.10)$$

### 3.3.2.2 Tensão de Ativação – $v_{act}$

O sobrepotencial devido à polarização por ativação é dominante em baixas densidades de corrente. Neste ponto, deve ser ultrapassada a barreira eletrônica antes de iniciar o fluxo iônico de corrente. Estas perdas apresentam algum incremento com o aumento da corrente [10].

As perdas por ativação ocorrem pela energia desperdiçada, necessária para romper a barreira eletrônica antes de iniciar o fluxo iônico de corrente (barreira de ativação da reação química). Estas perdas são inversamente proporcionais à densidade de corrente, ou seja, quanto menor a densidade da corrente, maiores são as perdas. Nas células do tipo PEM, as perdas de ativação no anodo (hidrogênio) são muito menores que as perdas que ocorrem no catodo (oxigênio) sendo esta primeira insignificante e comumente são desconsideradas [10]. Estas perdas são causadas pela redução na velocidade das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos, dada por (3.11), conhecida como Equação de Tafel:

$$v_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) \quad (3.11)$$

onde:

- $v_{act}$  é a tensão de ativação;
- $J$  é a densidade de corrente da pilha;
- $J_0$  é a densidade de corrente de troca.

Para uma célula a combustível com dois elétrons transferidos por mol de  $H_2$ , a constante  $A$  é dada por (3.12).

$$A = \frac{R.T}{2.\alpha.F} \quad (3.12)$$

onde:

- $\alpha$  - Constante chamada de coeficiente de transferência.
- $T$  - Temperatura da pilha (K).
- $F$  - Constante de Faraday ( $F = 96485,34.C.mol^{-1}$ ).
- $R$  - Constante universal dos gases ( $R = 8,314.J.mol^{-1}.K^{-1}$ )

### 3.3.2.3 Tensão Ôhmica – $v_{ohm}$

A queda de tensão ôhmica resulta das diferentes perdas resistivas existentes na célula. As perdas ôhmicas são relacionadas à passagem dos íons através da membrana, bem como dos elétrons pelos eletrodos em função de suas imperfeições. O eletrólito deveria permitir a passagem de íons  $H^+$ , porém, por diversos motivos e entre estes, a umidade da membrana, podem influenciar a passagem dos mesmos. Estas perdas estão localizadas na resistência iônica da membrana e na resistência iônica e elétrica dos eletrodos, entre outras [10]. A queda ôhmica de tensão pode ser expressa pela Lei de Ohm, como apresentado em (3.13).

$$v_{ohm} = i_{fc} \cdot R_{ohm} \quad (3.13)$$

A resistência ôhmica é dada por:

$$R_{ohm} = R_m + R_c \quad (3.14)$$

onde:

- $R_m$  : é a resistência da membrana;
- $R_c$  : é a resistência dos contatos.

A resistência da membrana é dada por:

$$R_m = \frac{\rho_m \ell}{A_e} \quad (3.15)$$

A resistividade da membrana é expressa pela relação dada em (3.16). Esta expressão é verificada em [07], [11] e [48].

$$\rho_m = \frac{181.6[1 + 0.03(\frac{i_{fc}}{A}) + 0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i_{fc}}{A})^{2.5}]}{[\psi - 0.634 - 3(\frac{i_{fc}}{A})]\exp[4.18(\frac{T - 303}{T})]} \quad (3.16)$$

O termo  $[181.6/(\psi - 0.634)]$  segundo (Mann, 2000) [07], representa a resistividade específica ( $\Omega.cm$ ) com corrente zero à 30 °C e o termo exponencial é um fator de correção da temperatura se a célula não estiver à 30 °C.

### 3.3.2.4 Tensão de Concentração – $v_{con}$

A tensão de concentração ocorre devido às limitações na transferência de massa e pela disponibilidade dos reagentes em regiões próximas dos eletrodos para que haja o fornecimento constante dos reagentes que sustentam os níveis de corrente e criam a queda de tensão na saída (mudanças na concentração dos reagentes na superfície dos eletrodos) [48]. Este tipo de perda também é conhecido por perdas por transporte de massa, visto que, é resultado do transporte insuficiente dos reagentes para os eletrodos:

$$v_{con} = -\frac{RT}{2F} \ln(1 - \frac{J}{J_{max}}) = -B \cdot \ln(1 - \frac{J}{J_{max}}) \quad (3.16)$$

onde:

- $v_{con}$  é a tensão de concentração;
- $J$  é a densidade de corrente da pilha;
- $J_{max}$  é a densidade de corrente máxima;
- $R$  é a constante universal dos gases ( $C = 8,314.J.mol^{-1}.K^{-1}$ );
- $T$  é a temperatura de operação em K;
- $F$  é a constante de Faraday ( $F = 96485,34.C.mol^{-1}$ ).

Quanto maior a densidade da corrente, mais significativa é a perda por concentração [10] e [17]. Pode-se verificar na Figura 3.8, quando a curva atinge a

região das perdas de concentração, que a tensão cai rapidamente, podendo danificar a célula. Em virtude destas consequências indesejáveis, muitos modelos não consideram esta perda, mesmo porque o sistema não opera nestes níveis de corrente em condições normais.

### 3.3.2.5 Correntes Internas e Passagem Direta de Combustível

Os eletrólitos das CaCs são escolhidos por sua capacidade para condução iônica, porém deverão suportar pequenas incursões de condução eletrônica, devido a não idealidades. Um equivalente destas correntes internas é o cruzamento de combustível pela membrana. Isto ocorre quando alguma porção de hidrogênio reage diretamente com o oxigênio sem produzir nenhuma corrente externa, causando uma redução adicional na tensão, mesmo em circuito aberto [17]. Para a sua determinação, considera-se uma densidade de corrente constante  $J_n$ . Para uma PEM, este valor pode ser estimado em 2 a 3 mA/cm<sup>2</sup>. Esta densidade de corrente é, então, adicionada à densidade de corrente da célula para determinação da tensão de saída [10] e [17].

Na Figura 3.8 está representada graficamente a curva de polarização (ou curva de saturação), ou característica tensão - corrente, onde as diversas parcelas das quedas de tensão das CaCs são mostradas nas regiões onde são mais significativas.

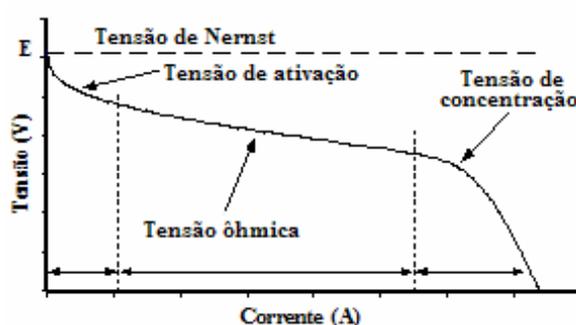


Figura 3.3 – Quedas de tensão típicas de uma CaC.

### 3.4 O Gerador Fotovoltaico

Os geradores fotovoltaicos são constituídos de várias células fotovoltaicas conectadas em série e/ou paralelo de tal forma a converter energia solar em eletricidade. A conversão da energia proveniente da radiação solar em corrente elétrica ocorre pelo efeito fotovoltaico, o qual gera uma diferença de potencial nas células solares individuais. Para a geração de energia através de geradores fotovoltaicos, deve-se considerar a tensão de circuito aberto das células ( $V_{oc}$ ), isto é quando a corrente na célula é zero (sem carga), e a corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), quando a tensão da célula é zero [02]. Estes dois fatores são fundamentais para a determinação das características das mesmas e são parâmetros que definem os valores máximos de tensão e corrente de cada célula e, portanto determinam a região de operação das mesmas.

#### 3.4.1 Efeitos da Temperatura e da Radiação Solar

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um gerador fotovoltaico são: a temperatura das células e a radiação solar. A corrente gerada aumenta linearmente com o aumento da radiação solar. Por outro lado, com o aumento da temperatura na célula a eficiência do gerador cai, reduzindo assim a potência máxima gerada. Tais características são mostradas nas Figuras 3.2 e 3.3.

A curva característica  $I \times V$  sob o efeito da variação de temperatura é apresentada na figura 3.2. Pode-se perceber que com o aumento de temperatura a tensão de circuito aberto sofre uma redução significativa e que a corrente de curto-circuito se eleva de forma pouco expressiva caracterizando-a mais como uma fonte de corrente. Com a diminuição de tensão de circuito aberto observada na figura 3.2, verifica-se que a célula apresenta uma redução de potência.

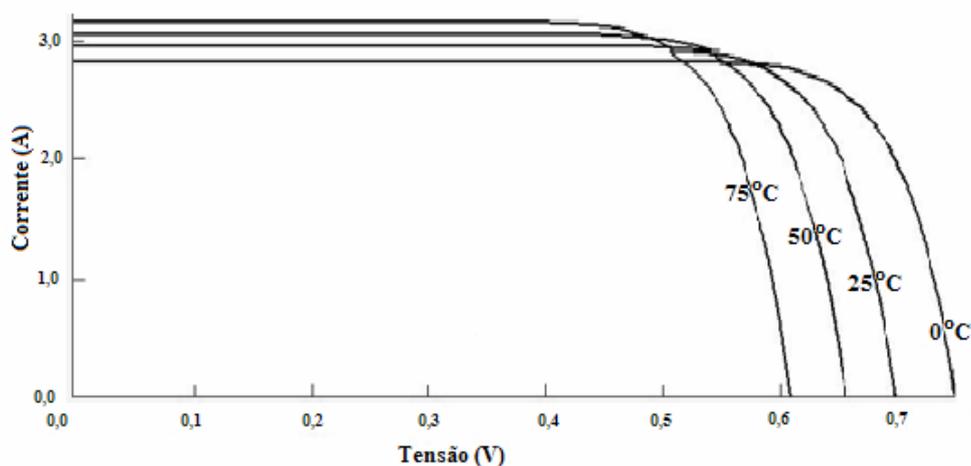


Figura 3.4 – Efeito da variação da temperatura na característica de saída de um PV.

Novamente da análise da curva característica  $I \times V$  em relação à variação da radiação solar, observa-se na figura 3.3 que a corrente de curto-circuito é afetada expressivamente com a variação da radiação. Com o aumento de corrente pelo aumento de radiação, já a tensão de circuito aberto sofre uma elevação pouco significativa, ou seja, um comportamento oposto ao da variação da temperatura.

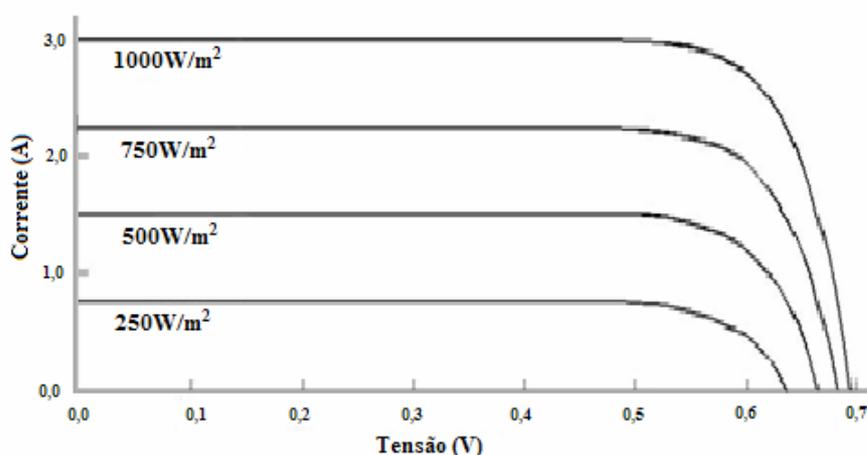


Figura 3.5 – Efeito da variação da radiação solar.

O fator de forma (FF) representado por uma linha tracejada na Figura 3.4 é definido como a relação entre a máxima potência do gerador, ou seja, o produto entre a tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) e a corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ), e o

produto entre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito. Este fator é muito importante, pois expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama  $I \times V$ . Quanto melhor a qualidade do gerador mais próximo da unidade será esse fator [02].

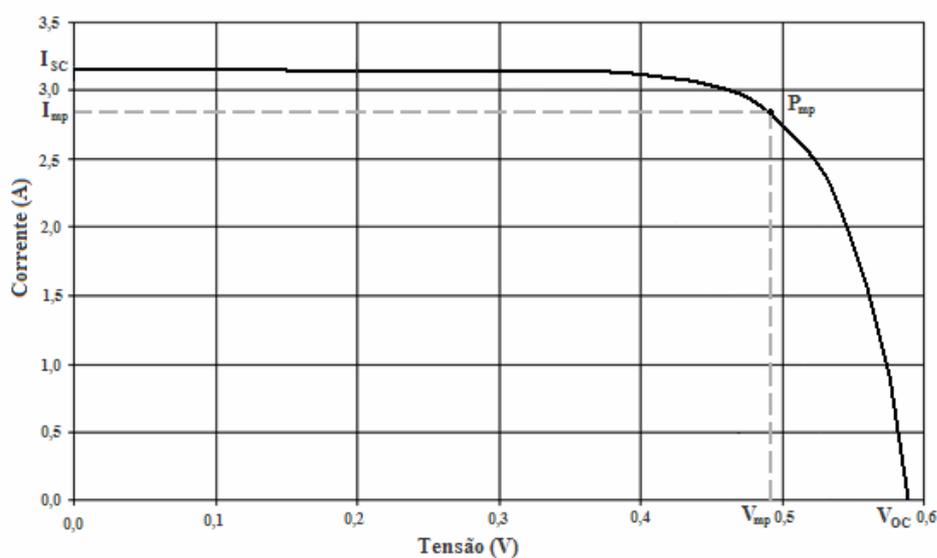


Figura 3.6 – Fator de forma (FF) dos geradores fotovoltaicos.

A equação (3.1) demonstra que o (FF) é inversamente proporcional à tensão de circuito aberto e à corrente de curto circuito e, portanto, é influenciado pela temperatura de operação dos geradores.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.1)$$

### 3.4.2 Modelo Equivalente do Gerador Fotovoltaico

O circuito equivalente de um gerador fotovoltaico é apresentado na Figura 3.5. A fonte de corrente,  $I_L$ , representa a corrente elétrica gerada pelo efeito

fotovoltaico. A junção p-n atua como um diodo que é polarizado positivamente e apresenta uma corrente  $I_d$ , que depende da tensão  $V$  nos terminais da célula [02].

A resistência em série  $R_s$  representa a resistência de condução do gerador e representa a queda da tensão interna. Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, devido à micro fissuras, que podem ser representadas por uma resistência em paralelo,  $R_p$ .

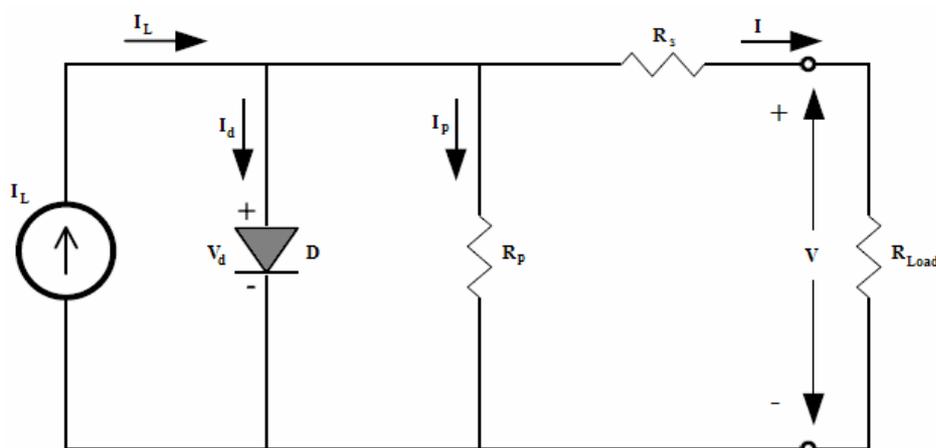


Figura 3.7 – Modelo do circuito equivalente dos geradores fotovoltaicos.

Da análise do circuito da Figura 3.5, tem-se que:

$$I = I_L - I_d - I_p \quad (3.2)$$

Nas condições de temperatura e radiação estabelecidas, as características de tensão e corrente desse modelo são dadas por:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_s)}{mkT_c}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

onde:

- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo;

- $V$  é a tensão aplicada aos terminais do diodo;
- $e$  é a carga do elétron;
- $m$  é o fator de idealidade do diodo;
- $k$  é a constante de Boltzmann;
- $T_c$  é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica;
- $R_s$  é a resistência série;
- $R_p$  é a resistência paralela.

A corrente que circula pelo diodo, em função da tensão nos terminais pode ser expressa por:

$$I_d = I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_s)}{mkT_c}\right] - 1 \right\} \quad (3.4)$$

A corrente que passa pela resistência  $R_p$  é dada por:

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.5)$$

### 3.5 O Gerador Eólico

Os geradores eólicos transformam a energia cinética dos ventos em energia elétrica. São formados basicamente por uma turbina eólica, pás que giram devido à velocidade do vento, e o gerador propriamente dito. O vento atua sobre as pás, fazendo girar o rotor do gerador, produzindo energia.

O projeto das turbinas eólicas é realizado de modo que a potência nominal seja atingida para velocidades dos ventos que ocorram com maior frequência. No projeto também se deve observar algumas limitações de rotação e de potência, para

evitar danos nos componentes elétricos e mecânicos quando as velocidades de vento estejam muito acima da nominal.

Desta forma, têm-se dois tipos básicos para este controle: o stall – que atua com o deslocamento do vento na aerodinâmica das pás, e o pitch – que atua pela variação de ângulo de passo das pás [42].

Os geradores eólicos podem ser classificados quanto a sua velocidade de rotação: velocidade fixa ou velocidade variável. Os geradores com velocidade fixa são assim designados pelo fato da rotação do eixo do rotor que interliga a turbina e o gerador ser mantida constante pela rede elétrica [43]. Já os geradores com velocidade variável são ligados à rede por meio de conversores de frequência, possuem um maior número de pólos, operam a velocidades mais baixas, e assim possibilitam suprimir o uso da caixa de transmissão, reduzindo a estrutura do gerador. A possibilidade de operar com velocidade variável aumenta a flexibilidade de operação da turbina e apresenta algumas vantagens em relação aos geradores que operam com velocidade fixa. Entre estas vantagens está a capacidade de adaptação contínua da velocidade de rotação do eixo com a velocidade do vento, de forma a maximizar a potência produzida pelo gerador [44].

Outra maneira de classificar os geradores é como gerador síncrono e assíncrono ou de indução. Podemos destacar entre estes tipos de geradores, os assíncronos com rotor em gaiola, os assíncronos duplamente excitados, os síncronos de rotor bobinado e, os síncronos com imã permanente, os quais segundo Neto [02], são considerados hoje de tecnologia adequada para aplicações junto a turbinas eólicas.

### 3.5.1 Gerador Síncrono com Imã Permanente

Os geradores com imã permanente para aplicação em geração eólica apresentam as mesmas características da máquina síncrona com rotor bobinado, todavia o campo magnético principal é produzido por imãs permanentes. Isto leva a uma maior dificuldade para se controlar a tensão de campo e ao mesmo tempo, controlar o fator de potência na saída do gerador [42]. Para variações na velocidade ou variações de carga, aparecem problemas na regulação de tensão. Por este

motivo, a conexão deste tipo de gerador com a rede elétrica em sistemas eólicos com velocidade fixa, demanda conversores estáticos para processamento da potência do gerador, e para atuação como interface com a rede elétrica [44]. O gerador com ímã permanente opera em baixas velocidades de rotação, acoplados diretamente ao rotor da turbina eólica, sem necessidade da caixa de transmissão, interligando-se à rede através de um conversor estático CA/CC/CA ou CA/CA.

### 3.5.2 O Gerador de Indução - GI

O gerador de indução (GI) quando é auto-excitado por uma fonte de energia reativa capacitiva gera potência elétrica. Ele apresenta características como baixo custo, robustez, pouca manutenção e grande disponibilidade comercial que tornam atrativos para geração assíncrona [01]. Estas características do GI o tornam uma forma viável para geração de energias alternativas. Entretanto, apresenta problemas relacionados à regulação de tensão e, aos altos custos dos bancos de capacitores que provêm a excitação, limitando desta forma à potência máxima destas máquinas.

A Figura 3.6 apresenta a curva característica de magnetização do gerador de indução para duas frequências diferentes ( $f_1$  e  $f_2$ ). As retas da reatância capacitiva para essas frequências ( $X_{C1}$  e  $X_{C2}$ ), os pontos A e B determinam os pontos de operação nas frequências e reatâncias.

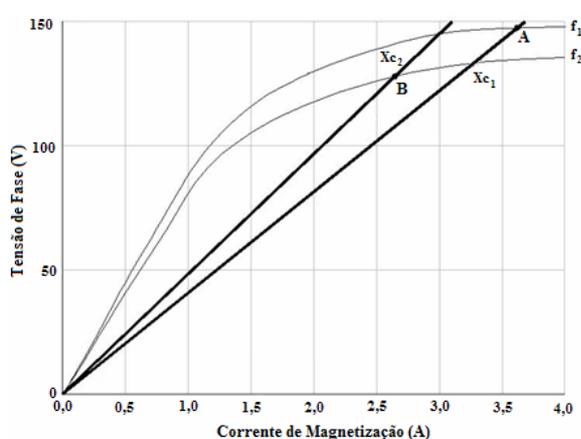


Figura 3.8 – Curva de saturação e reatância capacitiva para dois valores de frequência.

Na Figura 3.6 pode-se observar que para qualquer alteração de frequência do gerador, ocorre uma alteração da reatância, afetando diretamente as características de magnetização da máquina, bem como a tensão de saída.

### 3.6 O Banco de Baterias

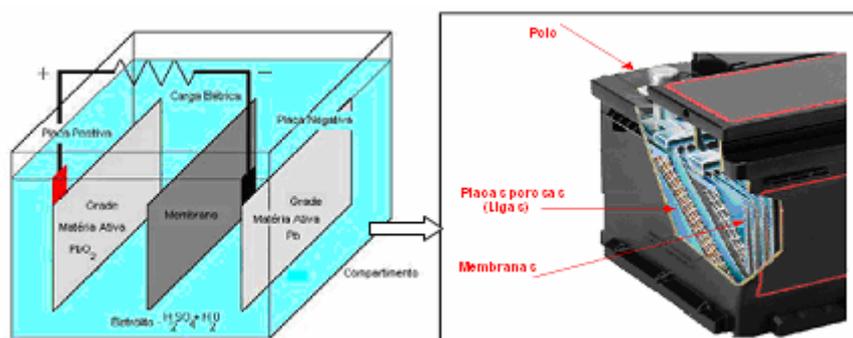
Quando se considera um SHE ou GD, baseado em fontes renováveis torna-se necessário seu acoplamento a uma rede elétrica ou a um sistema de armazenamento de energia. Isto porque, recursos naturais tais como o sol e o vento, por exemplo, não são contínuos, o que faz com que em certos períodos falte a energia primária necessária à produção de energia elétrica. Nestes casos, para evitar a interrupção e a descontinuidade do abastecimento de energia aos consumidores, entram em funcionamento os armazenadores de energia.

Um dos aspectos mais importantes para escolha do gerador de energia elétrica está relacionado aos custos, principalmente os originados pela troca periódica das baterias. Como se sabe da literatura, o tempo de vida útil de um gerador fotovoltaico ou de um gerador eólico é superior a 20 anos [22]. Todavia, as baterias possuem um tempo de vida útil muito inferior quando comparado com os outros componentes do sistema, o que exige reposição constante e em períodos curtos. A vida útil do sistema de acumulação depende em primeiro lugar, do tipo de tecnologia utilizada, e em segundo lugar, aos cuidados por parte do usuário. Por isso é de suma importância enfatizar que o desempenho das baterias tem a ver com eficácia dos controladores de carga, os quais estarão refletidos no aproveitamento e nos custos.

No que se refere ao armazenamento de energia, existe uma grande variedade de tecnologias de baterias, desde as tradicionais baterias eletroquímicas, que podem ser desde as automotivas de chumbo-ácido até as baterias solares, ou até mesmo células a combustível acopladas a um tanque de hidrogênio,  $H_2$  utilizado como vetor energético.

Os acumuladores de energia mais utilizados em sistemas de armazenamento são as baterias de chumbo-ácido, devido a sua grande disponibilidade e

principalmente por seu custo reduzido. As baterias de chumbo-ácido são compostas por dois eletrodos: um catodo (chumbo), um anodo (dióxido de chumbo) e um eletrólito (ácido sulfúrico) diluído em água. A Figura 3.9 ilustra melhor o interior de uma bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Catálogo Delphi Freedom / versão modificada

Figura 3.9 – Constituição interna de um acumulador de chumbo-ácido

O dimensionamento do banco de baterias utilizado para armazenamento de energia pode ser considerado como a parte mais crítica de um sistema híbrido isolado. Garantindo-se um bom funcionamento do banco de baterias, a geração irá operar em condições ideais. Porém, se houver má utilização do mesmo, como descargas profundas e muito frequentes, a não equalização do banco em períodos regulares, dentre outros fatores, certamente haverá uma elevação nos custos de operação e manutenção. Estes custos concentram-se na redução da vida útil das baterias e no aumento do consumo de combustíveis, no caso de sistemas que utilizam geradores diesel ou células a combustível.

Dos diversos acumuladores eletroquímicos existentes no mercado para utilização no banco de baterias, destacam-se principalmente as baterias de níquel-cádmio e as de chumbo-ácido. As baterias de chumbo-ácido possuem um rendimento inferior em comparação com as de níquel-cádmio, porém apresentam um custo reduzido, fazendo com que estas sejam utilizadas na maioria dos casos.

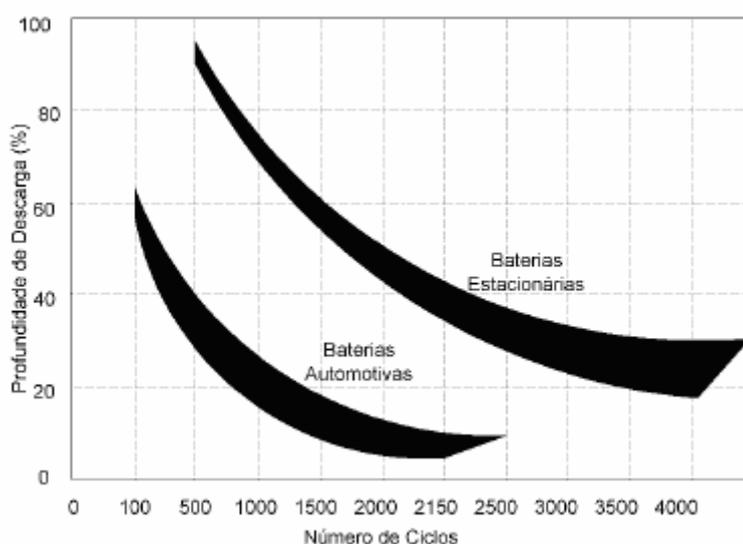
O processo de carga e descarga se dá através do fornecimento ou consumo de corrente contínua em seus terminais. A capacidade de fornecimento de energia pela bateria depende da corrente, ou seja, depende da duração da descarga. Por exemplo, uma bateria de chumbo-ácido estacionária de fabricação nacional, pode

fornecer 36,1 Ah para uma descarga de 20 horas, enquanto que para uma descarga de 1 (uma) hora, a capacidade de fornecimento cai para 19,8 Ah [49].

O banco de baterias deve ser dimensionado de acordo com a autonomia que se deseja dar ao sistema. Uma vez definida a autonomia do sistema (um, dois, três dias, por exemplo sem vento ou sol), deve-se integrar a curva de demanda para o período de autonomia. O resultado será a energia útil que um banco de baterias é capaz de fornecer.

Ao se sobrecarregar uma bateria, ocorre uma gaseificação excessiva, ou então, não carregá-la suficientemente, acarreta uma sulfatação. Em ambos os casos, essas situações reduzem o tempo de vida do acumulador e a integridade do sistema de geração [57].

As principais características das baterias de chumbo-ácido que afetam os sistemas híbridos é a relação entre o número de ciclos de carga e descarga ao longo de sua vida útil, e a profundidade das descargas (PD). A Figura 3.10 mostra as faixas da relação PD x Ciclos para baterias de chumbo-ácido automotivas e estacionárias.



Fonte: Lounineau, 1994 [50]

Figura 3.10 – Número de ciclos em função da profundidade de descarga

As baterias solares são uma adaptação apenas das baterias estacionárias para a aplicação fotovoltaica. Da análise do gráfico na Figura 3.10, pode-se ter uma estimativa de qual seria a vida útil do banco de baterias, se utilizar baterias

estacionárias. Considerando uma PD de 70%, tem-se uma vida útil de aproximadamente 3 anos (considerando ciclos diários). Já para uma PD de 50%, a vida útil do banco de baterias se aproxima dos 6 anos.

Baterias fabricadas para descarga profunda possuem melhor rendimento, podendo trabalhar com até 90% de sua capacidade e sua vida útil é muito maior que as convencionais [51].

### **3.7 Resumo**

Este capítulo apresentou a teoria básica de SHE, junto com as características das fontes utilizadas nesta dissertação. Mostrou-se a teoria de funcionamento das CaCs do tipo PEM, e de forma breve os demais tipos de CaCs encontradas comercialmente. Apresentou-se também as características dos geradores eólicos, os principais efeitos provocados pela variação da temperatura e radiação solar sobre os geradores fotovoltaicos. Finalmente discutiram-se os tipos de baterias e problemas relacionados ao banco de baterias e os quais devem ser evitados.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA

### 4.1. Introdução

Como está explicado no Capítulo 3, os SHEs são sistemas formados por duas ou mais fontes diferentes de produção de energia operando em conjunto para atender a demanda de um barramento ou consumidor comum. Este consumidor comum pode ser uma única residência, uma fábrica ou mesmo uma comunidade, os quais são atendidos por uma mini-rede de distribuição. As fontes de energia podem ser de origens diferentes como, por exemplo: geradores eólicos, geradores diesel, geradores fotovoltaicos, células a combustível entre outras, inclusive a rede pública. Um exemplo desta integração é mostrado na Figura 4.1, notando-se que são necessários conversores para a interação e integração entre as fontes. No caso específico desta dissertação utilizou-se a integração de pilhas de células a combustível com geradores fotovoltaicos e gerador eólico.

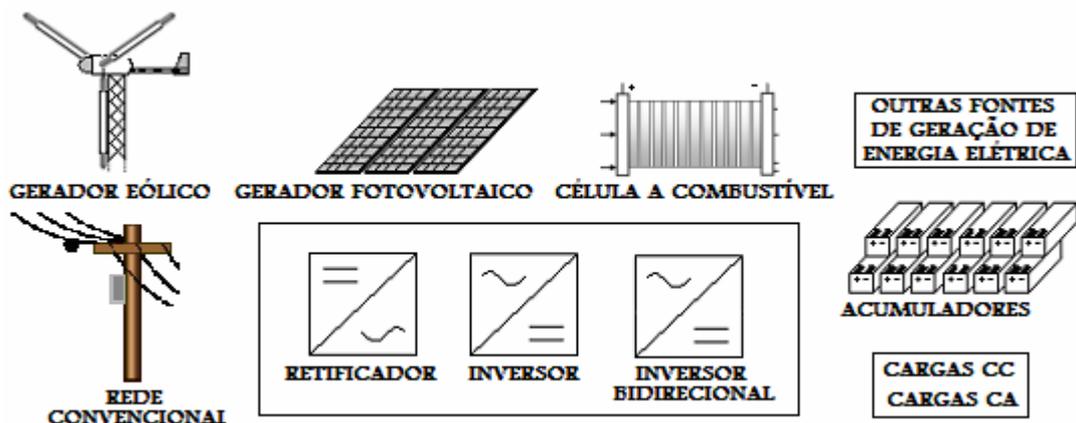


Figura 4.1 – Elementos de um sistema híbrido de energia.

Além das fontes de produção de energia elétrica deve-se observar também que a integração das fontes de energia convencionalmente utiliza-se de um acumulador de energia, o qual é formado por um banco de baterias.

Os módulos de controle e condicionamento de potência para a mini-rede de distribuição são os elementos responsáveis pela coordenação da interação entre as fontes, o banco de baterias e os usuários. A Figura 4.2 ilustra os elementos do sistema CaC-fotovoltaico-eólico, que foram utilizados neste trabalho.

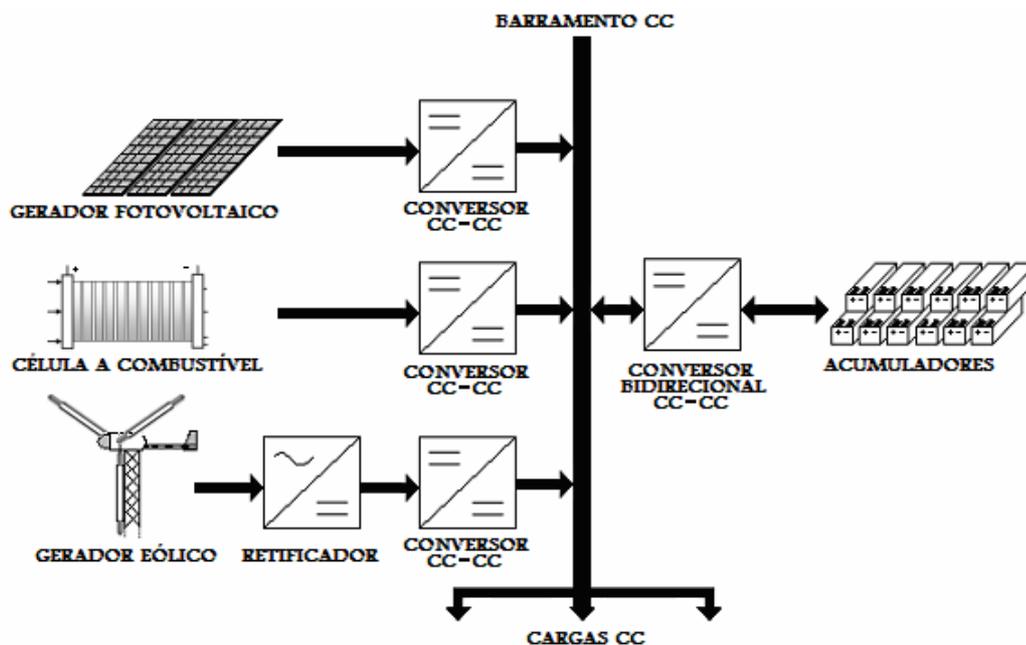


Figura 4.2 – Esquema do sistema híbrido implementado.

Para realizar as simulações do SHE é necessário usar modelos das fontes geradoras de energia, as quais serão descritas neste capítulo. O modelo do SHE completo implementado e utilizado nas simulações está representado na Figura 4.3.

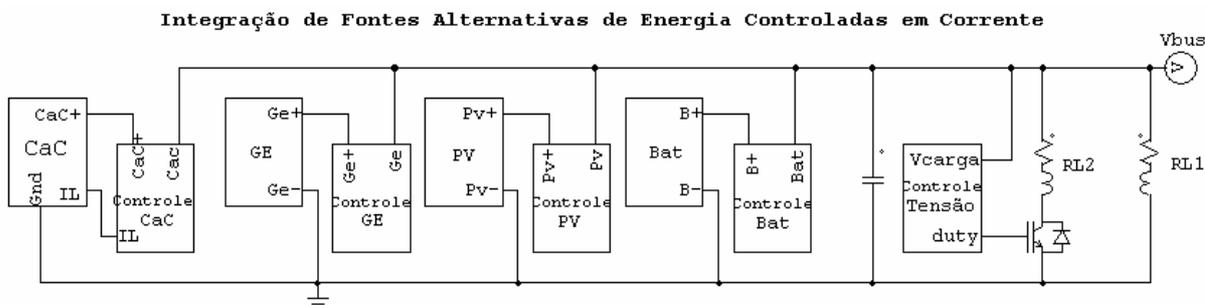


Figura 4.3 – Sistema Híbrido de Energia no PSIM.

onde:

- $GE$  é o Gerador Eólico;
- $PV$  é o Gerador Fotovoltaico;
- $Bat$  é o Banco de Baterias;
- $CaC$  é a Célula a Combustível;
- $V_{bus}$  é a Tensão no barramento.

Na Figura 4.3 cada bloco ou subsistema será discutido e explicado neste capítulo. Nesta figura fica mais fácil visualizar-se cada controle individual e independente das fontes geradoras. Como se observa, as fontes são tratadas como fontes de corrente e o sistema comporta-se como nó de corrente, onde todas as fontes contribuem para a obtenção da corrente responsável pela potência total de saída do barramento CC.

Esta situação é observada na Figura 4.4 de forma genérica, onde cada fonte contribui com uma parcela de corrente para as  $n$  fontes geradoras, resultando numa corrente total de saída composta pelo somatório das correntes dos geradores.

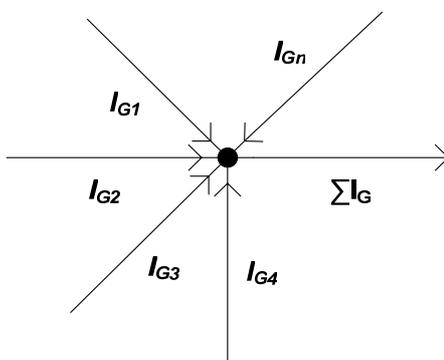


Figura 4.4 – Contribuição de corrente das fontes geradoras.

## 4.2 Condicionamento da Energia Gerada

Para integrar as diferentes fontes alternativas ao barramento comum de energia em CC, foram utilizados conversores CC/CC e CA/CC estáticos não isolados para fazer o condicionamento da energia gerada pelas fontes. Na saída do gerador

eólico foi utilizado um retificador visto que a tensão da saída é CA, e assim disponibilizar uma tensão CC para alimentar o conversor Boost utilizado para condicionamento do fluxo de corrente ao barramento.

O conversor CC/CC é utilizado para se obter uma corrente contínua constante, dependente da energia primária, ou a máxima corrente possível e que determina o ponto de máxima potência, a partir das fontes alternativas. A técnica de chaveamento empregada é a modulação por largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*), por sua simplicidade, adequação e eficiência.

As topologias de conversores não-isolados utilizadas neste trabalho são apresentadas, a título de exemplificação, e foram empregadas no Sistema Híbrido.

#### 4.2.1. Conversor Buck

O conversor Buck atua como um conversor abaixador de tensão e pode ser utilizado, por exemplo, para o carregamento de baterias como foi aplicado neste trabalho. A Figura 4.5 mostra uma estrutura típica deste conversor.

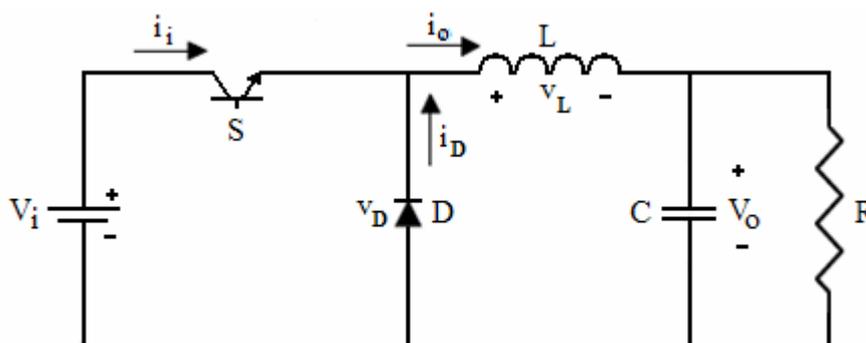


Figura 4.5 – Circuito típico de um conversor Buck.

Quando a chave “S” inicia sua condução, a energia é transferida da fonte  $V_i$  para o indutor  $L$  e para o capacitor  $C$  (quando  $i_o > V_o/R$ ), e a corrente na entrada aumenta, fluindo através de  $L$  e da carga. Quando a chave pára de conduzir, o diodo  $D$  passa a conduzir, garantindo continuidade da corrente no indutor. A energia armazenada em  $L$  é então, entregue à carga e ao capacitor [33].

Se a corrente no indutor não cair à zero durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo de condução contínua (MCC). Em caso contrário, tem-se o modo de condução descontínua (MCD) [33]. No modo MCC, a relação entre a tensão de entrada,  $V_i$ , e a tensão de saída,  $V_o$ , é dada por:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{t_s}{\tau} \equiv \delta \quad (4.1)$$

onde,

- $t_s$  é o tempo de condução da chave  $S$ ;
- $\tau$  é o período do chaveamento.

Para o caso de a corrente ser nula durante o intervalo  $t_x$  da Figura 4.6, ou seja, operação em MCD tem-se a seguinte relação:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\delta}{1 - \frac{t_x}{\tau}} \quad (4.2)$$

Supondo que a potência de entrada seja igual à potência de saída no MCD, chega-se a:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2.K} \quad (4.3)$$

onde,

$$K = \frac{L.I_0}{v_i \cdot \tau} \quad (4.4)$$

O ciclo de trabalho crítico  $\delta_{crit}$ , que define o limite entre o MCC e o MCD, para um dado  $K$ , é dado por:

$$\delta_{crit} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 8.K}}{2} \quad (4.5)$$

Para  $K > 1/8$  o conversor opera sempre no MCC.

Na Figura 4.6 são mostradas as formas de ondas típicas do MCC e MCD deste conversor.

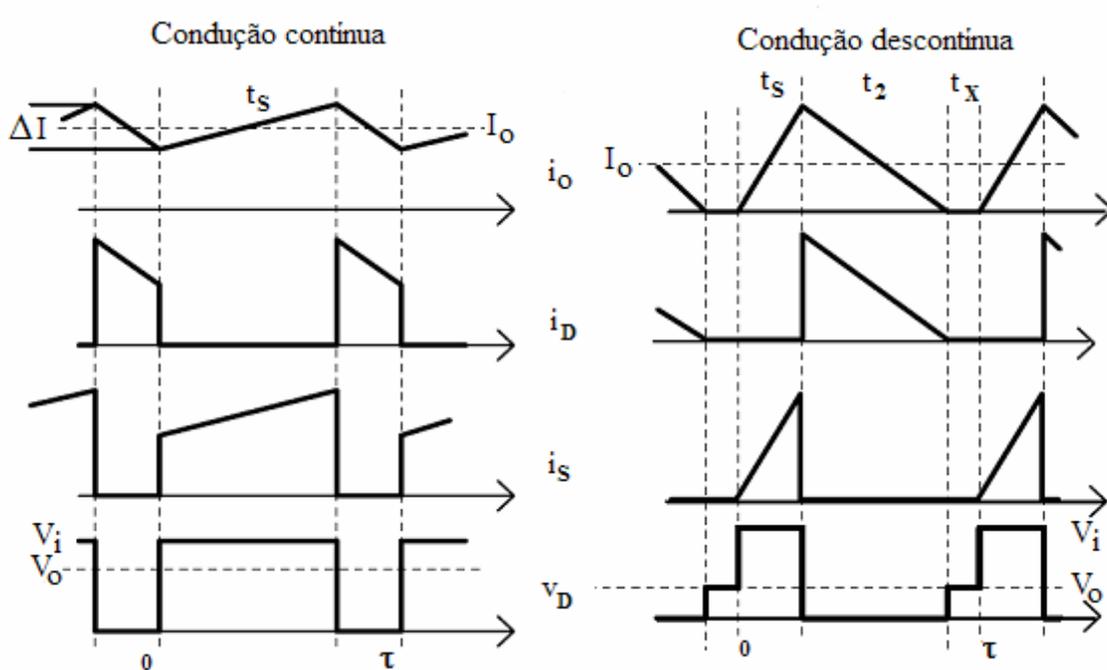


Figura 4.6 – Formas de ondas típicas do modo de condução contínua e descontínua de um conversor Buck.

#### A. Dimensionamento do indutor $L$ e do capacitor de saída $C$

Considerando-se a condição limite entre o MCC e MCD ( $\Delta I = 2I_{o_{\min}}$ ), tem-se:

$$I_{o_{\min}} = \frac{(V_i - V_o) \cdot \tau \cdot \delta}{2L} \quad (4.6)$$

Como o caso deste trabalho em que se deseja que o conversor opere sempre no MCC tem-se:

$$L_{\min} = \frac{V_i \cdot (1 - \delta) \cdot \delta \cdot \tau}{2I_{o_{\min}}} \quad (4.7)$$

Para o cálculo do capacitor de saída, parte-se da máxima variação da tensão,  $\Delta V_o$  para obter:

$$C = \frac{V_o \cdot (1 - \delta) \tau^2}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o} \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 Conversor Boost

A topologia do conversor Boost atua como um elevador de tensão e foi aplicada neste trabalho para elevar a tensão de saída das fontes que alimentam a carga e tornam todas as fontes, como fontes de corrente. A Figura 4.7 mostra uma estrutura típica deste conversor.

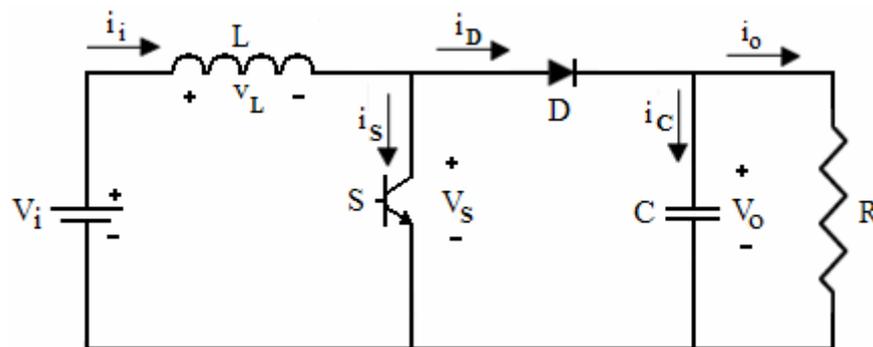


Figura 4.7 – Circuito típico de um conversor Boost.

Quando a chave  $S$  conduz, uma tensão  $V_i$  é aplicada ao indutor  $L$ , enquanto o diodo  $D$  permanece reversamente polarizado, pois  $V_o > V_i$ . A energia é armazenada no indutor, e posteriormente quando a chave deixa de conduzir, esta energia é enviada à carga e ao capacitor. A corrente de saída,  $i_D$ , é sempre descontínua, enquanto a corrente de entrada  $i_i$  pode ser contínua ou descontínua, dependendo do modo de operação empregado [33].

No modo MCC, a relação entre a tensão de saída e a de entrada é dada por:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (4.9)$$

E no modo MCD, tem-se:

$$v_0 = v_i \cdot \frac{1 - \frac{t_x}{\tau}}{1 - \delta - \frac{t_x}{\tau}} \quad (4.10)$$

Reescrevendo em função de variáveis conhecidas, tem-se:

$$v_0 = v_i + \frac{v_i^2 \cdot \tau \cdot \delta^2}{2 \cdot L \cdot I_o} \quad (4.11)$$

A relação entre as tensões da saída e da entrada pode ser reescrita então, como:

$$\frac{v_0}{v_i} = 1 + \frac{\delta^2}{2 \cdot K} \quad (4.12)$$

onde,

$$K = \frac{L \cdot I_o}{v_i \cdot \tau} \quad (4.13)$$

O ciclo de trabalho crítico,  $\delta_{crit}$ , é o mesmo apresentado na equação (4.5).

Nesta dissertação emprega-se um conversor CC/CC, do tipo Boost, entre as fontes geradoras e o barramento CC, devido à baixa tensão disponível nos terminais destes geradores e principalmente para possibilitar a integração das fontes com diferentes níveis de tensão, tornando-as fontes de corrente. Este conversor é controlado para manter constante a corrente  $I_L$  no indutor, em um valor pré-determinado ou através de um algoritmo específico, e assim manter a máxima corrente disponível, enviando à saída a máxima potência.

O projeto do Boost levou em consideração a determinação da indutância,  $L_{Boost}$ , para uma tensão de entrada,  $V_i$ , tensão de saída,  $V_o$ , a ondulação (*ripple*) da corrente do indutor,  $\Delta I_i$  e frequência de chaveamento,  $f_{Boost}$ .

$$L_{Boost} = \frac{V_i}{\Delta I_i \cdot f_{Boost}} - \frac{V_i^2}{\Delta I_i \cdot f_{Boost} \cdot V_o} \quad (4.14)$$

Na Figura 4.8 são mostradas as formas de onda típicas de ambos os modos de operação.

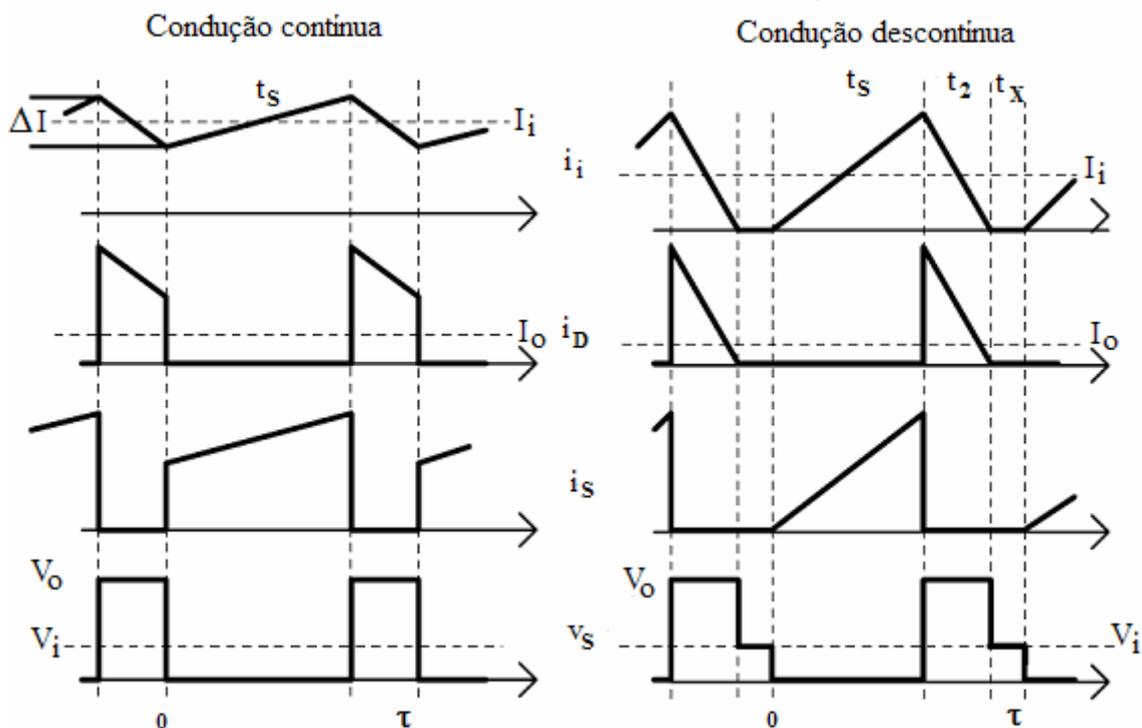


Figura 4.8 – Formas de ondas típicas do modo de condução contínua e descontinua de um conversor Boost.

#### A. Dimensionamento do indutor $L$ e do capacitor da saída $C$

O limiar para a condução descontinua é dado por:

$$I_i = \frac{\Delta I_i}{2} = \frac{v_i t_s}{2L} = \frac{v_i (1-\delta) \delta \tau}{2L} \quad (4.15)$$

e

$$I_o = \frac{\Delta I_i (\tau - t_s)}{2\tau} = \frac{v_i (1-\delta) \delta \tau}{2L} \quad (4.16)$$

Logo

$$L_{\min} = \frac{v_i (1-\delta) \delta \tau}{2I_{o(\min)}} \quad (4.17)$$

Para o cálculo do capacitor deve-se considerar a forma de onda da corrente de saída. Admitindo-se que o valor mínimo instantâneo atingido por esta corrente

seja maior do que a corrente média de saída,  $I_o$ , o capacitor se carrega durante a condução do diodo e fornece toda a corrente de saída durante a condução da chave.

$$C = \frac{I_{o(\max)} \cdot \delta \cdot \tau}{\Delta v_o} \quad (4.18)$$

### 4.3 O Controlador PI

Em um controle em malha fechada como o da Figura 4.9, o controlador é o elemento que tem como entrada um sinal de erro e gera uma saída que se torna a entrada de um outro elemento com a função de corrigir e eliminar este erro.

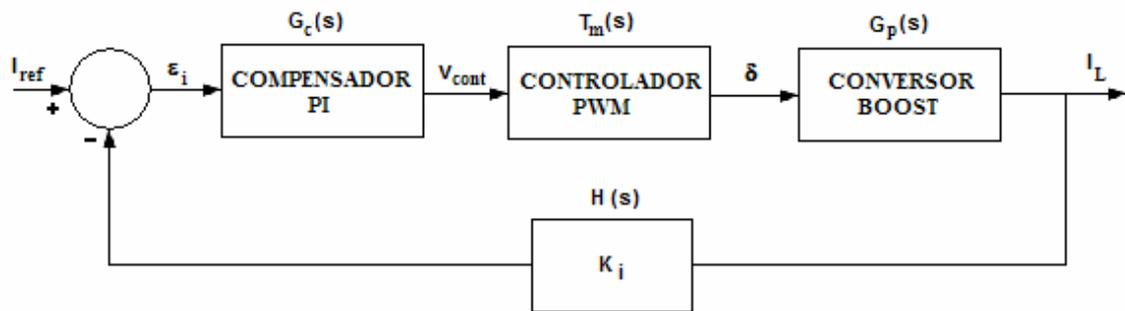


Figura 4.9 – Malha de controle do conversor Boost com compensador PI.

A ação de controle de um controlador PI é definida pela equação (4.22), no domínio do tempo, ou pela equação (4.23), no domínio da frequência, onde  $K_p$  representa o ganho proporcional e  $T_i$  o tempo integral. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de  $K_p$  afeta tanto a parte proporcional como a integral da ação de controle [33]. Os valores  $\varepsilon_i$  e  $V_{cont}$  representam a entrada do erro e a saída do controlador, respectivamente.

$$v_{cont}(t) = K_p \cdot v_e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t v_e(t) dt \quad (4.22)$$

$$\frac{V_{cont}(s)}{V_e(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.23)$$

O controlador PI possui um zero em  $s = -1/T_i$  e um pólo em  $s = 0$ . Portanto a característica do controlador PI é ter ganho infinito em frequência zero, melhorando as características de regime estacionário [33]. Os valores de  $K_p$  e de  $T_i$  devem ser escolhidos para assegurar uma resposta transitória apropriada.

Ao projetar-se adequadamente o controlador PI é possível fazer a resposta transitória a uma entrada em degrau exibir um sobressinal (*overshoot*) relativamente pequeno ou nenhum. Neste último caso, no entanto, a velocidade de resposta será mais lenta, ou seja, altera-se a dinâmica do sistema.

#### 4.4 O Controlador HCC “Hill Climbing Control”

Para melhor aproveitamento das fontes geradoras de energia utiliza-se o algoritmo de controle do tipo “escalada de colina” (HCC). Este algoritmo é utilizado para determinar o ponto de máxima potência gerada pelas fontes que, por intermédio de incrementos ou decrementos, dependendo da condição imposta pelo algoritmo, a referência de controle da corrente altera-se para que seja atingida e injetada no barramento a máxima potência produzida pelos geradores.

A Figura 4.10 demonstra o comportamento do controlador HCC.

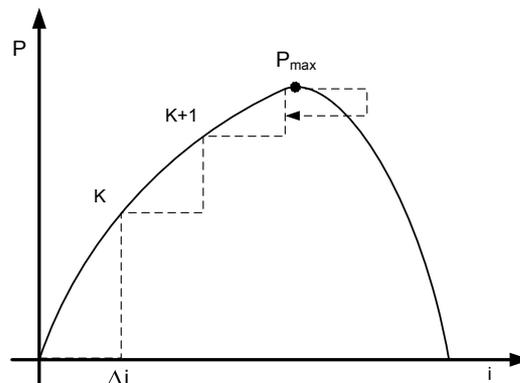


Figura 4.10 – Atuação do controlador HCC

Na Figura 4.11 mostra-se o diagrama de blocos do controlador HCC, o qual apresenta algumas condições iniciais e o modo de operação para determinadas condições de funcionamento e limites estabelecidos de operação impostos pelo algoritmo.

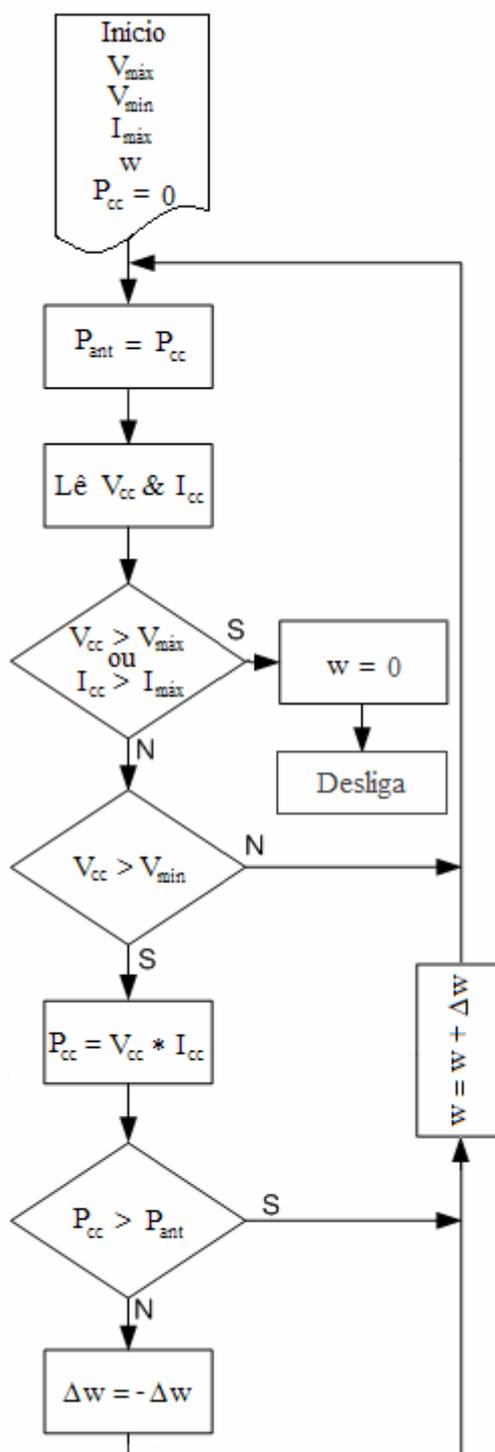


Figura 4.11 - Diagrama de blocos do controlador HCC.

## 4.5 Descrição do Sistema Híbrido Implementado

Neste item serão descritos os circuitos utilizados no SHE implementado, tanto para simulação, como também para o protótipo construído para realização dos testes práticos.

### 4.5.1 A Célula a Combustível

A CaC utilizada como referência na simulação consiste de um gerador SR-12 fabricado pela empresa Avista Labs, cuja potência nominal é 500 Watts. Na Figura 4.12 é mostrada a foto de um cartucho do gerador SR-12, constituído por 4 células. Nesta figura também é mostrada as ligações dos terminais de entrada e saída da CaC.

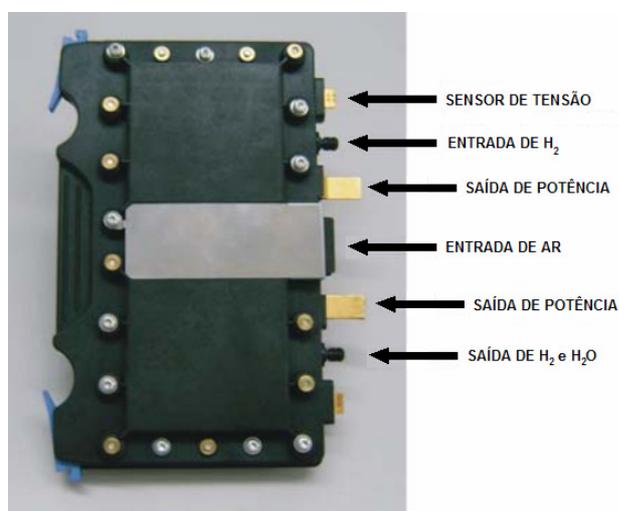


Figura 4.12 – Foto de um cartucho da CaC SR-12 com 4 células.

A Figura 4.13 apresenta um gerador completo de 500 W, que consiste do gerador SR-12, constituído por 12 cartuchos iguais ao da figura anterior totalizando 48 células.



Figura 4.13 – Foto de um gerador SR-12 de 48 células (12 cartuchos)

Para simulação via PSim, foi estabelecido um modelo com as características nominais do gerador utilizado, conforme Figura 4.14 e 4.15. Este modelo é baseado na análise do circuito elétrico equivalente de uma pilha de CaC e em equações típicas de modelos encontrados na literatura [54]. A metodologia utilizada é explicada no Apêndice A.

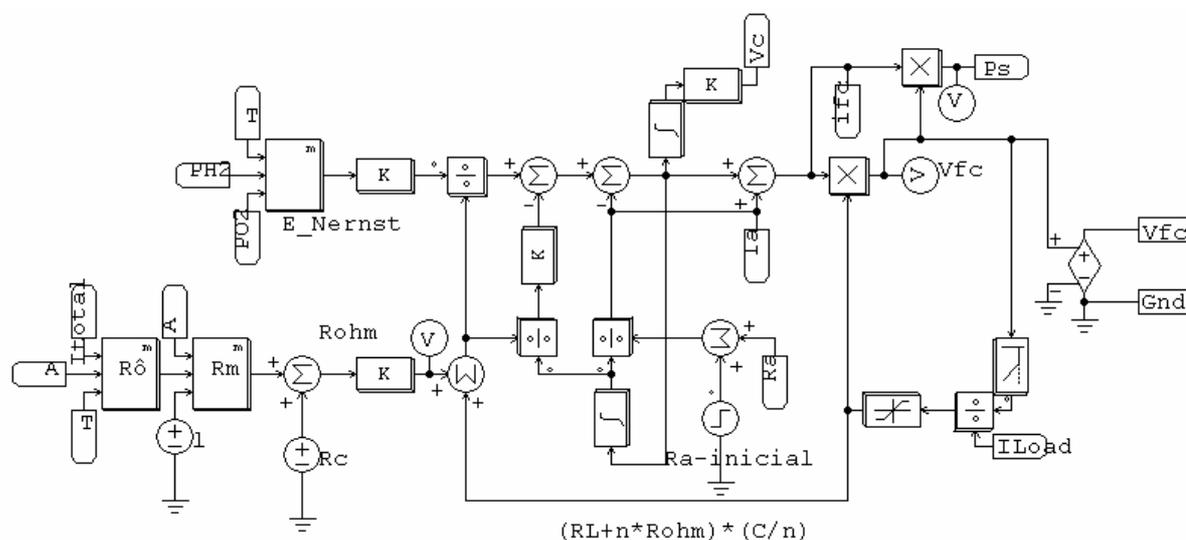


Figura 4.14 – Modelo matemático de uma CaC no PSim .

Com a utilização da fonte de tensão controlada na saída do modelo é possível utilizá-lo para análise do comportamento de CaCs conectadas a outros sistemas de potência, como é o caso deste trabalho que usa um conversor CC-CC.

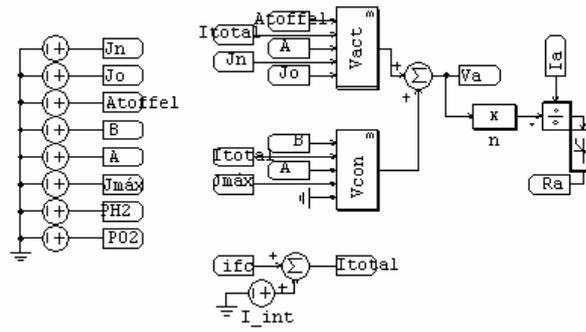


Figura 4.15 – Bloco para cálculo do valor de  $R_a$  e demais parâmetros do modelo.

#### 4.5.2 Controle da Corrente na Célula a Combustível

Para simulação via software (PSim) e para os testes experimentais, foi utilizado um conversor Boost controlado em corrente, conforme a Figura 4.16. Com a realimentação do sinal de saída, a partir de um valor de referência, estabelece-se o chaveamento em 20 kHz, de modo a controlar a corrente no indutor  $I_L$ .

Diferentemente dos conversores dos geradores eólico e fotovoltaico, a referência para o PI deste conversor é fixa e pré-determinada para demandar um valor em torno de 40 % do valor da potência nominal, região onde a CaC apresenta um comportamento essencialmente linear e aparentemente uma melhor relação entre rendimento, potência e vida útil. Para isto é utilizado apenas um sensor de corrente, pois não é utilizado o algoritmo HCC para determinar a máxima potência, prescindindo-se então o sensor de tensão. A potência máxima não é exigida das CaCs pois quando elas operam à máxima potência apresentam uma redução na vida útil, baixo rendimento e consumos exagerado de combustível.

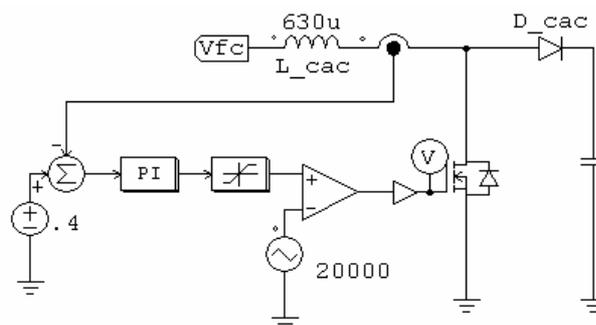


Figura 4.16 – Controle da corrente no conversor Boost e compensador PI da CaC.

Para os testes experimentais referentes à pilha de CaC, foi utilizado um simulador eletroquímico de pilhas de CaC, desenvolvido por Corrêa [11] no laboratório do CEEMA. Este simulador é baseado em um conversor CA-CC controlado por computador através de um programa executado no software Labview® e uma placa de aquisição de dados. Na Figura 4.17 mostra-se uma foto do simulador, onde se tem os terminais de saída de potência e os terminais para conexão na placa de aquisição que controla o mesmo.



Figura 4.17 – Foto do Simulador de pilhas de CaC.

Na Figura 4.18 apresenta-se o esquema básico do simulador de pilhas de CaC, o qual é constituído de um retificador trifásico controlado e acionado por um micro-controlador. A potência de saída segue a referência de um modelo matemático determinada por computador através da medição de tensão e corrente com o auxílio de uma placa de aquisição. Este simulador é explicado com maiores detalhes no Anexo 01.

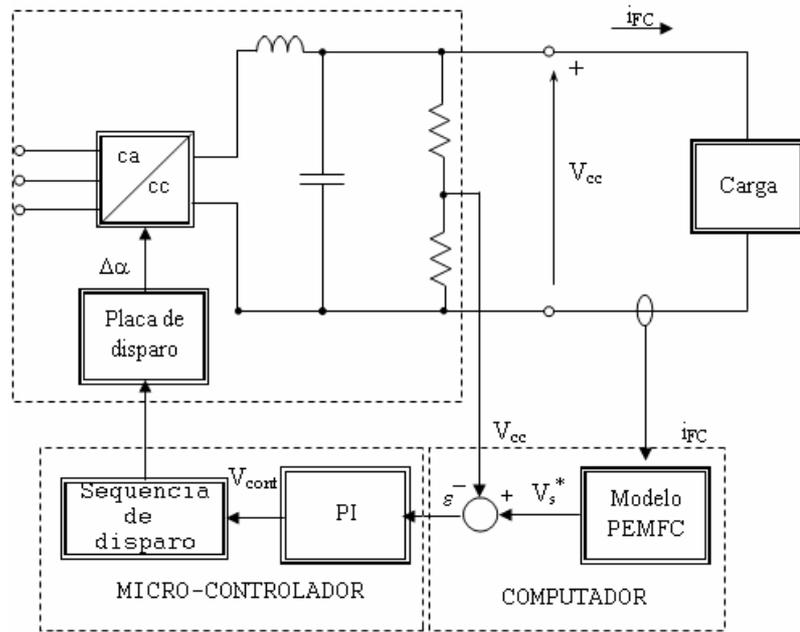


Figura 4.18 – Diagrama de blocos do simulador de pilhas de CaC [11].

#### 4.5.3 O Gerador Eólico

O gerador eólico utilizado como referência na simulação consiste de um gerador trifásico com ímãs permanentes, marca Work Wind modelo WM2.5, cuja potência nominal é 500 Watts e tensão de 24 Volts CA. Para simulação via software, foi estabelecido um modelo com as características nominais do gerador utilizado cujos dados técnicos do equipamento são as seguintes: Potência nominal  $P_{nom} = 500W$  a  $8m/s$ , Gerador: Ímã permanente, Tensão nominal  $V_{nom} = 24V$ , Início da produção:  $3m/s$ , Rotação nominal:  $400rpm$ , conforme dados do fabricante [58].

A Figura 4.19 mostra a curva de potência (W) x velocidade do vento (m/s), reproduzida do manual do gerador eólico WM2.5. Na Figura 4.20 é mostrada a foto do túnel de vento construído no CEEMA para aquisição de dados a fim de implementar o modelo a ser utilizado nas simulações baseado em dados reais. O túnel de vento foi construído em madeira com um ventilador radial acoplado a um motor trifásico controlado por um inversor de frequência com a finalidade de variar a velocidade do ventilador e assim a do vento.

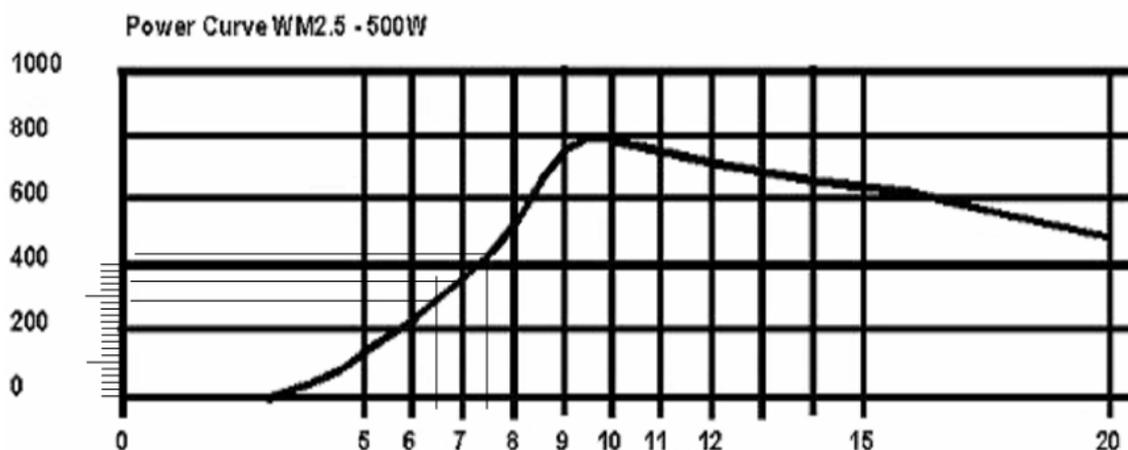


Figura 4.19 – Curva Potência(W) x Velocidade do vento (m/s) do manual do gerador eólico. Fonte: Manual WM2.5



Figura 4.20 – Foto do túnel de vento construído no laboratório do CEEMA.

Na Figura 4.21, são apresentadas as curvas referentes aos dados experimentais obtidos com o túnel de vento para várias velocidades e baseadas na Figura 4.19. Nota-se na Figura 4.21 que em virtude da baixa velocidade de vento obtida com o túnel de vento têm-se baixas potências. Como o protótipo implementado também é para baixas potências, os dados obtidos são suficientes para este propósito.

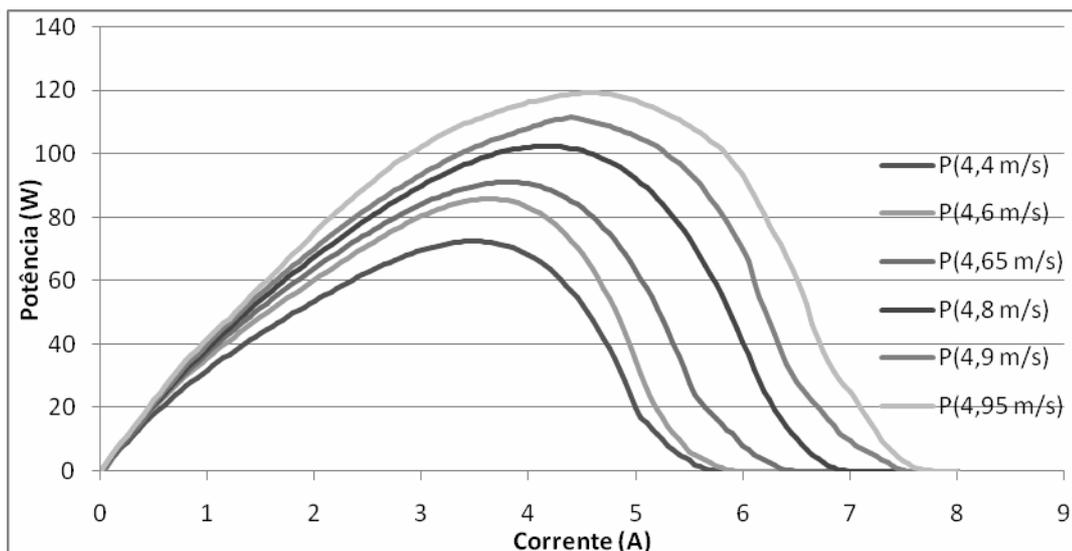
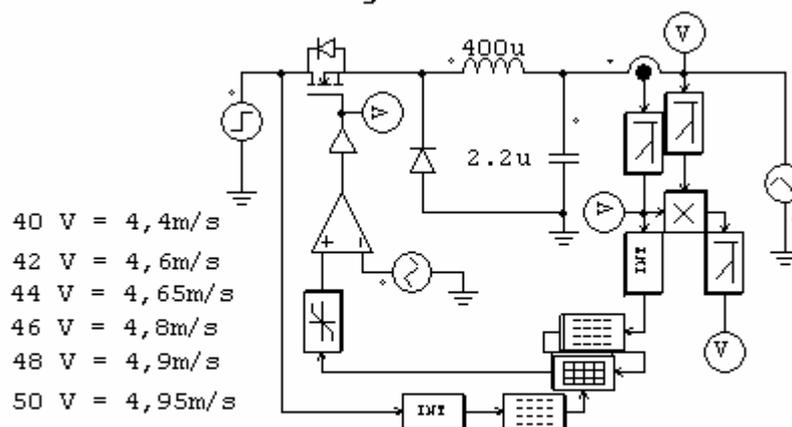


Figura 4.21 – Curva de potência obtida com base nos dados reais do gerador WM2.5.

Com os dados obtidos e as curvas da Figura 4.21 foi implementado no PSim o modelo da Figura 4.22 para simular o comportamento do gerador utilizado. Este modelo é representado por um conversor Buck no qual a potência de saída é expressa em função da corrente demandada pela carga.

#### Simulador do gerador eólico WM2.5 - 500W



A tensão de entrada corresponde a velocidade do vento de acordo com a curva de potência do manual e dados experimentais do gerador WM500

Figura 4.22 – Modelo de simulação do Gerador Eólico WM2.5.

#### 4.5.4 Controle da Corrente do Gerador Eólico

Para simulação via software (PSim) e para os testes experimentais, foi utilizado novamente um conversor do tipo Boost controlado em corrente, conforme a Figura 4.23. Com a realimentação, a partir de um valor de referência, estabelece-se o chaveamento em 20 kHz, de modo a controlar a corrente no indutor  $I_L$ .

A tensão e corrente resultantes na saída do modelo do gerador são chaveadas, pois, são provenientes de um conversor Buck. Através de um sensor de tensão e outro de corrente são medidas estas grandezas e calculada a potência média. Por intermédio do algoritmo HCC [52], é determinado qual o máximo valor de corrente que pode ser fornecida ao barramento. Esta corrente para a máxima potência é calculada pelo HCC e é considerada como a referência para o PI de corrente. Para o protótipo o controle do Boost e do HCC é realizado por um único DSP da família 56F83XX da Freescale.

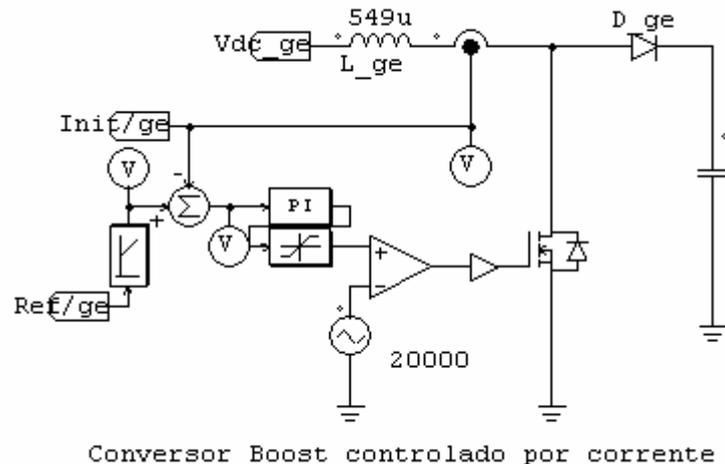


Figura 4.23 – Modelo de simulação do conversor Boost e compensador PI do gerador eólico

#### 4.5.5 O Gerador Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico utilizado como referência nas simulações consiste de dois painéis fotovoltaicos, marca Siemens Solar Industries, modelo Pro 4JF, cuja

potência máxima é 75 Watts, composto por 36 células cada, e uma foto do mesmo é apresentado na Figura 4.24.

Dados técnicos do equipamento: Potência máxima  $P_{m\acute{a}x} = 75W$ , Tensão de circuito aberto  $V_{oc} = 22V$ , Corrente de curto-circuito  $I_{sc} = 4,8A$ , Tensão nominal  $V_{nom} = 17V$ , Corrente nominal  $I_{nom} = 4,4A$ .

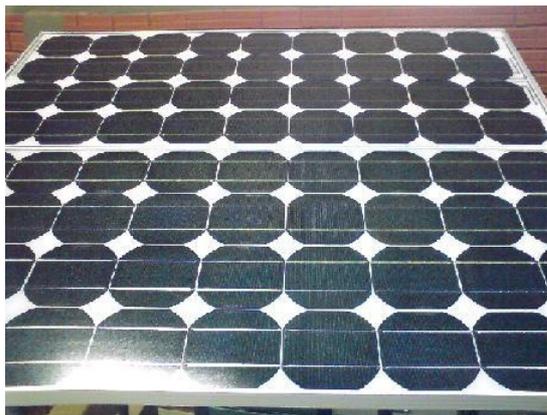


Figura 4.24 – Foto do gerador fotovoltaico utilizado.

A Figura 4.25 mostra as curvas de tensão (V) e potência (W) x corrente do painel (A), obtidas através de testes práticos realizados no CEEMA. Com esses dados foi possível obter os parâmetros das células as quais constituem os painéis, através de uma metodologia proposta por Farret [01] para implementação do modelo de gerador fotovoltaico.

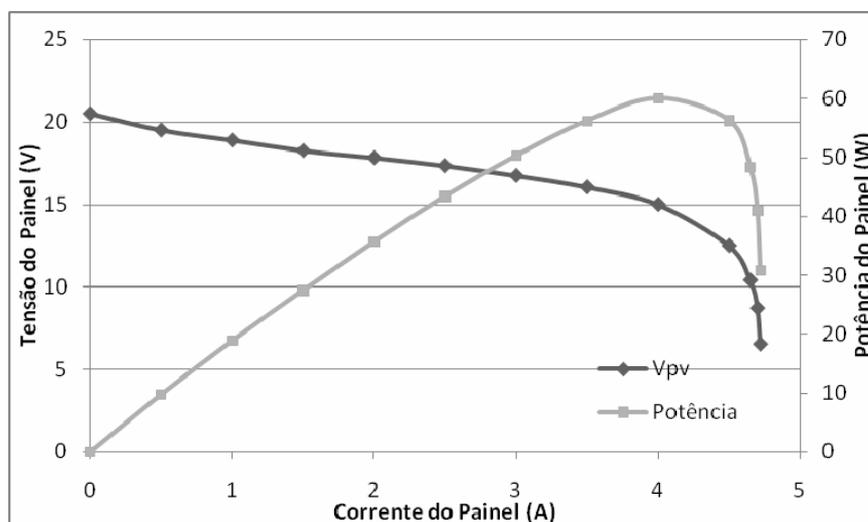


Figura 4.25 – Curvas práticas de Tensão e Potência x Corrente.

Do mesmo modo que para a CaC e para o gerador eólico, foi estabelecido um modelo de simulação do gerador fotovoltaico conforme a Figura 4.26 de [53] baseado nas características nominais do gerador utilizado e em equações semi-empíricas e cálculos iterativos para obtenção dos valores dos parâmetros utilizados.

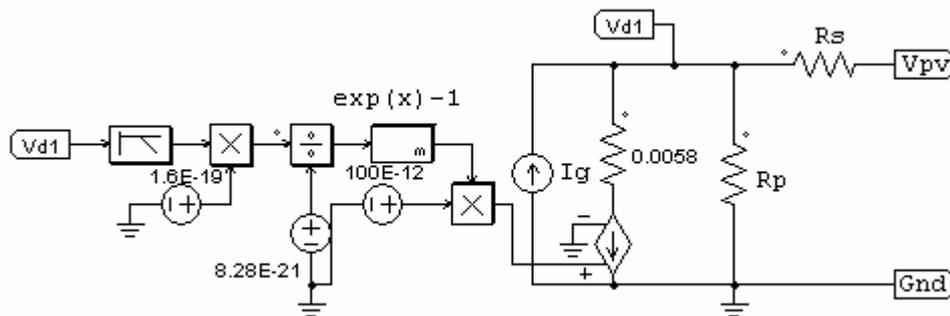
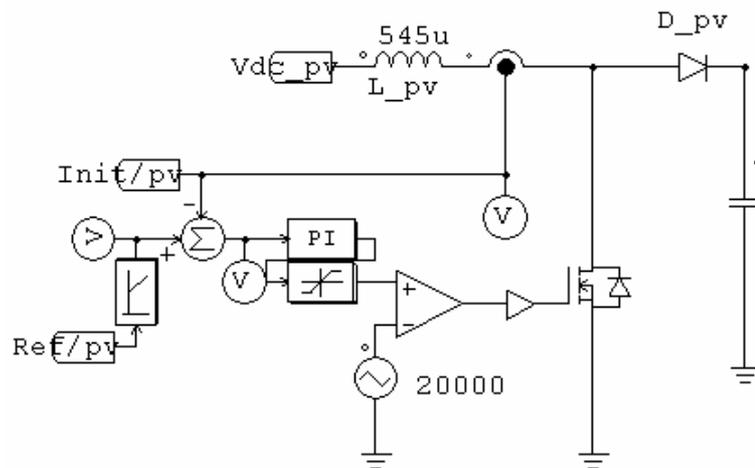


Figura 4.26 – Modelo de simulação do Gerador Fotovoltaico Siemens Pro 4JF.

#### 4.5.6 Controle da Corrente do Gerador Fotovoltaico

Para simulação via software e para os testes experimentais, foi utilizado novamente um conversor Boost controlado em corrente, conforme a Figura 4.27. Da mesma forma que para a CaC e o gerador eólico, o sinal de saída é realimentado e a partir de um valor de referência, estabelece-se o chaveamento a 20 kHz, de modo a controlar a corrente no indutor  $I_L$ .

Através de um sensor de tensão e outro de corrente estas grandezas são medidas. A partir delas calcula-se a potência média, com auxílio do algoritmo HCC, é determinado qual o máximo valor de corrente que pode ser fornecida ao barramento. Esta corrente máxima é considerada como a referência para o PI da mesma forma como foi realizado para o gerador eólico.



Conversor Boost controlado por corrente

Figura 4.27 – Modelo de simulação do conversor Boost e compensador PI do gerador fotovoltaico

#### 4.5.7 O Banco de Baterias

O banco de baterias utilizado como referência nas simulações desta dissertação é constituído por um capacitor em série com uma resistência (representando a capacidade de carga equivalente do banco de baterias). O banco de baterias apresenta um comportamento de carga e descarga semelhante ao das baterias comuns de chumbo-ácido, associado a um resistor série, que representa a resistência interna das baterias. Esse modelo simplificado, conforme mostrado na Figura 4.28 é citado por Rinkiewickz [55]. Um modelo semelhante é mostrado no trabalho de Andersen [30]. Apesar da simplicidade deste modelo ele é adequado para o objetivo deste trabalho.

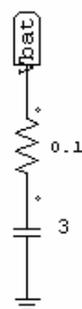


Figura 4.28 – Modelo de simulação do banco de baterias.

#### 4.5.8 Controle da Tensão do Banco de Baterias

O circuito controlador de tensão do banco de baterias é constituído por um conversor do tipo Buck-Boost como mostrado na Figura 4.29. O controlador possui um sensor de tensão que verifica o estado de carga das baterias e envia o sinal para o controle poder decidir se aciona o Buck ou o Boost ou se mantém ambos desligados.

Por intermédio do software de controle, através dos valores de corrente disponível no barramento, estabelece-se um processo de controle de carga e descarga com o propósito de prover proteção contra níveis de tensões muito elevados ou muito baixos e contra correntes excessivas a fim de garantir maior vida útil à bateria. Essa corrente de carga e/ou descarga não deve exceder 10% da capacidade do banco de baterias [56].

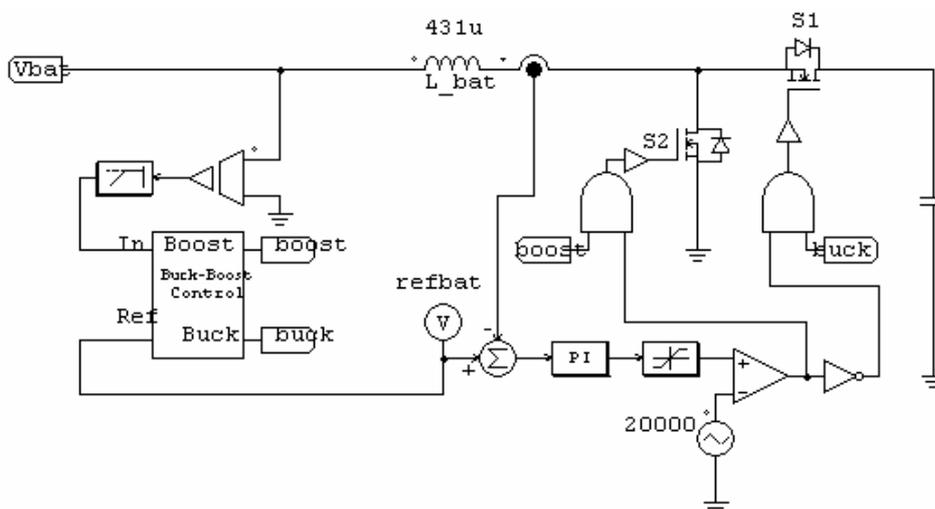


Figura 4.29 – Conversor Buck-boost e compensador PI do banco de baterias.

Existem quatro situações mais significativas, as quais devem ser consideradas para que se possa prever o estado de carga das baterias com base em alguns valores definidos pela literatura. Os estados da bateria são apresentados abaixo e os valores considerados são em Volts/elemento (V/e) [57].

- *Descarga ou Corte:*  $V_{bat} < 1,75 \text{ V/e}$ .
- *Flutuação ou Normal:*  $V_{bat} \sim 2,20 \text{ V/e}$ .

- *Equalização ou Recarga*:  $V_{\text{bat}} \sim 2,40 \text{ V/e}$ .
- *Sobretensão ou Sobrecarga*:  $V_{\text{bat}} > 2,70 \text{ V/e}$ .

A seguir são expostos de forma breve essas quatro situações, denominadas estados.

Estado de Descarga ou Corte: é a tensão na qual a bateria é considerada descarregada. Uma descarga maior pode causar danos irreversíveis à bateria através do processo de sulfatação.

Estado de Flutuação ou Normal: é a tensão na qual a bateria mantém-se carregada. Este valor é dependente do aumento da temperatura e diminui aproximadamente  $-5\text{mV}/^\circ\text{C}$ .

Estado de Equalização ou Recarga: é a tensão na qual a bateria passa do estado de recarga para o estado de flutuação. Este valor também depende da temperatura e da corrente de carga.

Estado de Sobretensão ou Sobrecarga: é a tensão na qual a bateria encontra-se em estado de sobrecarga. Deve-se observar este valor, pois pode ocorrer gaseificação ocasionando danos à bateria.

#### 4.6 Controle da Tensão na Carga Principal

A corrente total resultante no barramento CC, dada pelas contribuições individuais das fontes integrantes do SHE, é aplicada na carga principal do barramento ( $R_{L1} + R_{L2}$ ) conforme mostrado na Figura 4.30. Para realizar o controle da tensão no barramento utiliza-se uma carga secundária em paralelo ( $R_{L\_sec}$ ) com a carga principal. O controle da corrente na carga secundária, ajusta o valor de tensão no barramento CC e conseqüentemente, na carga principal, pela modulação do valor eficaz da carga secundária, ou seja,,  $V_{BUS} = I_{total} \cdot [(R_{L1} + R_{L2}) + R_{L\_sec}]$ .

Nas simulações, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 4.28, onde um sensor de tensão obtém o nível da tensão no barramento CC, que é então comparado com o valor de referência, foi escolhido neste caso 50V. Através de um PWM, realiza-se o chaveamento do semiconductor em série com a carga secundária representada por ( $R_{L\_sec}$ ). Esse chaveamento na carga secundária produz um valor

médio de resistência, que varia de um valor elevado (teoricamente um circuito aberto) até o valor nominal da carga ( $R_{L\_sec}$ ). A energia drenada para a carga secundária pode ser reaproveitada para diversos fins como aquecimento, resfriamento, armazenamento de energia, produção de hidrogênio, irrigação, retro-bombeamento ou mesmo aproveitamento direto.

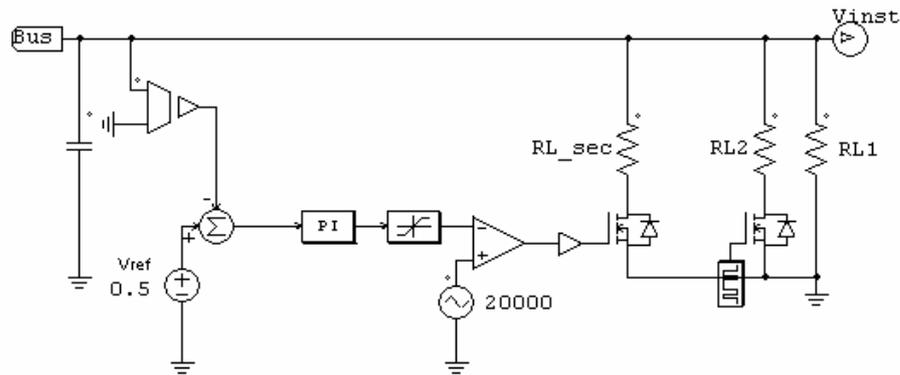


Figura 4.30 – Circuito de controle da tensão no barramento CC.

## 4.7 Resumo

Este capítulo apresentou um breve comentário sobre os conversores utilizados nesta dissertação. Foram apresentados todos os componentes envolvidos no SHE e os modelos utilizados para as simulações. Também é apresentado o modelo de cada fonte de geração de energia utilizado, com as características específicas de cada gerador. Cada modelo foi explicado separadamente bem como a forma de determinação destes.

Para finalizar este capítulo, foram apresentados os modelos dos circuitos dos conversores, bem como, o controle utilizado individualmente para cada gerador e o controle desenvolvido para manter constante a tensão no barramento. É mostrado também o funcionamento do controlador HCC.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÕES

---

### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das simulações realizadas em computador e de testes experimentais realizados em laboratório. Nas simulações foi utilizado o software PSIM (Power Simulator) da SIMCAD. Para os testes de laboratório foi utilizado um protótipo em escala reduzida de um SHE.

As condições estabelecidas no projeto para a variação da corrente do indutor e tensão no barramento CC e que devem ser garantidas são as seguintes:

- $\Delta I_{L\_CaC} \leq 10\%$
- $\Delta I_{L\_ge}, \Delta I_{L\_pv}$  e  $\Delta I_{L\_bat} \leq 20\%$
- $V_{BUS} = 50V$

### 5.2 Resultados das Simulações

Utilizando o modelo do SHE, foram simuladas algumas condições comumente encontradas na prática como variação de potência das fontes geradoras e variações de carga. Com esses resultados foi possível analisar a respostas das várias grandezas envolvidas, como tensão e corrente nos geradores e tensão e corrente de saída e em especial o comportamento da pilha de CaC para essas condições.

A análise do comportamento transitório das fontes geradoras de energia é o foco destas simulações para as condições especificadas.

### 5.2.1 Regime Permanente

Os resultados de simulação da análise em regime permanente são mostrados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Na Figura 5.1 mostra-se a forma de onda da corrente no indutor do conversor Boost para a CaC. Podem-se observar uma ondulação (*ripple*) em torno de 10 % como projetada quando chaveado em 20 kHz.

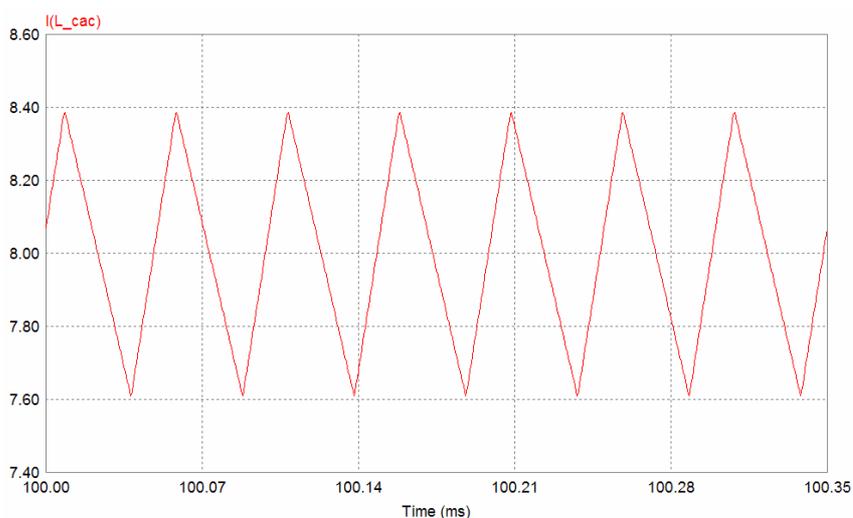


Figura 5.1 - Forma de onda simulada da corrente no indutor do Boost da CaC.

Na Figura 5.2 são mostradas as correntes nos indutores de todas as fontes do SHE, CaC, Gerador eólico(ge), gerador fotovoltaico(pv) e baterias.

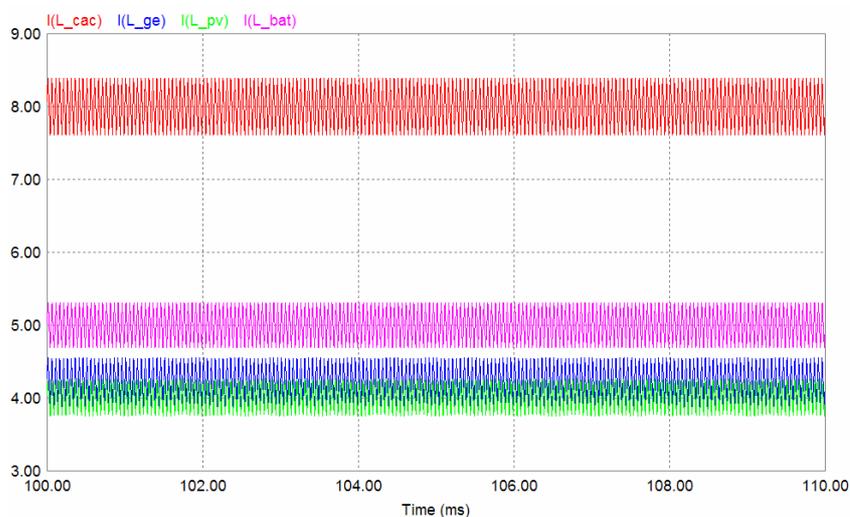


Figura 5.2 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.

A Figura 5.3 apresenta (em verde) o somatório das potências de todos os geradores do sistema, ou seja, as potências da CaC ( $P_{cac}$ ), do gerador eólico ( $P_{ge}$ ), do gerador fotovoltaico ( $P_{pv}$ ) e do banco de baterias ( $P_{bat}$ ). A forma de onda (em vermelho) no gráfico da Figura 5.3 representa a potência dissipada na carga secundária e (em azul) é mostrada a potência na carga principal.

Pela análise visual desta figura pode-se perceber que a soma da potência da carga principal e da carga secundária é aproximadamente igual à soma das potências dos geradores.

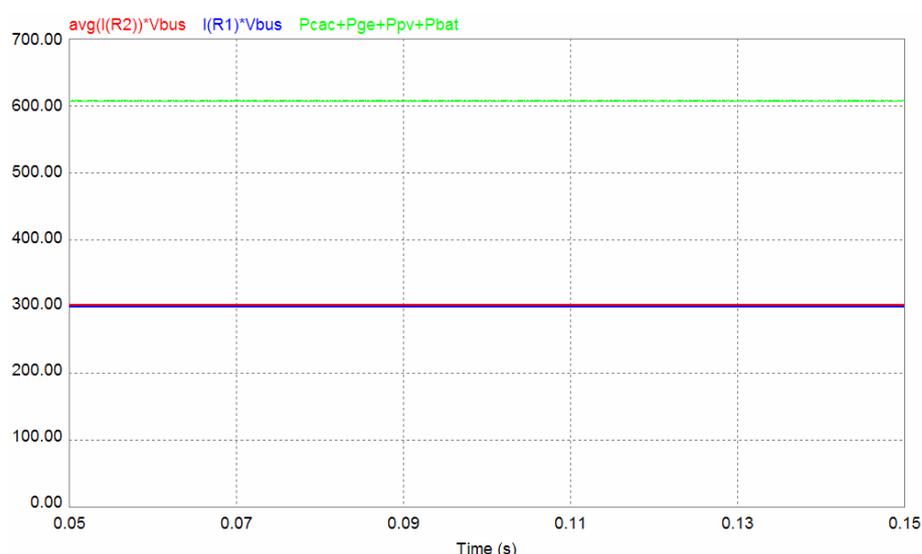


Figura 5.3 – Potência dos geradores e das cargas principal e secundária.

Apesar de no gráfico da Figura 5.3 a potência na carga secundária ser maior inclusive que a potência na carga principal, esta situação não deve ocorrer na prática, pois, será desligado o banco de baterias e/ou a CaC para economia de energia e combustível, pois a carga secundária deve apenas atuar de forma a controlar a tensão do barramento CC.

### 5.2.2 Incremento de 20% na Carga Principal

Os resultados de simulação para a variação da carga principal com o aumento de 20% são mostrados nas Figuras 5.4 a 5.10. Na Figura 5.4 é mostrado o transitório ocasionado pelo aumento da corrente na carga principal juntamente com a variação na carga secundária. Nota-se que após o aumento da carga principal ocorre uma diminuição no valor eficaz da carga secundária. Isto pode ser verificado pela redução no intervalo de condução na chave responsável pelo controle de tensão no barramento e no seu valor médio.

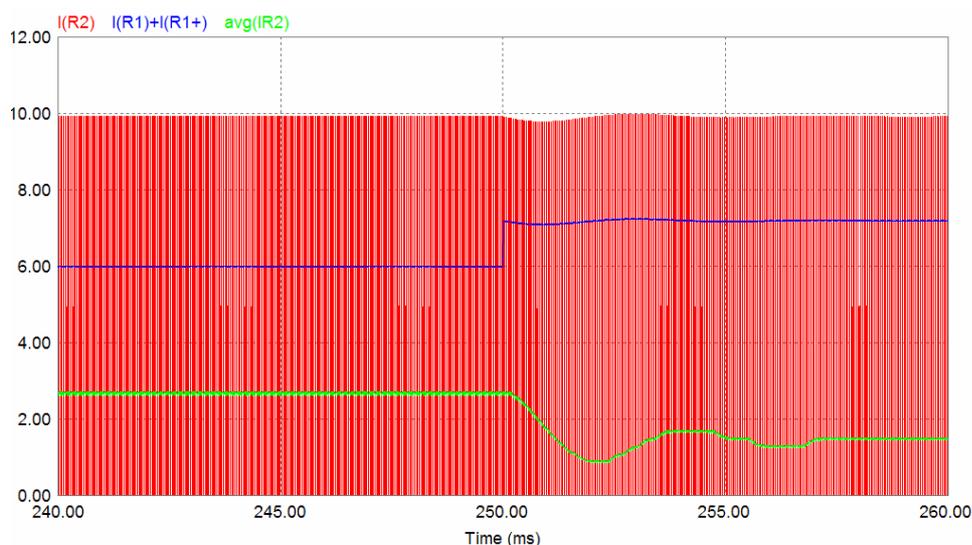


Figura 5.4 – Corrente nas cargas principal e secundária

Na Figura 5.5 é mostrado o transitório da tensão do barramento CC devido ao aumento na carga principal, este valor tem uma redução súbita, mas logo retorna ao valor definido na referência (50V) devido a atuação do controle que é observado na Figura 5.4 pela diminuição no valor eficaz da corrente da carga secundária.

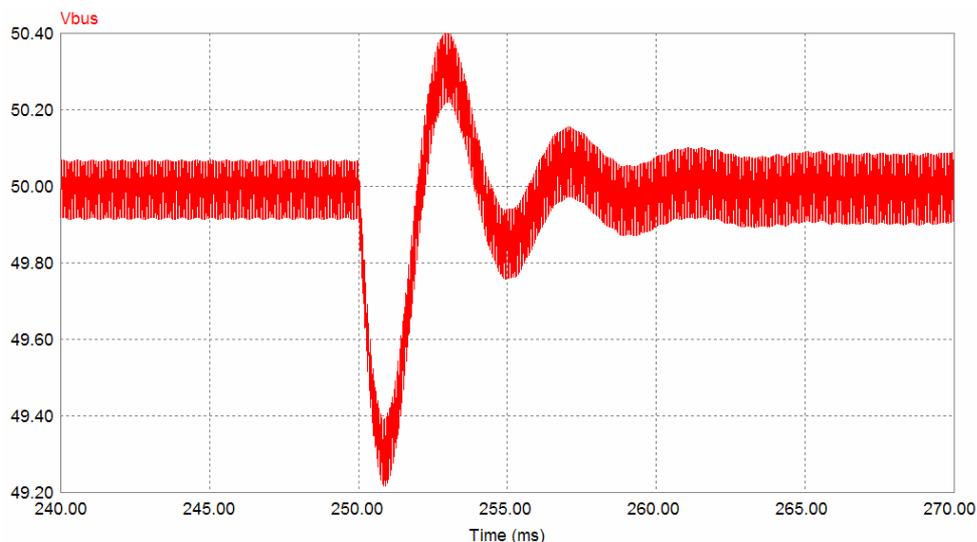


Figura 5.5 – Transitório da tensão no barramento CC para inserção de carga.

Na Figura 5.6 são mostradas as correntes nos indutores de todas as fontes do SHE desta condição de incremento de carga, CaC, gerador eólico(ge) e gerador fotovoltaico(pv). Há uma pequena oscilação nas correntes dos indutores dos conversores durante o transitório, visto que a dinâmica do controle atua rapidamente para a estabilidade do sistema.

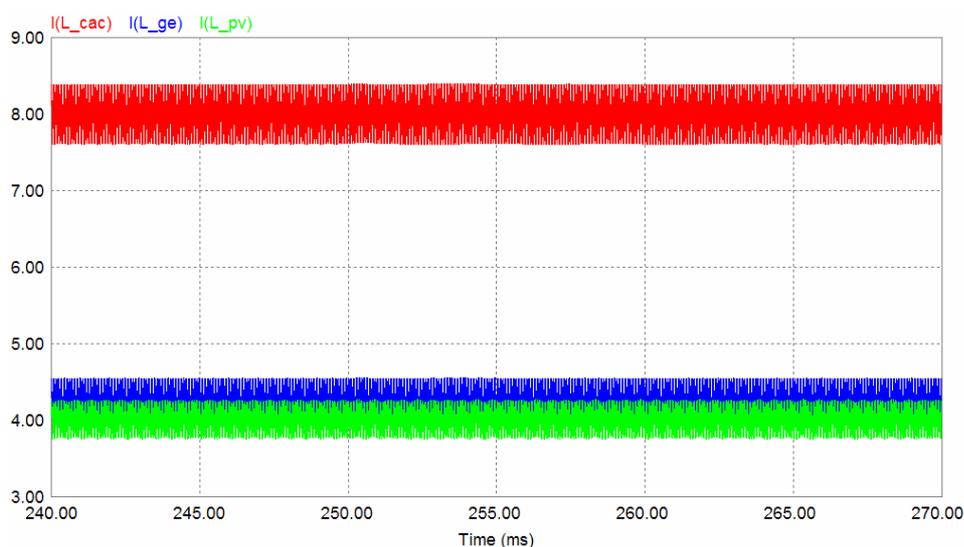


Figura 5.6 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.

Na Figura 5.7 é apresentado o comportamento das potências das fontes para um aumento de carga. Vê-se que o gerador fotovoltaico apresenta uma oscilação

levemente maior em relação aos outros geradores. Isto pode ser explicado pelas diferentes dinâmicas dos geradores.

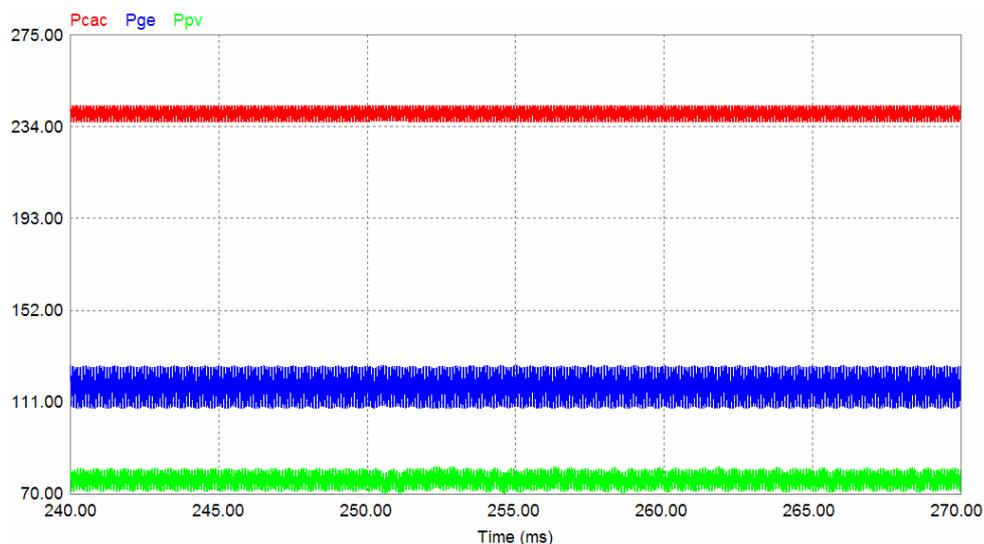


Figura 5.7 – Potência dos geradores do SHE.

A corrente no indutor do conversor da CaC é mostrado separadamente na Figura 5.8, onde nota-se uma ondulação (*ripple*) inferior a 10% no valor nominal de operação (8 A), como especificado no projeto, e o transitório da corrente para um aumento de 20% da carga principal em 250 ms.

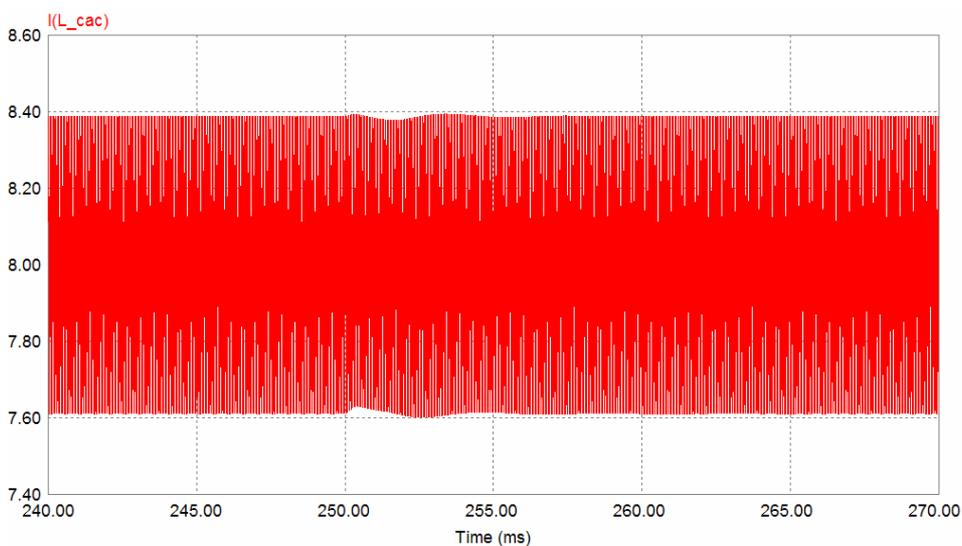


Figura 5.8 – Corrente no indutor do conversor da CaC.

Na Figura 5.9 mostra-se a tensão nos terminais da CaC onde se verifica o comportamento desta tensão durante o transitório para um acréscimo de carga. A tensão apresentou uma ondulação (*ripple*) menor que 3,4% para esta condição de operação. A Figura 5.10 mostra o transitório refletido na corrente dos terminais da CaC, comportamento semelhante ao da tensão, porém complementar, mantendo o produto  $V_{xI}$  constante, pois o ponto de operação da CaC é fixo, como já mencionado anteriormente.

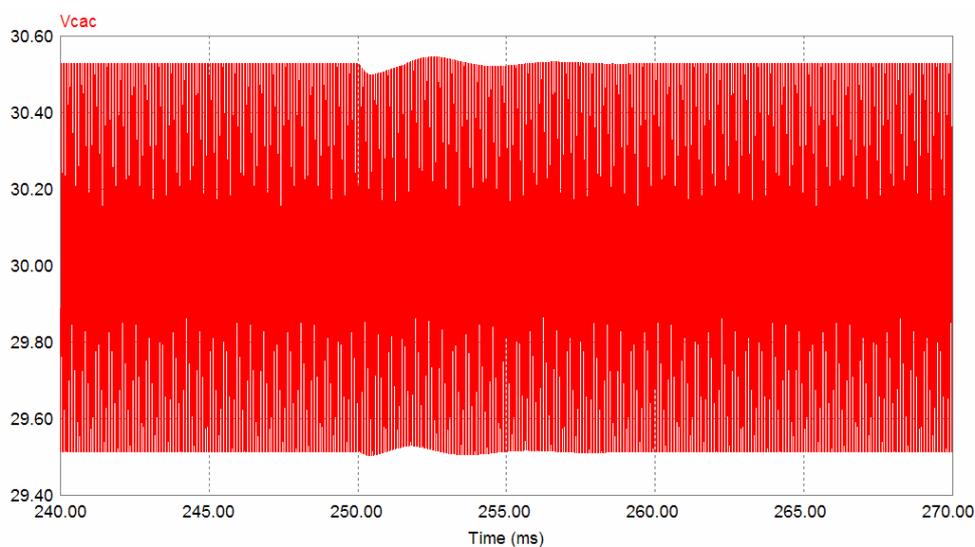


Figura 5.9 – Tensão nos terminais da CaC.

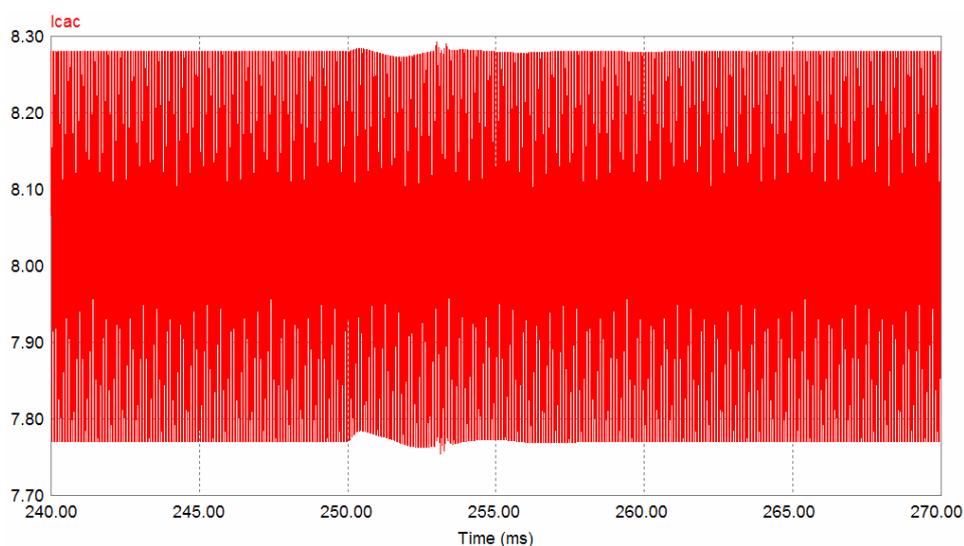


Figura 5.10 – Corrente nos terminais da CaC

### 5.2.3 Retirada de 20% da Carga Principal

Os resultados das simulações para 20% de redução na carga principal são mostrados nas Figuras 5.11 a 5.17. Na Figura 5.11 mostra-se a redução da corrente na carga principal (em azul) e a corrente na carga secundária (em vermelho). A corrente na carga secundária aumenta durante o transitório pela redução na tensão do barramento CC. Nota-se que o período de chaveamento da carga secundária também aumenta com a redução de carga. Isto é verificado com o aumento do valor médio da corrente na carga secundária (em verde).

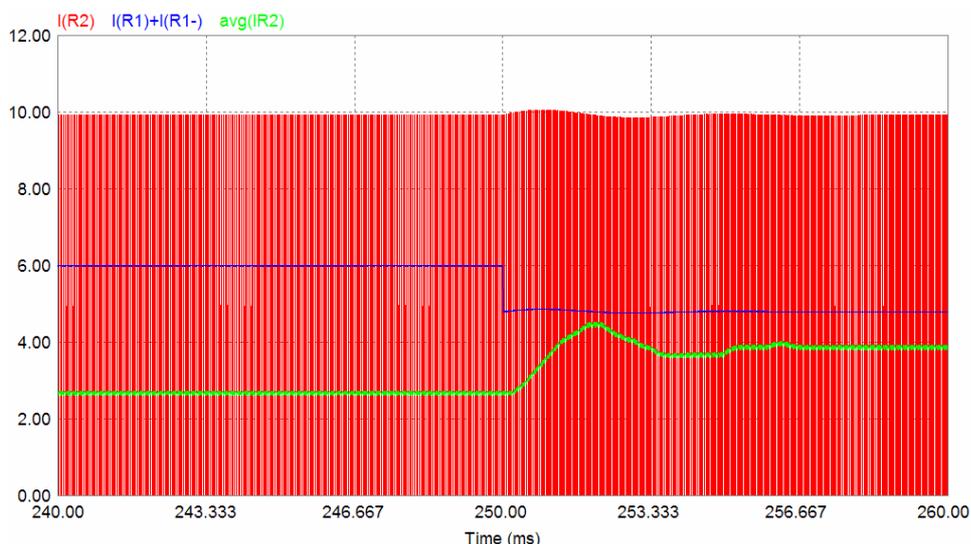


Figura 5.11 – Corrente nas cargas principal e secundária.

Na Figura 5.12 é apresentado o comportamento da tensão do barramento CC durante o transitório devido à diminuição de 20% na carga principal. Este valor tem uma elevação em sua amplitude em aproximadamente 15ms estabilizando no valor definido como referência (50V) devido a atuação do controle. Observa-se isto na Figura 5.11 pelo aumento no valor eficaz da corrente da carga secundária.

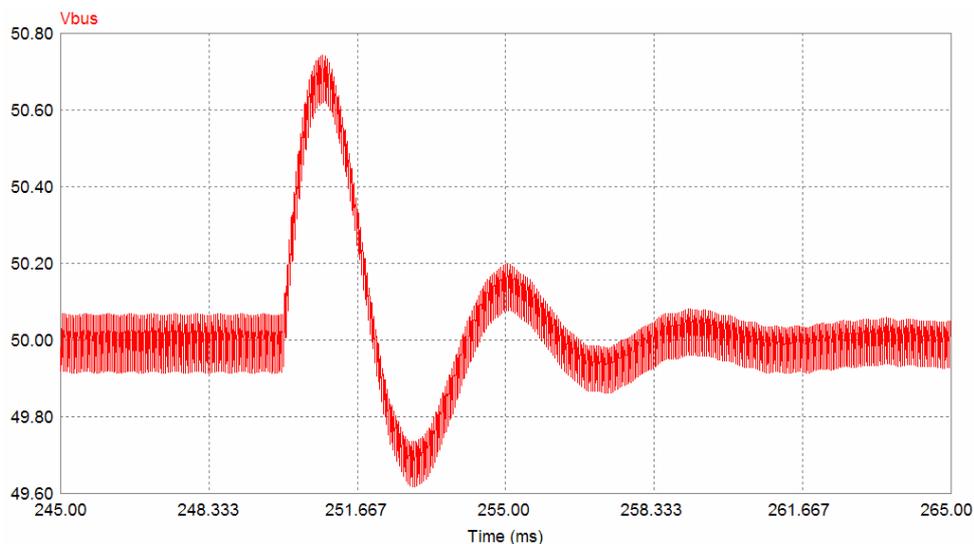


Figura 5.12 – Transitório da tensão no barramento CC para retirada de carga.

Na Figura 5.13 são mostradas as correntes nos indutores de todas as fontes do SHE. Nota-se um efeito maior da ondulação (*ripple*) sobre a corrente do gerador eólico, possivelmente pela dinâmica deste gerador e uma atuação pouco significativa sobre a CaC, que novamente deve-se a característica deste gerador.

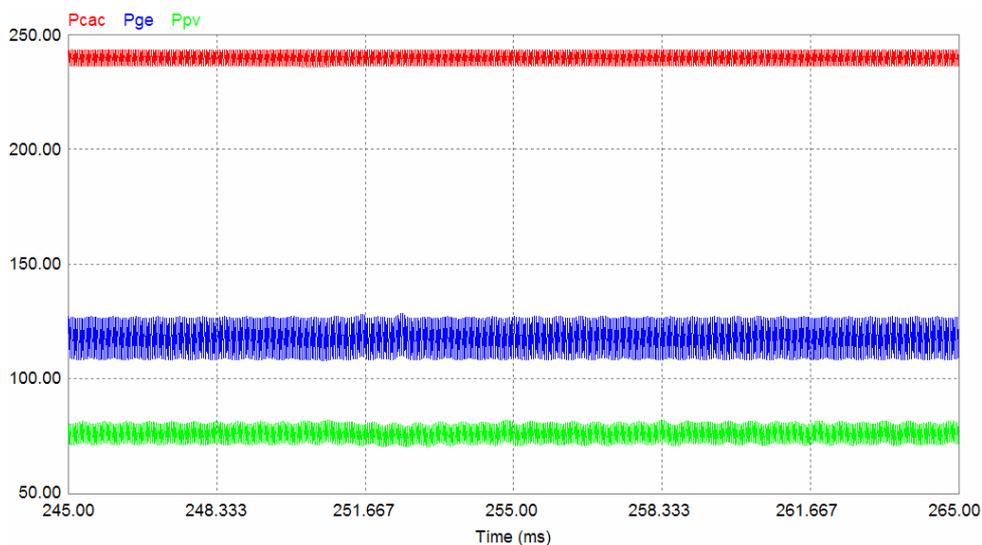


Figura 5.13 – Potência dos geradores do SHE.

A corrente no indutor do conversor conectado a CaC é mostrado isoladamente na Figura 5.14, onde nota-se uma ondulação (*ripple*) inferior a 10% do valor nominal de operação (8 A), como projetado, e o comportamento da corrente durante o transitório para a retirada de 20% da carga principal.

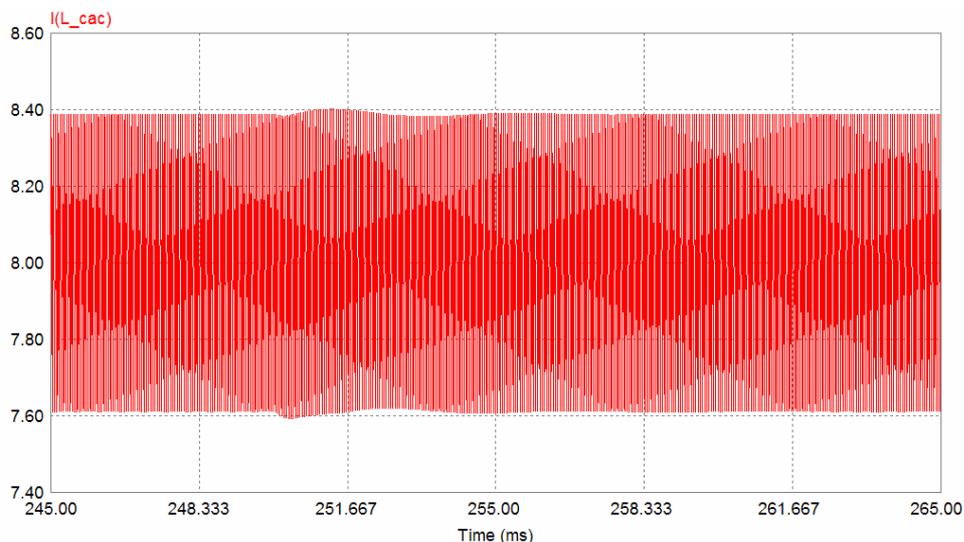


Figura 5.14 – Corrente no indutor do conversor da CaC.

Na Figura 5.15 são mostradas as correntes nos indutores de todas as fontes do SHE durante o transitório de redução de carga. Há uma pequena oscilação nas correntes dos indutores dos conversores durante este transitório, visto que a dinâmica do controle atua rapidamente (aproximadamente 10ms) para garantir a estabilidade do sistema.

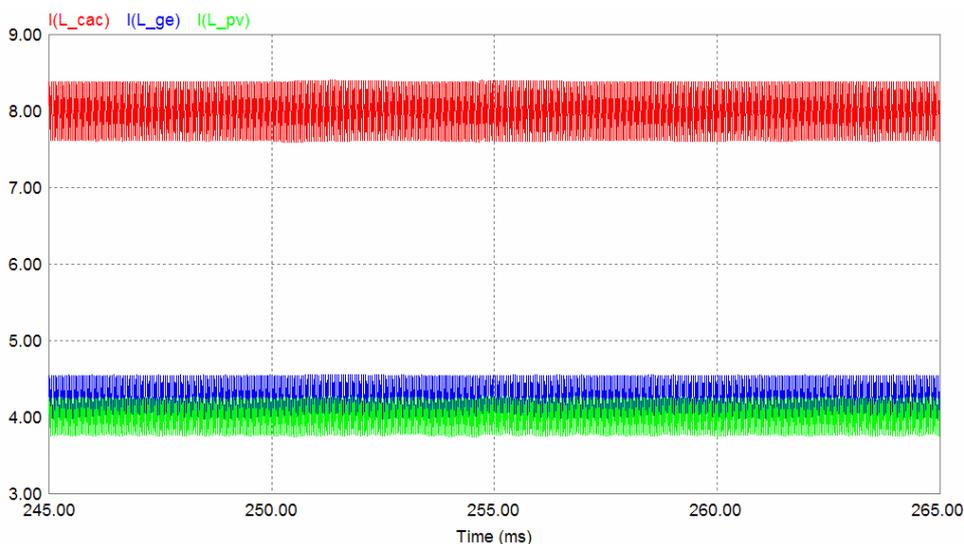


Figura 5.15 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.

Nas Figuras 5.16 e 5.17 são mostrados os comportamentos da tensão e da corrente respectivamente nos terminais da CaC. A tensão apresentou uma

ondulação menor que 3,4% tanto quanto para a condição de inserção de carga. A corrente da (Figura 5.17) apresenta o mesmo comportamento da tensão, porém ao contrário da inserção de carga que ocasionava inicialmente um aumento na amplitude da corrente. Para retirada de carga há uma redução na sua amplitude com a mesma dinâmica (aproximadamente 10ms) para estabilizar no valor de referência (8 A).

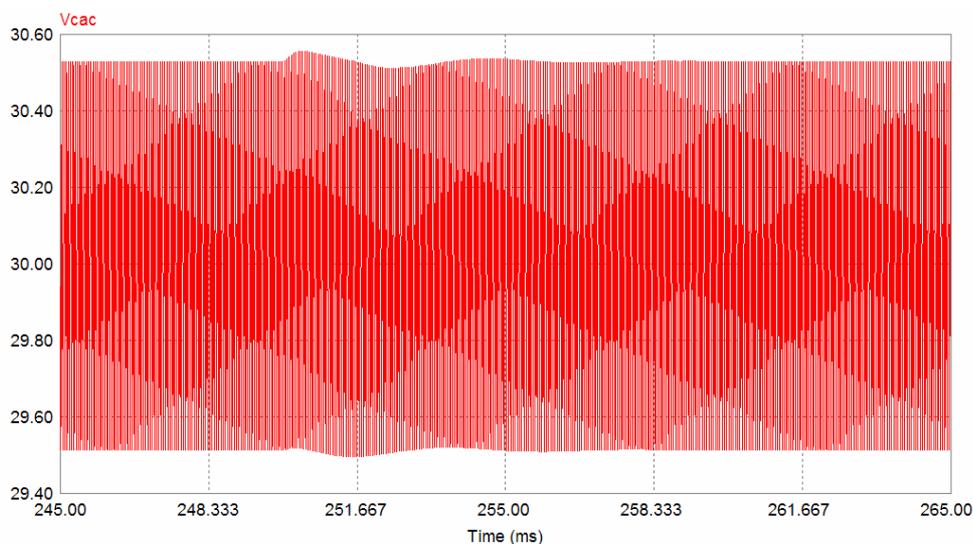


Figura 5.16 – Tensão nos terminais da CaC.

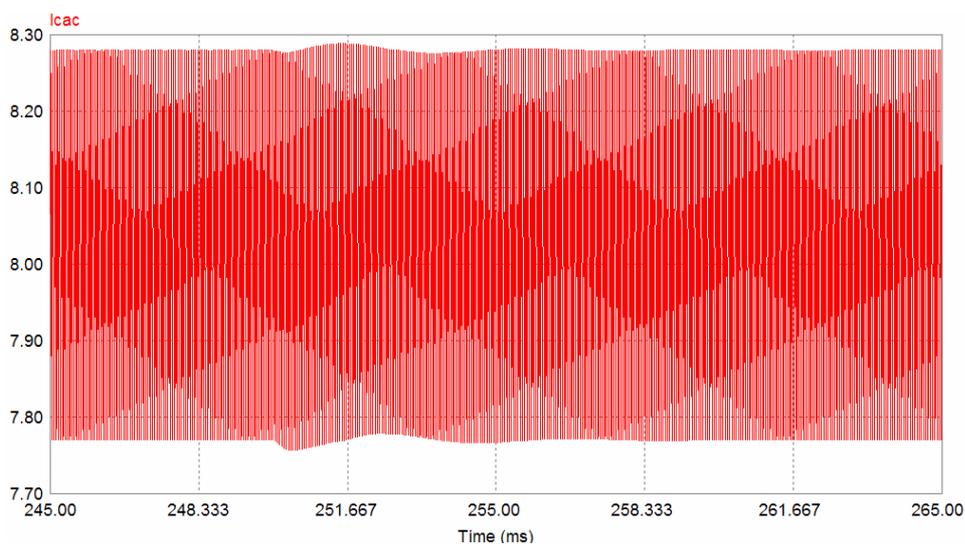


Figura 5.17 – Corrente nos terminais da CaC.

### 5.2.4 Variação na Potência das Fontes

Os resultados de simulação para a variação das condições das fontes de energia primária usadas nesta dissertação são apresentados a seguir. Nas Figuras 5.18 a 5.25 são mostrados os resultados para a variação na potência do gerador eólico, sendo considerado um aumento na velocidade do vento, aumentando a potência de saída deste gerador. Na Figura 5.18 (em azul) é exemplificado este comportamento e o comportamento na potência do demais geradores do SHE, da CaC (em vermelho) e do gerador fotovoltaico (em verde). Novamente verifica-se um transitório maior no gerador fotovoltaico do que na CaC durante a variação da potência no gerador eólico, em virtude de suas dinâmicas.

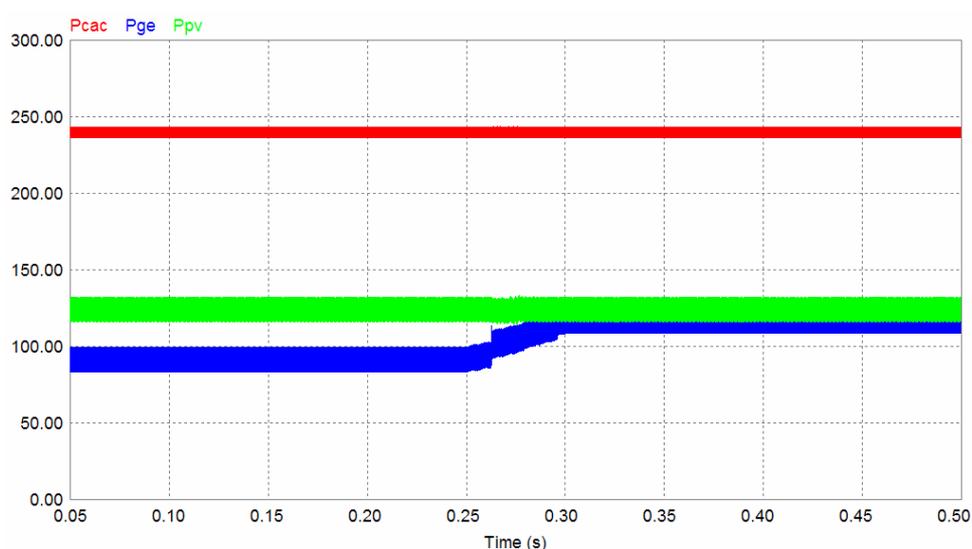


Figura 5.18 – Potência dos geradores do SHE.

Na Figura 5.19 são mostradas as tensões nos geradores do SHE, da CaC (em azul), do PV (em rosa) e (em verde), a tensão do ge. Também é mostrada a tensão do barramento CC (em vermelho).

O transitório de potência do gerador eólico verificado também no aumento da tensão, apresenta pouca influência sobre a tensão na CaC e também sobre a tensão no barramento CC como pode ser observado na figura. Apresentando oscilação um pouco mais significativa na tensão do gerador fotovoltaico.

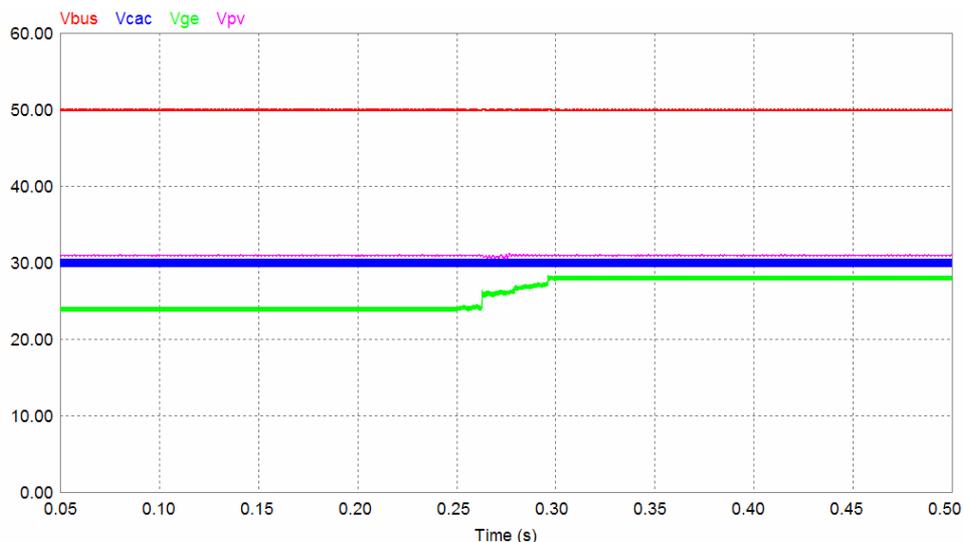


Figura 5.19 – Tensão dos geradores do SHE e do barramento CC.

Na Figura 5.20 tem-se o detalhe do aumento da corrente no indutor do conversor do gerador eólico devido o aumento da velocidade do vento, contribuindo para uma maior potência de saída liberada no barramento. A Figura 5.21 apresenta as correntes nos indutores dos geradores constituintes do SHE, a corrente no indutor do conversor da CaC (em vermelho), do gerador fotovoltaico (em verde) e novamente do gerador eólico (em azul). É importante ressaltar a pouca influência que a variação na potência do gerador eólico apresentou sobre os demais componentes do sistema nas simulações.

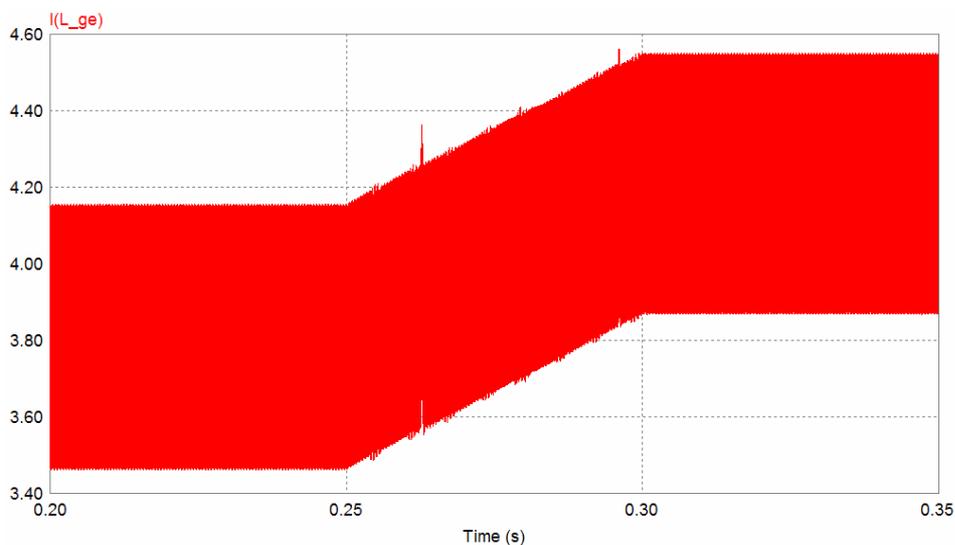


Figura 5.20 – Detalhe do aumento da corrente do gerador eólico.

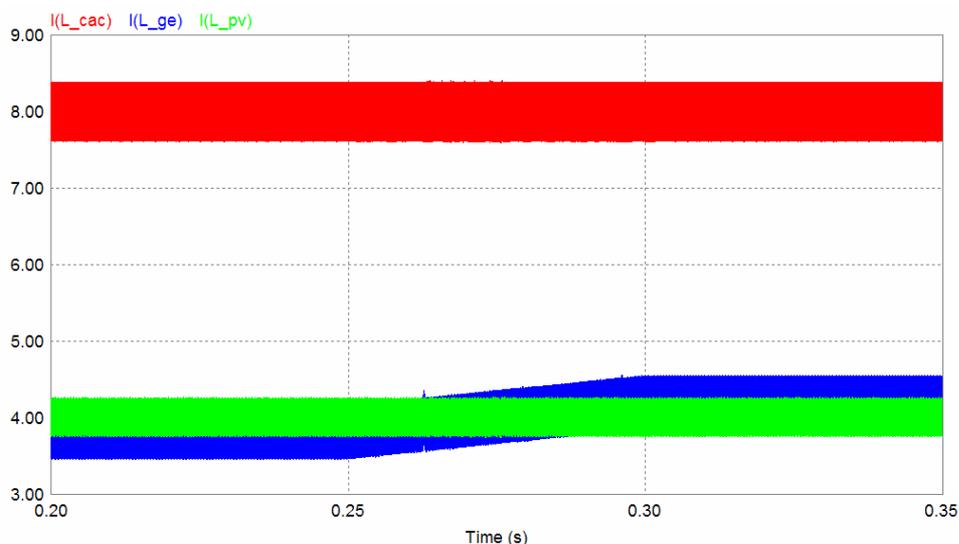


Figura 5.21 – Corrente no indutor dos conversores dos geradores do SHE.

A Figura 5.22 mostra em uma escala menor a corrente no indutor do conversor da CaC onde verifica-se o comportamento e a influência quase inexistente da variação da potência do gerador eólico sobre a corrente da CaC durante o transitório.

A tensão do barramento CC mostrada na Figura 5.23 também mostra-se pouca influenciada pelo aumento da potência do gerador eólico, apresentando um sobressinal (*overshoot*) inferior a 0,3% em relação a tensão de referência durante o período entre o transitório e a estabilidade do sistema.

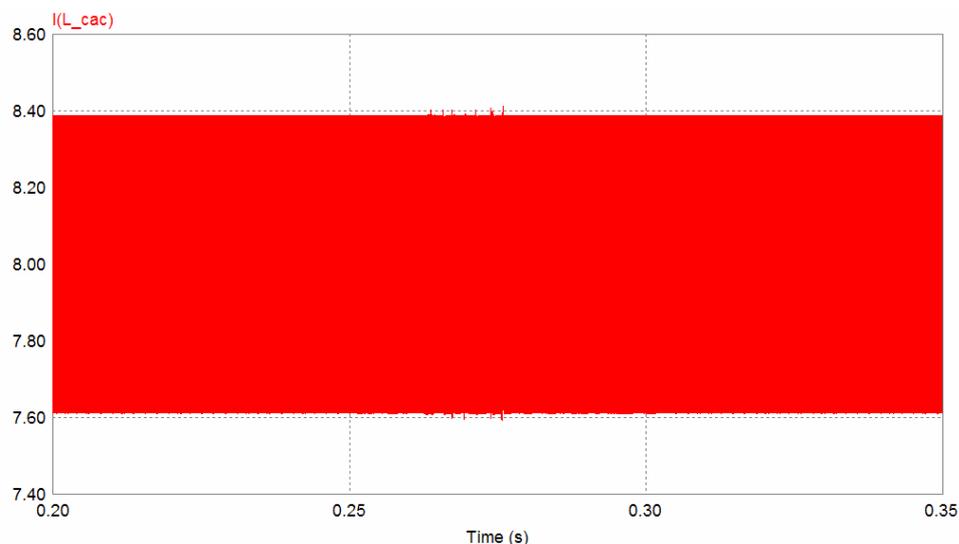


Figura 5.22 – Corrente no indutor do conversor da CaC.

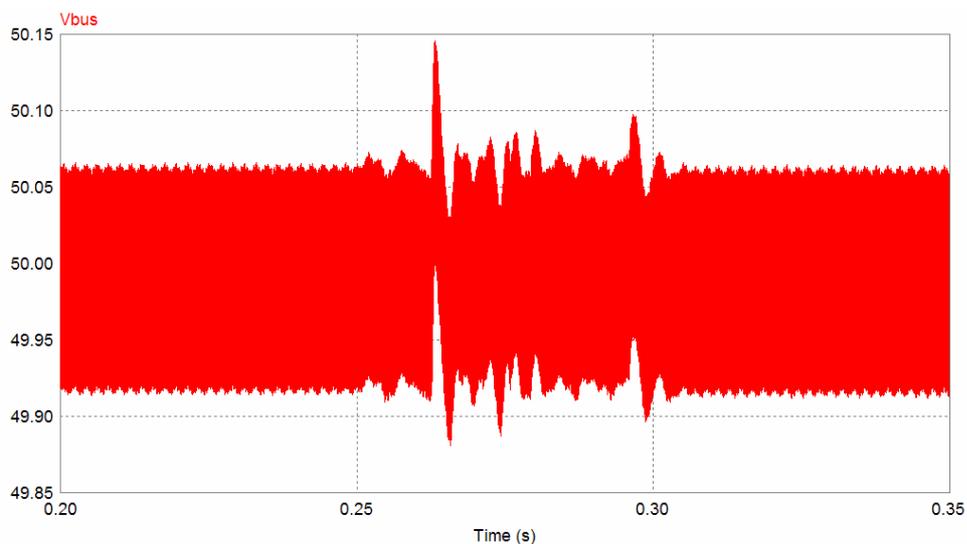


Figura 5.23 – Transitório da tensão no barramento CC.

Na Figura 5.24 é apresentada a tensão nos terminais da CaC e onde verifica-se um *overshoot* menor que 0,15% e mostrando a pouca influência da variação do gerador eólico sobre a CaC durante o transitório.

A Figura 5.25 mostra o comportamento da corrente nos terminais da CaC, onde novamente verifica-se um valor de *overshoot* inferior a 0,125% e assim como para a tensão, a quase inexistência do transitório da corrente para a variação na fonte de energia primária.

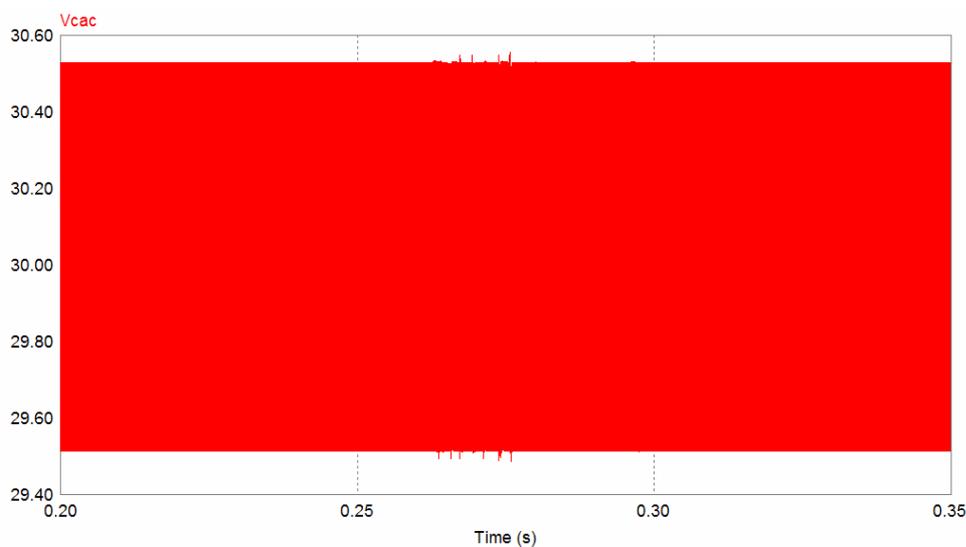


Figura 5.24 – Tensão nos terminais da CaC.

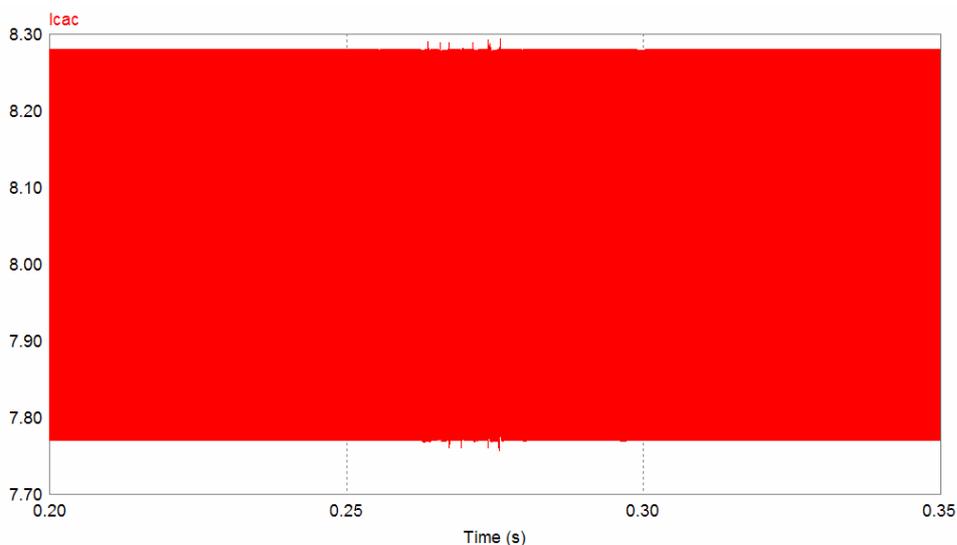


Figura 5.25 – Corrente nos terminais da CaC.

### 5.2.5 Variação de Carga $\pm 20\%$ com Banco de Baterias

Os resultados dos testes a seguir obtidos nas simulações apresentam nas Figuras 5.26 a 5.38 o comportamento das grandezas relevantes para análise da variação da carga principal (300 – 360 – 300 W) e (300 – 240 – 300 W). A Figura 5.26 mostra o comportamento da tensão no barramento CC durante os transitórios citados.

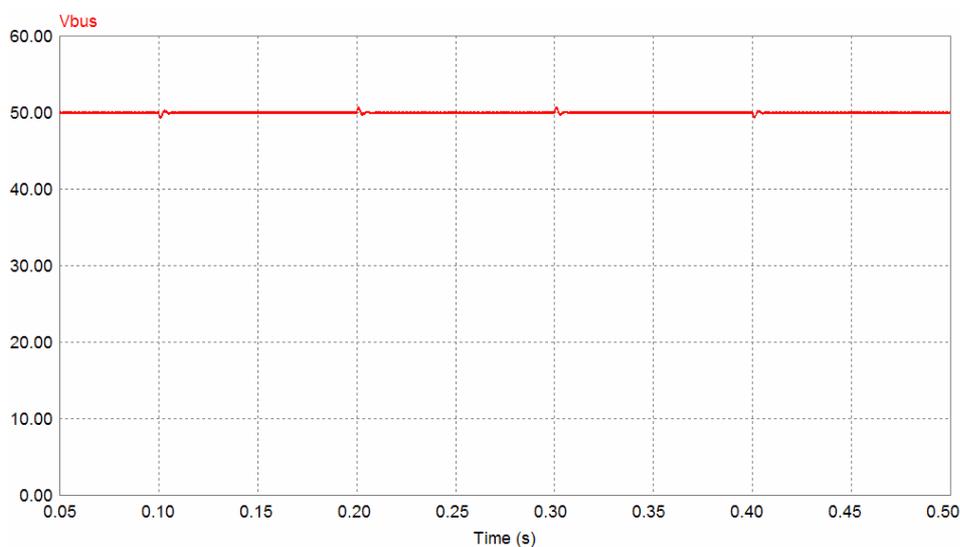


Figura 5.26 – Tensão no barramento CC.

Na Figura 5.27 são mostradas as correntes na carga principal (em azul) e na carga secundária (em vermelho) e (em verde) a corrente média na carga secundária para as variações de carga citadas acima.

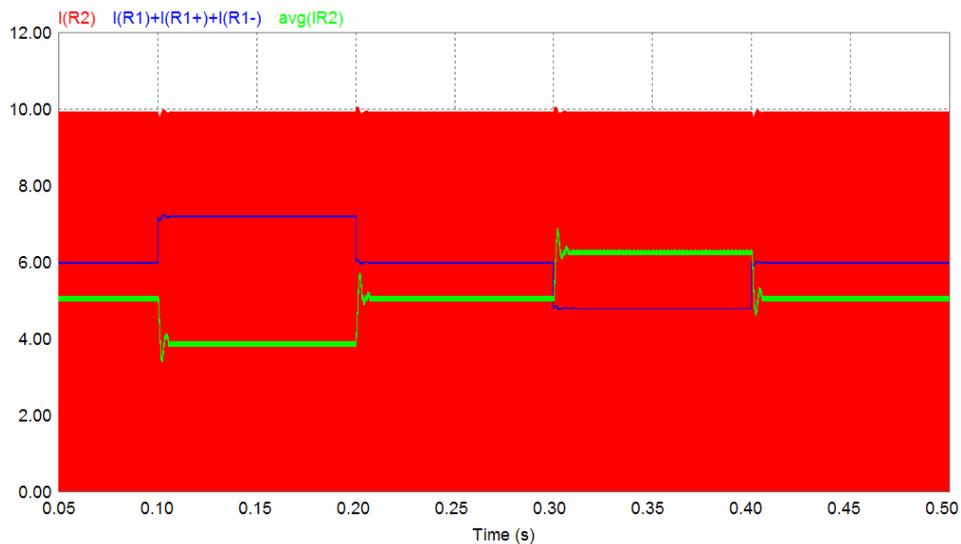


Figura 5.27 – Corrente nas cargas principal e secundária.

Com a variação na carga principal é mostrado novamente a tensão do barramento CC com maiores detalhes durante esses transitórios.

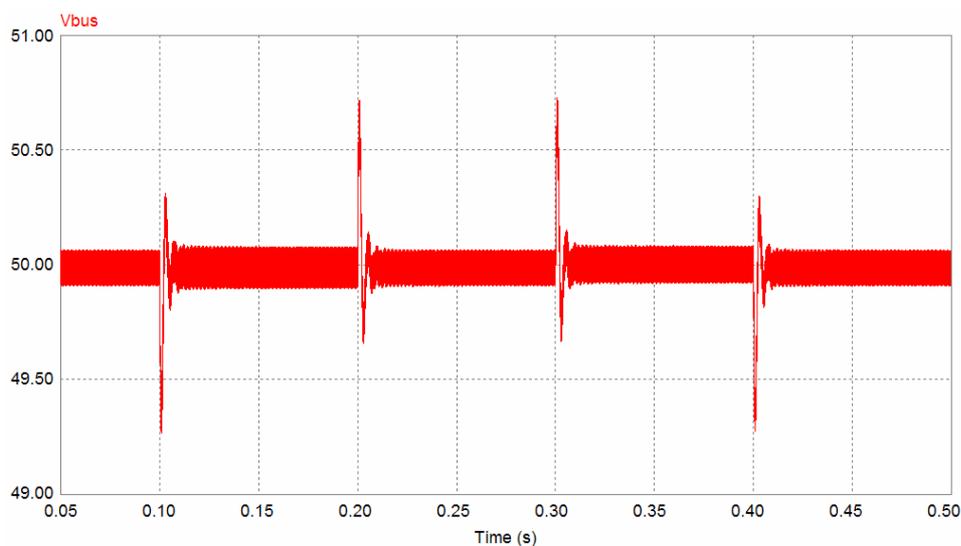


Figura 5.28 – Transitório na tensão do barramento CC.

Nas Figuras 5.29 e 5.30 é mostrada em detalhes a tensão do barramento CC para a variação de 300 W para 360 W (em 100 ms) e de 300 W para 240 W (em 300 ms) respectivamente. Nota-se da figura que para variação de  $\pm 20\%$  na carga principal, a amplitude do *overshoot* é praticamente a mesma para os dois casos (aproximadamente 1,4%).

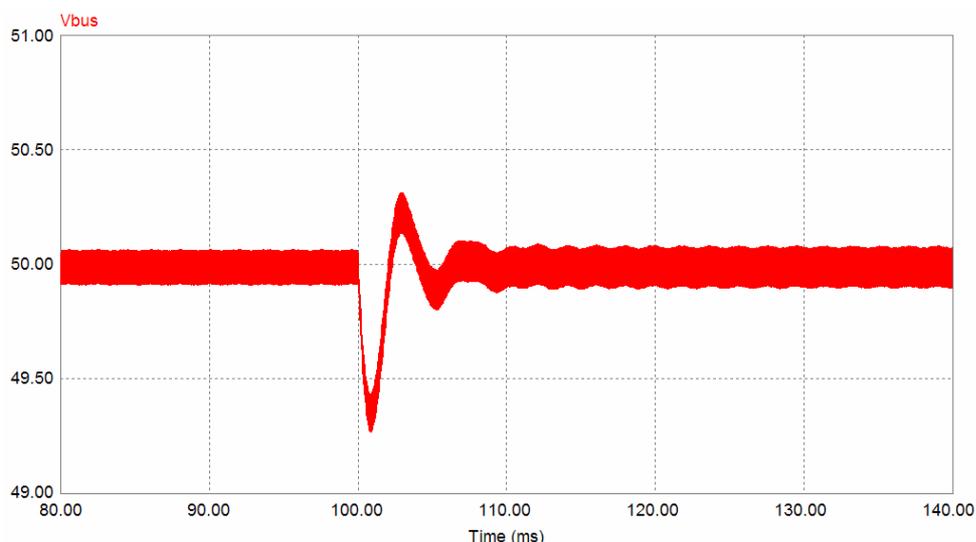


Figura 5.29 – Tensão do barramento CC para incremento de carga.

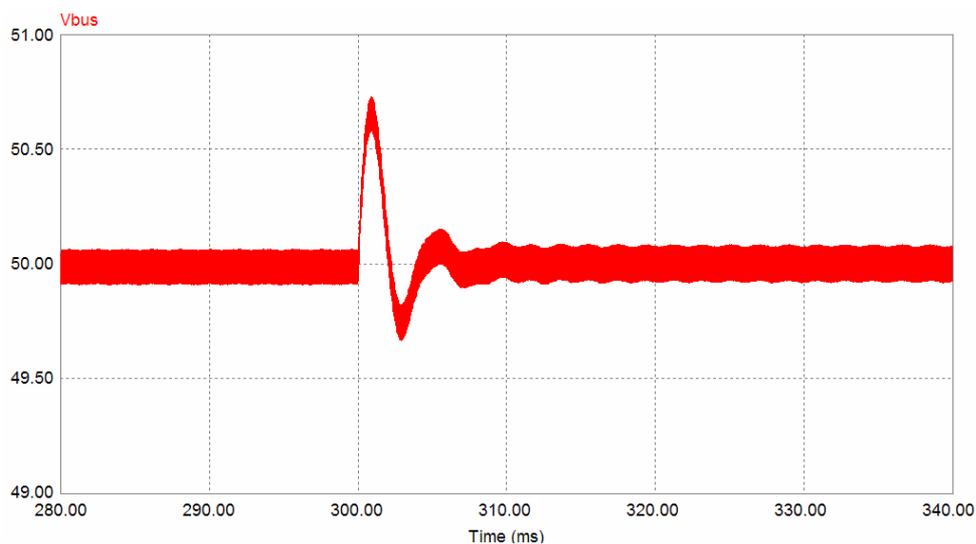


Figura 5.30 – Tensão do barramento CC para redução de carga.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 são mostradas respectivamente, a corrente no indutor do conversor *Buck-Boost* do banco de baterias e a corrente no indutor do conversor da CaC e também o valor médio desta corrente.

A Figura 5.33 apresenta as correntes dos indutores dos geradores do SHE. A corrente da CaC (em vermelho), do ge (em azul), do pv (em verde) e do banco de baterias (em rosa).

Na Figura 5.34 são mostradas as potências dos geradores citados os quais são apresentados na mesma ordem da figura anterior, ou seja, potência da CaC (em vermelho), do ge (em azul), do pv (em verde) e do banco de baterias (em rosa).

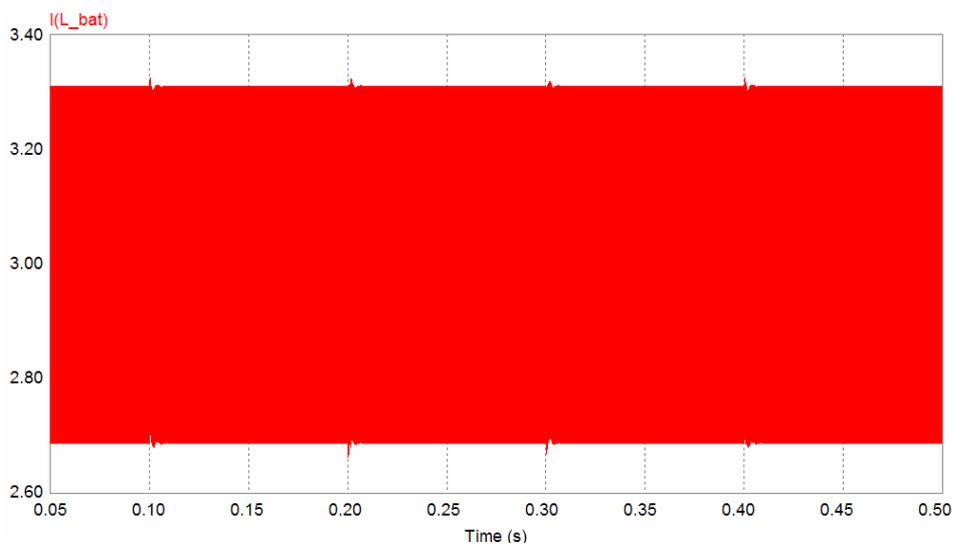


Figura 5.31 – Corrente no indutor do conversor do banco de baterias.

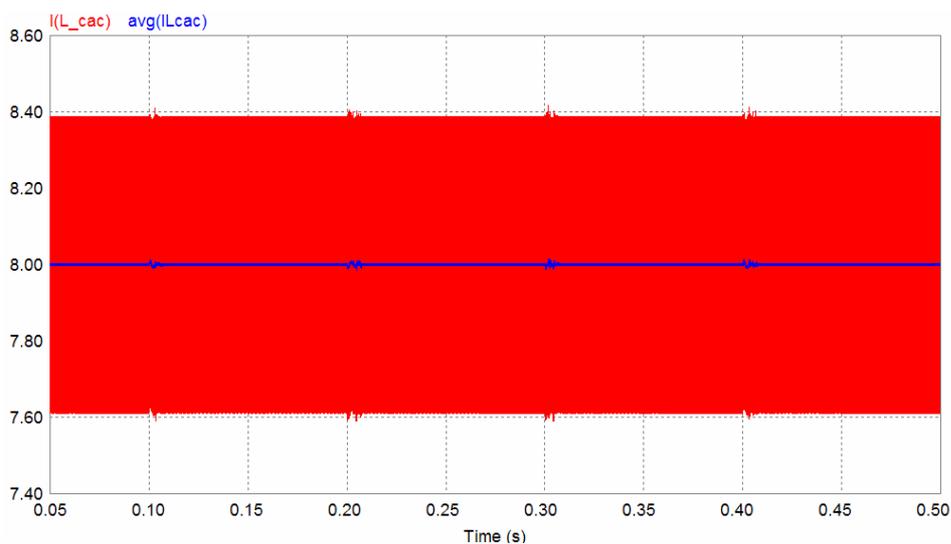


Figura 5.32 – Corrente no indutor do conversor da CaC.

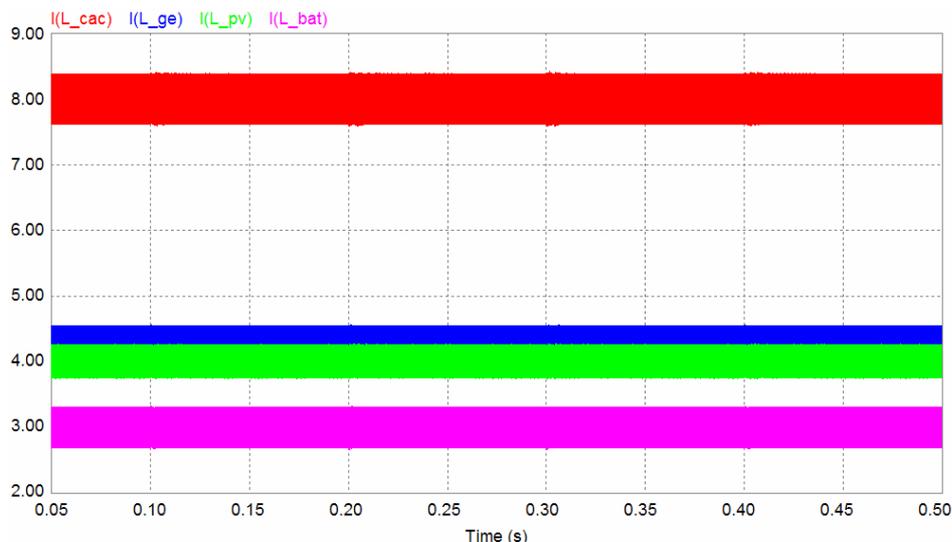


Figura 5.33 – Corrente nos indutores dos geradores do SHE.

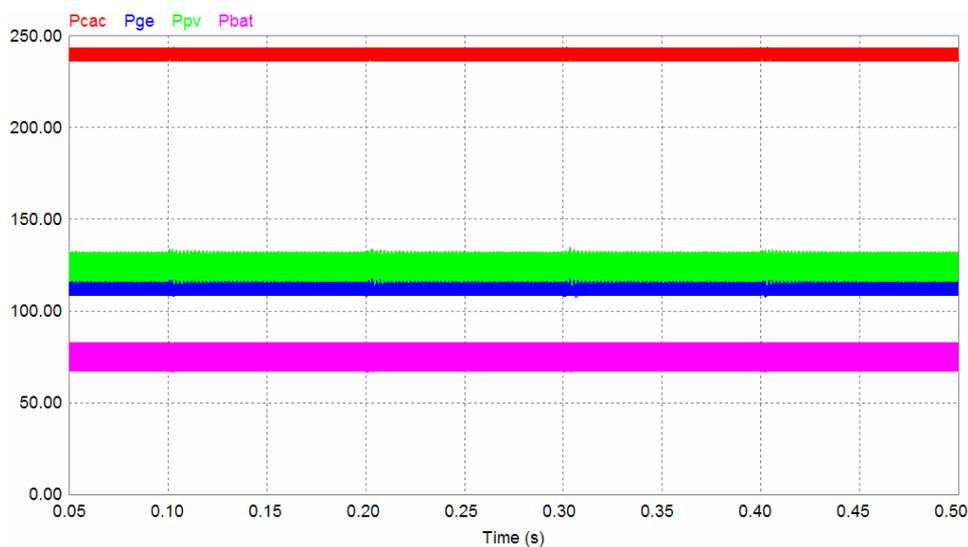


Figura 5.34 – Potência dos geradores do SHE.

Na Figura 5.35 é mostrada a tensão nos terminais da CaC para o incremento da carga principal (300 W para 360 W), aumento de 20%. O comportamento da tensão praticamente não se alterou com a inserção do banco de baterias no sistema, mostrando que o banco de baterias não altera a dinâmica da CaC.

Na Figura 5.36 é mostrada novamente a tensão nos terminais da CaC para redução de 20% (300W para 240W).

As Figuras 5.37 e 5.38 apresentam a corrente nos terminais da CaC para incremento e redução de 20% da carga principal respectivamente. Na simulação o transitório durante a retirada de carga mostrou-se mais significativo.

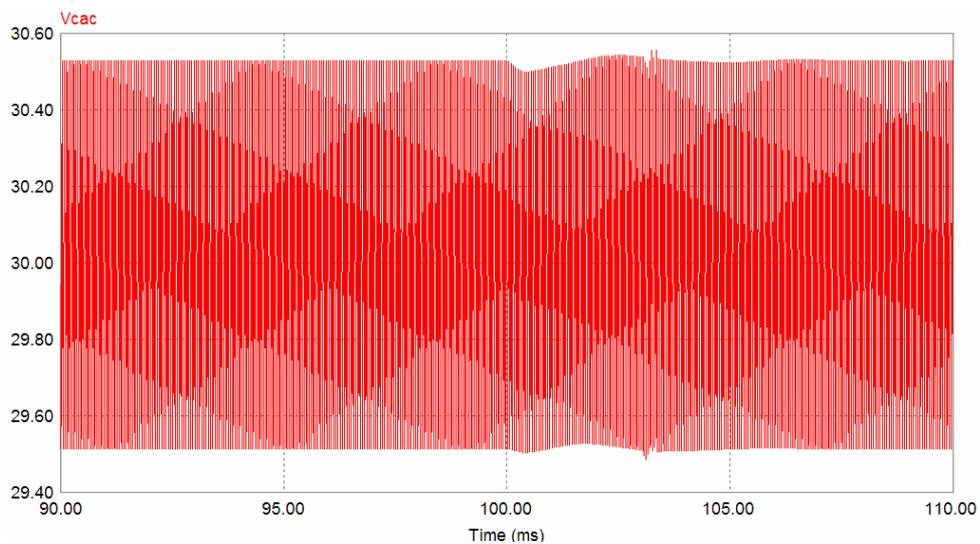


Figura 5.35 – Tensão nos terminais da CaC para incremento de carga.

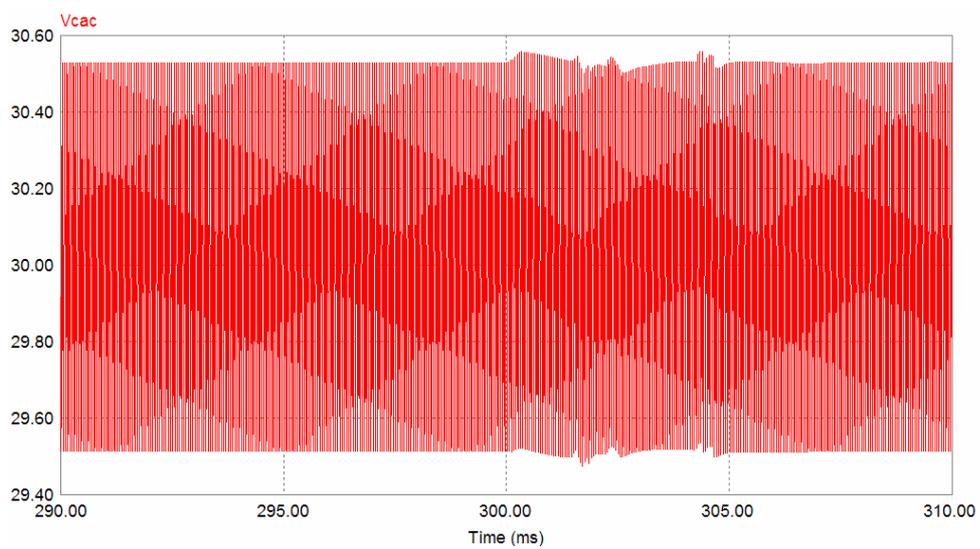


Figura 5.36 – Tensão nos terminais da CaC para redução de carga.

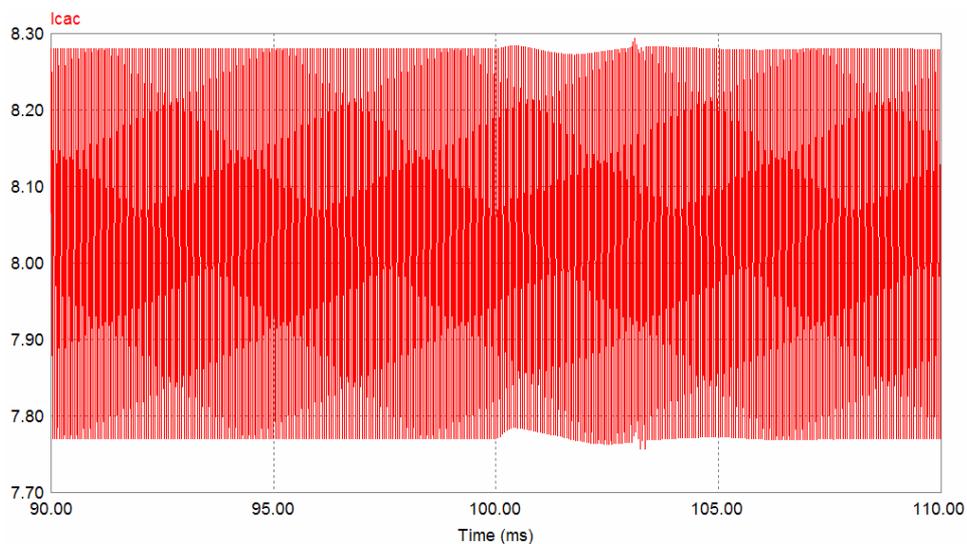


Figura 5.37 – Corrente nos terminais da CaC para incremento de carga.

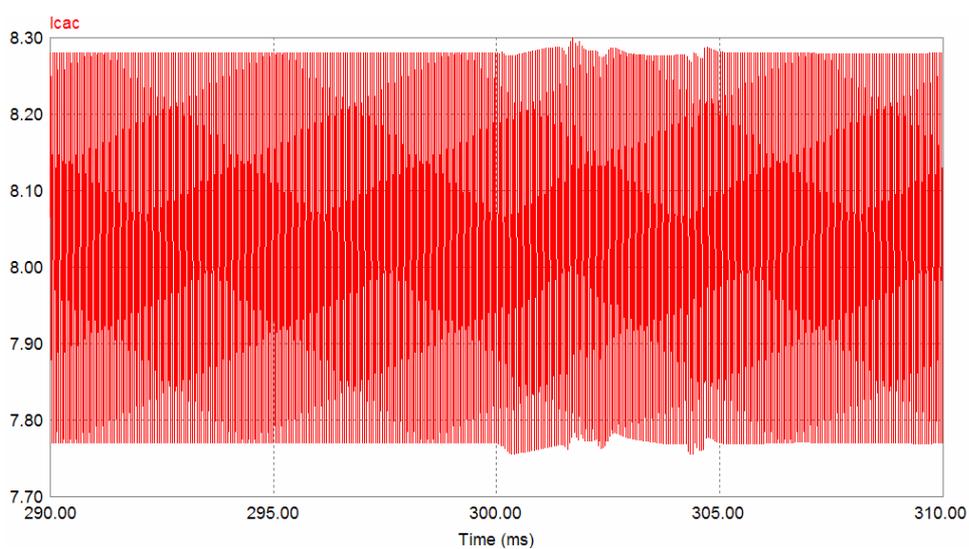


Figura 5.38 – Corrente nos terminais da CaC para redução de carga.

### 5.3 Resultados Experimentais

Para os ensaios de laboratório foi utilizado um protótipo de escala reduzida de um SHE com entrada para quatro fontes geradoras. Os dados práticos de ensaio foram obtidos por um osciloscópio da Agilent (MSO3062A).

#### 5.3.1 Levantamento dos Resultados Práticos

Para realizar o controle dos conversores é utilizado um processador digital de sinais (DSP) da família 56F83XX da Freescale (DSP56F8323). Na Figura 5.39 é mostrada a placa de DSP utilizada, juntamente com uma placa para condicionamento dos sinais, para ajustar os sinais dos sensores à níveis de tensão admitidos pelo DSP, além da filtragem dos mesmos.



Figura 5.39 – Placa do DSP e placa de condicionamento de sinais.

Os resultados práticos servirão de base para a validação dos resultados simulados. Na Figura 5.40 é mostrada a placa do circuito dos conversores do SHE que consta de três conversores Boost (gerador eólico, CaC, gerador fotovoltaico) e um Buck-Boost (banco de baterias), além do circuito utilizado para controle de tensão na carga principal.

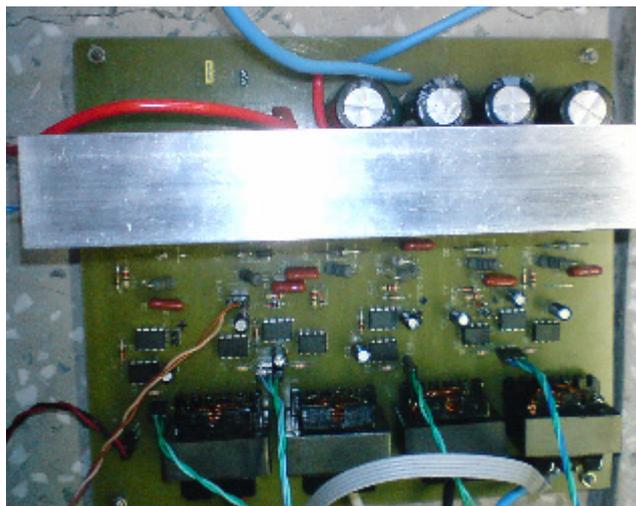


Figura 5.40 – Foto da placa do circuito dos conversores.

Na Figura 5.41 é mostrado a foto do circuito utilizado, a placa com os conversores e a carga principal e secundária utilizada e também a placa do DSP juntamente com a placa de condicionamento e as fontes de alimentação dos circuitos.

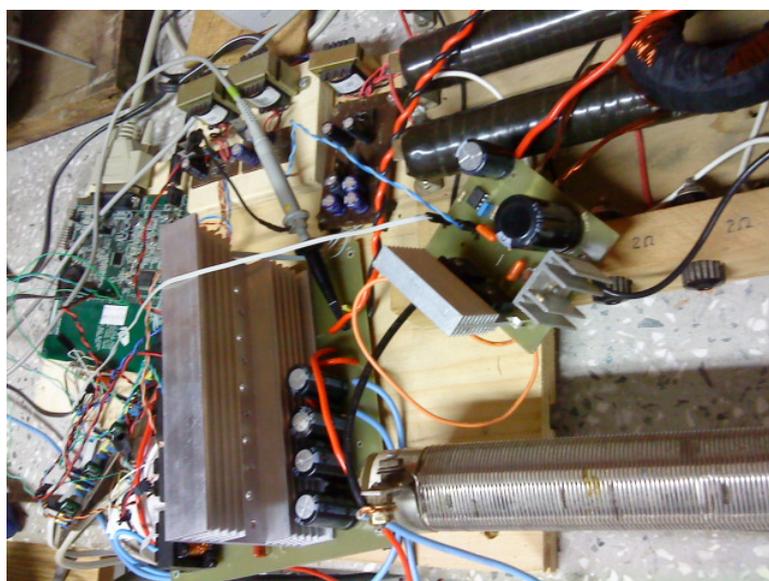


Figura 5.41 – Protótipo do SHE implementado

Nas Figuras 5.42 a 5.46 são mostrados os resultados dos testes experimentais realizados no laboratório.

Os resultados obtidos referem-se a variação da corrente da carga principal (degrau de carga), a qual teve um aumento em torno de 40% de 2,4 A ~ 3,4 A, e retornando a este valor ao seu valor inicial (2,4 A).

Na Figura 5.42 é mostrado (em azul) o comportamento da tensão do barramento CC para o degrau de corrente mostrado na mesma figura (em rosa). Verifica-se que o transitório da tensão para a redução da carga sofre maior influência do que para o aumento da carga.

A Figura 5.43 mostra o comportamento da corrente no gerador fotovoltaico (em rosa) para a mesma amplitude do degrau de carga, é mostrado também a tensão do barramento CC (em azul).

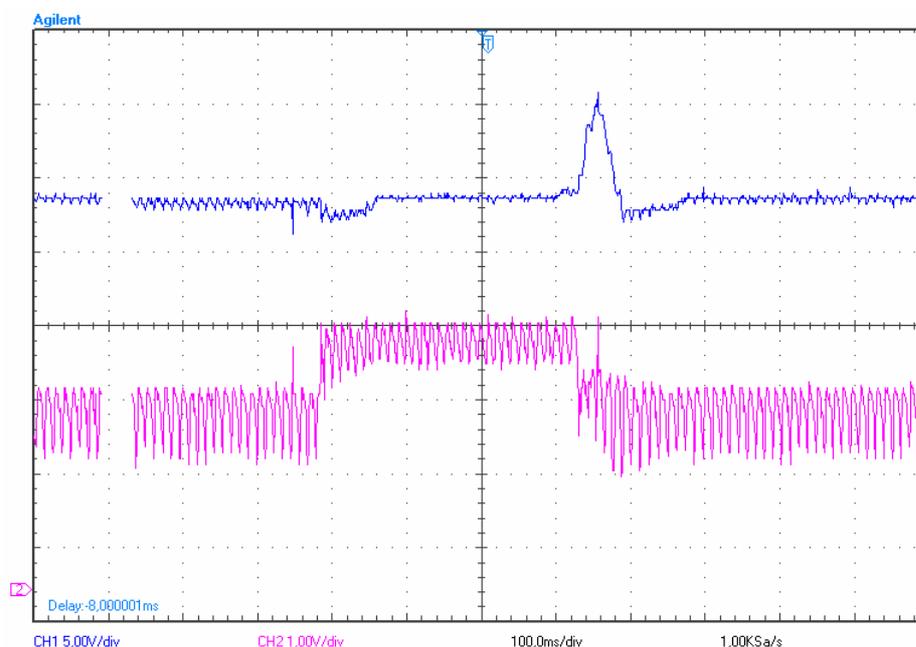


Figura 5.42 – Tensão do barramento CC corrente na carga principal

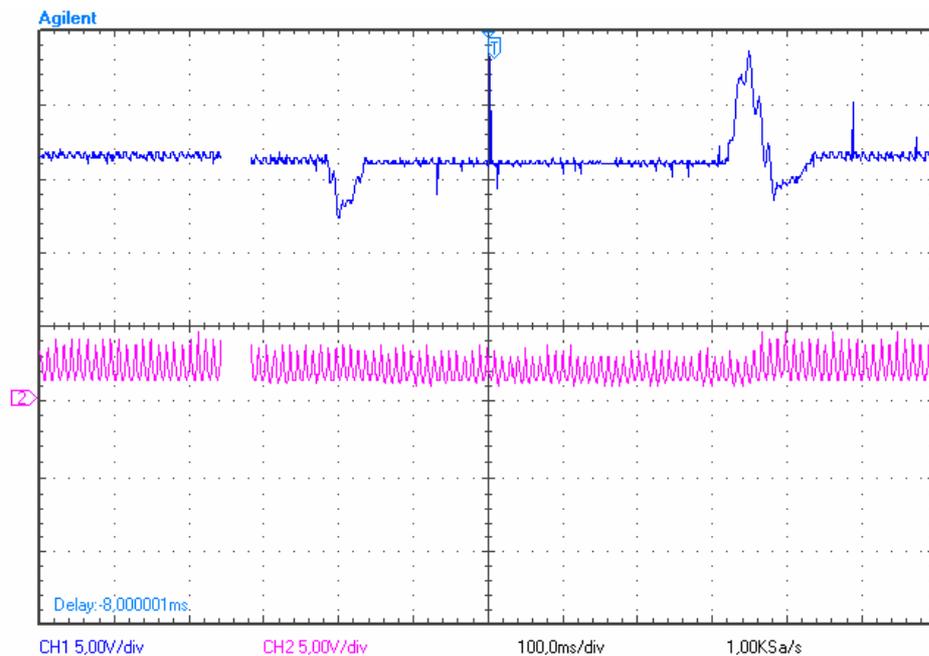


Figura 5.43 – Tensão no barramento CC e corrente no gerador fotovoltaico

A Figura 5.44 apresenta a tensão (em azul) e a corrente (em rosa) no banco de baterias, nota-se que para a variação na carga principal, a influência dessa variação é insignificante no transitório da tensão e corrente do mesmo.

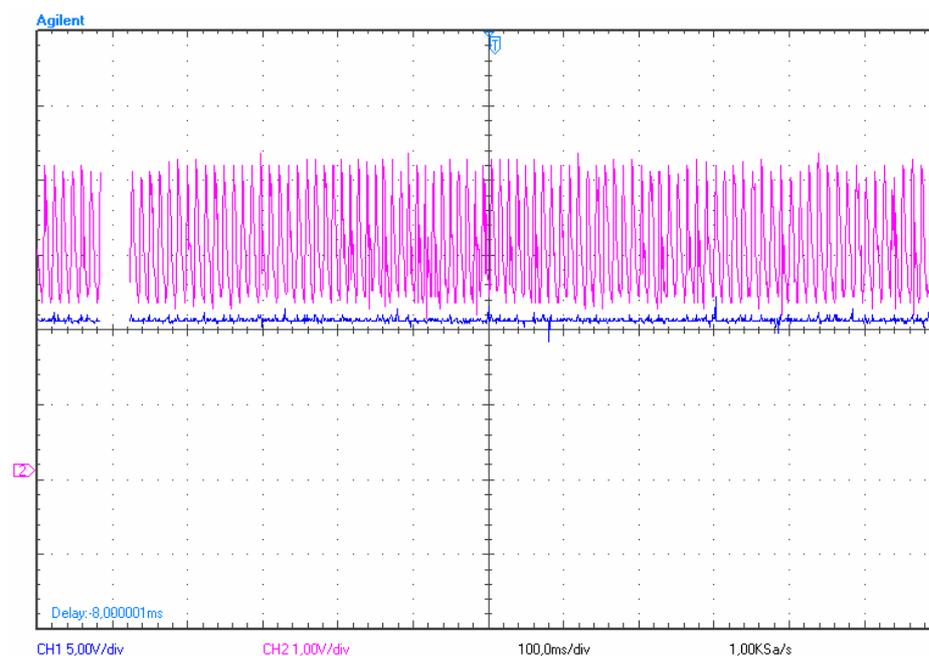


Figura 5.44 – Tensão e corrente no banco de baterias

A Figura 5.45 apresenta a tensão (em azul) e a corrente (em rosa) no simulador de CaC utilizado, nota-se que para a variação na carga principal, a resposta transitória da tensão e da corrente sofre uma variação mais significativa em torno de 40% para a corrente. Foi realizado testes como uma fonte CC 0-30V como fonte de entrada do conversores juntamente com uma capacitor na entrada, onde foi verificado que assim como no banco de baterias o qual apresenta uma capacitância equivalente elevada a resposta transitória sofre pouca influência com relação a variação na carga principal.

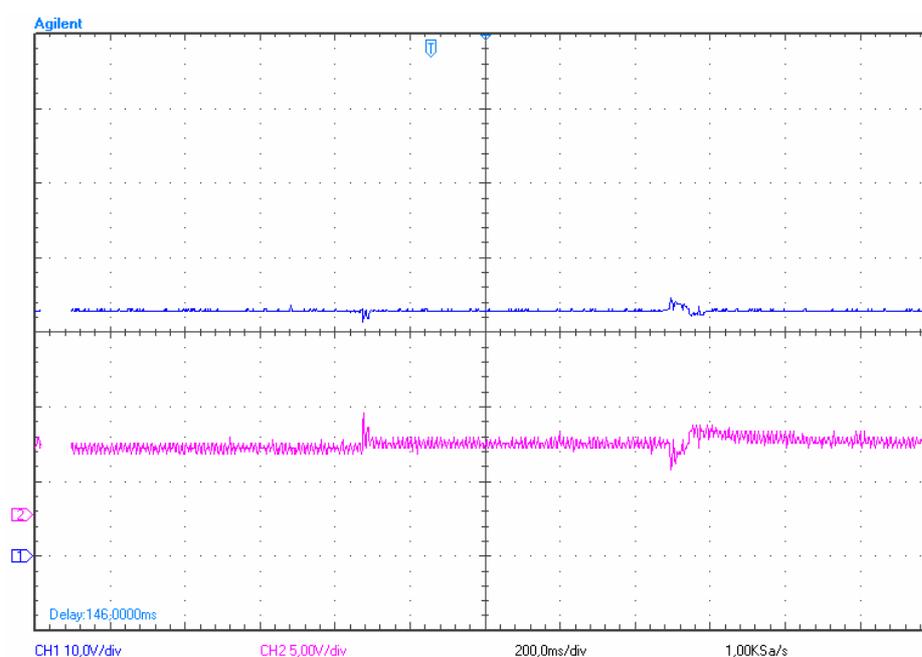


Figura 5.45 – Tensão e corrente no simulador de CaC

## 5.4 Resumo

Este capítulo apresentou os resultados de simulação do modelo matemático de uma CaC tipo PEM integrada a um SHE composto por geradores eólico e fotovoltaico e um banco de baterias realizada com o auxílio do software PSim. O sistema estudado nesta dissertação mostra-se capaz de realizar a integração e

interação de  $n$  fontes com características e dinâmicas diferentes. Os resultados de simulação apresentaram pouca influência quando da variação da potência do gerador eólico sobre os demais componentes do sistema. Isto se deve principalmente ao controle individualizado dos geradores. Os distúrbios ocasionados pela variação de carga mostraram-se mais significativos sobre o comportamento das fontes, provavelmente pela dinâmica do controle de tensão do barramento CC.

## 6 CONCLUSÕES

---

A integração de pilhas de células a combustível com diferentes fontes para aproveitamentos de energia, principalmente renováveis, permite a utilização deste tipo de geração de energia limpa, além de aumentar a confiabilidade do sistema de geração. A integração de fontes com diferentes características e dinâmicas de operação, pode aproveitar a energia primária disponível em determinada localidade ou região. Há também a complementaridade das fontes, em momentos onde uma ou mais delas não estão produzindo energia, deve haver uma fonte que seja capaz de suprir a demanda da carga no mínimo durante os períodos pré-determinados em projeto.

A transformação das fontes geradoras em fontes de corrente torna mais confiável o suprimento de potência para uma determinada carga. O protótipo desenvolvido no CEEMA-UFSM servirá como uma ferramenta modular, eficaz e segura em pequenos aproveitamentos de energias alternativas com sistemas híbridos de geração de eletricidade.

Por seu caráter modular, o protótipo fruto desta dissertação pode ser facilmente adaptado à novas configurações de carga e/ou fontes de geração. Com isto se quer dizer que é plenamente viável a possibilidade de inserção de novas fontes ao barramento comum deste protótipo ou alterações na sua carga, bastando considerar as características individuais das fontes, a atualização do software de controle juntamente com a aquisição dos novos sinais a serem medidos e o dimensionamento correto de conversores de potência.

O controle da tensão do barramento efetuado pela modulação de uma carga secundária mostrou ser eficaz para pequenas potências. O algoritmo HCC, também se evidenciou interessante na busca do máximo aproveitamento individual da potência disponível nos geradores.

A análise dos resultados apresentou uma característica interessante devido ao controle individual dos conversores: as oscilações presentes nas correntes dos indutores foram relativamente baixas durante os transitórios causados por variações na carga principal e principalmente durante transitórios de variação da potência da

fonte geradora, onde as oscilações nas correntes dos indutores são menos significativas apresentando certa influência na tensão do barramento CC. Isto se deve ao fato de que qualquer surto é distribuído entre as fontes de tal maneira que nenhuma fica onerada isoladamente.

A integração de fontes de energia apresenta-se como uma opção para geração descentralizada e autônoma, ou mesmo para redução de custos com energia elétrica através das fontes renováveis. Este estudo contribui principalmente para a diminuição do impacto ambiental causado pelas fontes com combustíveis fósseis. Por outro lado, os resultados mostraram que apesar dos custos da geração ainda serem mais elevados com fontes renováveis deve-se ao menos relacioná-las como opções em novos projetos, visto a sua importância técnica e ambiental.

## **6.1 Principais Contribuições desta Dissertação**

Os resultados presentes neste trabalho contribuem para mostrar a viabilidade da integração e interação de diferentes fontes alternativas de energia entre si. Dentre as contribuições desta dissertação, pode-se citar:

- O estabelecimento e verificação das condições de funcionamento de um sistema híbrido de energia para avaliação dos diferentes métodos de controle, integração e configurações de fontes alternativas de energia.
- A integração de dois ou mais sistemas de geração com controle independente interagindo de forma a entregar o somatório das potências à um barramento comum, através de um controlador compartilhado, considerando as características individuais das fontes e extraindo o máximo de cada uma.

- A análise de um sistema de geração baseado em células a combustível integrado a outras fontes alternativas obviamente com características distintas.
- Implementação de um sistema simples, fazendo uso de tecnologias mais acessíveis para controle, apresentando robustez e versatilidade.

## 6.2 Sugestões para Continuidade do Trabalho

Para continuidade dos desenvolvimentos desta dissertação o autor sugere:

- Implementação de um sistema que utilize células a combustível reais ou outras fontes de geração, que pode ser usado para estudos de operação, pré-operação, controle, otimização, qualidade de energia e outros.
- Inserir um inversor na saída do barramento CC para alimentação de cargas CA.
- Promover a integração do sistema desenvolvido com um inversor CC-CA para injeção de energia na rede.
- Analisar as diferentes técnicas de controle e topologias de conversores para melhorias na eficiência global do sistema, juntamente com a possibilidade e viabilidade do aproveitamento do calor gerado.
- Implementar um sistema de proteção para o gerador eólico contra velocidades excessivas de vento ou variações muito bruscas que não possam ser acompanhadas pela respectiva geração.

- Implementar diferentes usos para a energia drenada para a carga secundária

## BIBLIOGRAFIA

---

- [01] FARRET, F. A., SIMÕES, M. G.; **Integration of Alternative Sources of Energy**. Somerset, NJ: Wiley-IEEE Press, ISBN: 0-471-71232-9, Jan. 2006.
- [02] NETO, J. P. de B.; **Projeto e Implementação de um Controle Modular HCC para Integração de Fontes Alternativas de Energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- [03] VALE, S. B. do., BEZERRA, U. H., PINHO, J. T. e PEREIRA, E. J. da S., **Estudo da Inserção de Célula a Combustível Integrada a Sistema Híbrido de Geração de Eletricidade Isolado**". 2ºWICaC - Workshop Internacional de Células a Combustível, Unicamp - Campinas, 2004.
- [04] TANRIOVEN, M., **Reliability and Cost-Benefits of Adding Alternate Power Sources to an Independent Micro-Grid Community** - Journal of Power Sources 150 (2005) 136–149.
- [05] RIGHI, L. A., **Associação de Microgeradores Assíncronos Sem Controle de Velocidade para Geração de Energia Elétrica a Partir de Fontes Renováveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFSM, Santa Maria, 1998.
- [06] BASCHUK, J. J., LI, X., **Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding**, Journal of Power Sources, no 86, 2000.
- [07] MANN, R. F. et al, **Development and Application of a Generalized Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell**, Journal of Power Sources, no 86, 2000.

- [08] AMPLHETT, J. C. et al, **A Model Predicting Transient Responses of Proton Exchange Membrane Fuel Cells**, Journal of Power Sources, no 61, 1996.
- [09] PATHAPATI, P. R., XUE, X., TANG, J., **A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System**, Renewable Energy 30, 2005.
- [10] LARMINIE, J. e DICKS, A.; **Fuel Cell Systems Explained**; Second Edition, Ed. John Wiley e Sons; Chichester, Inglaterra; 2003; 418 p.
- [11] CORRÊA, J. M.; **Subsídios Teóricos e Práticos para Modelagem e Simulação de Pilhas de Células de Combustível**. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- [12] NOVAES, R. Y. **Contribuições para sistemas de processamento de energia de células a combustível**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2006.
- [13] PALMA, L. M., TODOROVIC, H., ENJETI, P., **Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications**, 21th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, 2006.
- [14] CANDUSSO, D. , VALERO, I., WALTER, A. , BACHA, S., RULLIÈRE, E., RAISON, B., **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, 2002.
- [15] WAI R. J., LIN, C. Y., **High Efficiency, High-Step-Up DC-DC Convertor for Fuel Cell Generation System**. IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 152, n° 5, 2005.

- [16] TANRIOVEN, M., ALAM, M. **Modeling, Control and Power Quality Evaluation of a PEM Fuel Cell Based Power Supply System for Residential Use** - IAS (2004), 2808-2814
- [17] BARBIR, F., **PEM Fuel Cells: Theory and Practice**. Elsevier Academic Press. (2005)
- [18] OGATA, K., **Discrete-Time Control Systems**; 2ª Ed., Ed: Prentice Hall, New Jersey; 1997; 745 p.
- [19] OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**; 4ª Ed. Prentice Hall do Brasil; Rio de Janeiro; 2004; 800p.
- [20] BARBOSA, C. F. DE O., PINHO, J. T., JUNIOR, C. T. DA C., **Análise da Viabilidade de Implantação de Sistemas Híbridos de Energia de Pequeno Porte em Localidades Isoladas da Região Norte Através da Abordagem Difusa**. VII SBAI/ II IEEE LARS. São Luís, setembro de 2005.
- [21] NETO, E. H. G., **Células a Combustível Estacionárias de Pequeno Porte: Contexto e Tendências**, Portal H2, 2007.
- [22] BOLAÑOS, J. R. M., **Controlador Supervisório Inteligente para Sistema Híbridos Eólico-Diesel-Bateria de Pequeno Porte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Escola Politécnica USP, São Paulo, 2007.
- [23] COBAS, V. R. M., **Análise de Sistemas Híbridos com Células a Combustível de Oxido Sólido e Microturbinas a Gás**. Tese (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [24] BARBOSA, C. F. DE O., et al, **Situação da Geração Elétrica Através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas Frente à Universalização da Energia Elétrica**. 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída - AGRENER GD 2004.

- [25] FRANCISCATTO, A., **Energia Eólica e Solar Fotovoltaica no Contexto de Universalização e Diversificação da Matriz de Geração Brasileira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- [26] PINHO, J. T., et al, **Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico-Diesel para Eletrificação da Comunidade de São Tomé – Município de Maracanã – Pará.** X Congresso Brasileiro de Energia- CBE2004.
- [27] BARBOSA, C. F. DE O., et al., **Sistemas Híbridos de Energia Solar/Eólico/Diesel para Eletrificação de Comunidades Isoladas da Região Amazônica Brasileira – Estado Presente e Desenvolvimentos Futuros.** VI CLAGTEE - Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2005.
- [28] BLASQUES, L. C. M., **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica. Universidade Federal do Pará, 2005.
- [29] SERPA, L. A., **Estudo e Implementação de um Sistema Gerador de Energia Empregando Células a Combustível do Tipo PEM.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2004.
- [30] ANDERSEN, L. R., **Sistema de Interligação entre Módulos Geradores de Energia a partir de Células a Combustível do Tipo PEM e um Banco de Baterias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2006.
- [31] CORRÊA, J. M.; **Desenvolvimento e Implementação de uma Micro-rede Avançada de Alta Freqüência para Integração de Fontes Alternativas de**

- Energia.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- [32] MARAFÃO, F. P., **Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais.** Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [33] MARTINS, G. M., **Desenvolvimento de Conversor Comutado em Baixa Freqüência para Aplicação em Sistemas de Geração Distribuída Baseados em Células a Combustível.** Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- [34] REIS, L. O. M., **Lógica Fuzzy Aplicada ao Controle de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica: Eólica, Fotovoltaica e Biogás.** Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.
- [35] MCGOWAN, J. G., MANWELL, J. F., **Hybrid Wind/PV/Diesel System Experiences.** Renewable Energy, N°. 16, pp. 928-933. (1999).
- [36] WICHERT, B., **PV-Diesel Hybrid Energy Systems for Remote Area Power Generation – A Review of Current Practice and Future Developments.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.I, No. 3, pp. 209-228. . (1997).
- [37] AGHOSSOU, K., CHAHINE, R., HAMELIN, J., LAURENCELLE, F., ANOUAR, A., ST-ARNAUD, J.-M. AND BOSE T. K. **Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications.** Journal of Power Sources, pp. 168-172, 2001.
- [38] BARING-GOULD, E. I., FLOWERS, L., LUNDSAGER, P., MOTT, L., SHIRAZI, M. AND ZIMMERMANN, J. **Worldwide Status of Wind-Diesel Applications.** Windpower 2003, Austin, Texas, USA, 2003.

- [39] KHAN, M. J. AND IQBAL, M. T. **Pre-Feasibility Study of Stand-Alone Hybrid Energy Systems for Applications in Newfoundland.** Renewable Energy, No. 30, pp. 835-854, 2005.
- [40] OZPINECI, B. et al; **Integrating Multiple Solid Oxide Fuel Cell Modules;** Proceedings of 29<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Society – IECON'2003; Roanoke, Virginia, USA.
- [41] FARRET, F. A., et al, **Comparison of the Hill Climbing Control Methods Used in Micro Powerplants.** IV INDUSCON Procedures, Porto Alegre, Nov/2000.
- [42] SANTOS, F. M. C. da S., **Modelagem e Avaliação de Estabilidade Transitória de Aerogeradores Síncronos com Magneto Permanente em Sistemas de Energia Elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, Brasil, 2005.
- [43] FEITOSA, E. A. N.; BRONZEADO, H. S.; ROSAS P. A. C.; et al; 1998. **Behavior of Wind Turbines under Brazilian Wind Conditions and Their Interaction With the Grid.** In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER ICHQP'98 (Oct. 1998: Athens Greece). Proceedings. Athens, 1998. p. 906-910.
- [44] NUNES, M. V. A., **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2003.
- [45] AMPLHETT, J. et al. **Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cells.** p. 9 a 15, J. Electrochem. Soc., Vol. 142, Ontario, Canada 1995.
- [46] WANG C., HASHEM M., **Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits.** p. 442 a 451, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, 2005.

- [47] MAXOULIS, C.N., TSINOGLU, N., KOLTSAKIS, G.C., **Modeling of Automotive Fuel Cell Operation in Driving Cycles**. Energy Conversion and Management. Volume 45, March 2004.
- [48] AL-BAGHDADI, M.A.R.S., **Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations**. Renewable Energy v. 30, nº 10, 2005, p. 1587-1599.
- [49] MOURA, **Especificações Técnicas da Bateria Moura Clean**. [www.moura.com.br](http://www.moura.com.br). Acessada em 11/2006.
- [50] LOUNINEAU, J. P., **Rural Lighting**. Intermediate Technology Publications, Londres. 1994.
- [51] HAUSCHILD, L. **Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, Brasil. 2006.
- [52] RICH, E., **Inteligência Artificial**. Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1998.
- [53] DA SILVA, J. M. L. V., **Modelamento de Painel Solar e Validação de Método de Cálculo dos Parâmetros Internos** XXIII Jornada Acadêmica Integrada. UFSM, 2008
- [54] LIMA, L. P., FERRIGOLO, F. Z. ; FARRET, F.A.; RAMOS, D.B. **Modelagem de Células a Combustível Através de Funções Matemáticas do Psim** In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas. 2008,
- [55] RINKIEWICKZ, R., **Discharge and Charge Modeling of Lead-Acid Batteries**. IEEE Applied Power Electronics Conference, 1999.
- [56] VUTETAKIS, D. D., BATTELLE, W., **The Effect of Charge Rate and Depth of Discharge on The Cycle Life of Sealed Lead-Acid Aircraft Batteries**, IEEE 35th International Power Sources Symposium, P.103-105, 1992.

[57] NOLL, V. **Sistema de Controle e Monitoração de um Banco de Baterias por Meio de um Microcontrolador**. Florianópolis–SC. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1993.

[58] WORK WIND, **Manual do Gerador Eólico WM2.5 - 500W**, 2008.

[59] MARQUEZINI, D. D., **Interação entre Conversores Chaveados com Baixa Ondulação e Células de Combustível**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

## APÊNDICE A

### MODELAGEM MATEMÁTICA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NO PSIM

Este apêndice descreve os princípios de funcionamento e métodos utilizados para implementação do modelo de células a combustível no PSim. Também são apresentados os circuitos utilizados e a comparação dos resultados de simulação com dados experimentais encontrados na literatura.

#### A.1 Análise Matemática do Circuito Elétrico Equivalente

A Figura A.1 mostra o circuito elétrico equivalente do modelo eletroquímico de uma CaC.

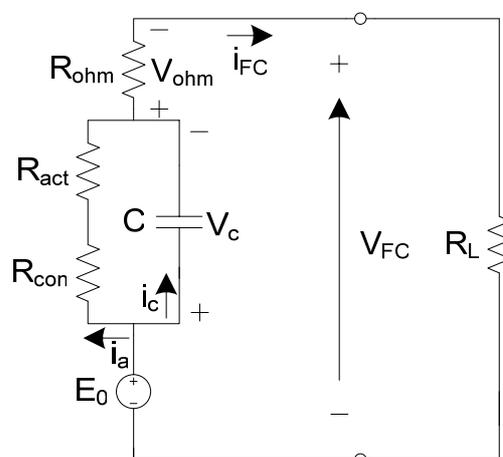


Fig. A.1. Circuito elétrico equivalente do modelo eletroquímico de uma CaC.

Na Figura A.1 é feita uma análise de malha fechada utilizando a Lei de Kirchoff. Desta análise obtêm-se as seguintes equações:

$$E_0 - \frac{1}{C} \int i_c . dt - (R_{ohm} + R_L) i_{fc} = 0 \quad (A.1)$$

Considerando que:

$$i_{fc} = i_a + i_c \quad (\text{A.2})$$

Então:

$$i_a = \frac{v_c}{R_{act} + R_{con}} = \frac{1}{R_a C} \int i_c \cdot dt \quad (\text{A.3})$$

A resistência dinâmica foi considerada como:

$$R_a = R_{act} + R_{con} \quad (\text{A.4})$$

Combinando-se (A.2) e (A.3) em (A.1) temos:

$$E - \frac{1}{C} \int i_c \cdot dt - (R_{ohm} + R_L) \cdot \left( \frac{1}{R_a C} \int i_c \cdot dt + i_c \right) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Dividindo-se (A.5) por:

$$R_L + R_{ohm} \quad (\text{A.6})$$

e resolvendo-a para  $i_c$  tem-se:

$$\frac{E}{(R_L + R_{ohm})} - \left[ \frac{1}{(R_L + R_{ohm})C} + \frac{1}{R_a C} \right] \int i_c \cdot dt = i_c \quad (\text{A.7})$$

Com estas equações e valores de inicialização para alguns parâmetros, foi implementado no PSim o modelo para a simulação de uma pilha de CaCs, utilizando-se apenas blocos matemáticos do PSim para este trabalho. Para a determinação do valor da resistência dinâmica foi considerada novamente a análise do circuito da Figura A.1.

A resistência dinâmica foi considerada como a soma das resistências de ativação e concentração.

$$R_a = R_{act} + R_{conc} = \frac{v_{act} + v_{conc}}{i_a} = \frac{v_c}{i_a} \quad (\text{A.8})$$

A resistência de ativação é dada como segue:

$$R_{act} = \frac{v_{act}}{i_a} = \frac{A}{i_a} \cdot \ln \left( \frac{J}{J_0} \right) \quad (\text{A.9})$$

E a resistência de concentração por:

$$R_{conc} = \frac{v_{conc}}{i_a} = -\frac{B}{i_a} \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (A.10)$$

Logo:

$$R_a = R_{act} + R_{conc} = \frac{v_a}{i_a} = \frac{A}{i_a} \cdot \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) - \frac{B}{i_a} \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (A.11)$$

Considerando-se (A.7) para uma única FC vê-se que é necessário multiplicar seus termos por um número de células idênticas que formam a pilha em estudo. Este fato é apresentado em (A.12) pela inclusão do fator n, o qual representa o número total de células da pilha.

$$\frac{n \cdot E}{(R_L + n \cdot R_{ohm})} - \frac{1}{(R_L + n \cdot R_{ohm}) \cdot \frac{C}{n}} \int i_c \cdot dt - \frac{1}{n \cdot R_a \cdot \frac{C}{n}} \int i_c \cdot dt = i_c \quad (A.12)$$

Com estas equações implementou-se o circuito da Figura A.2 no software PSim, a fim de representar o comportamento de uma pilha de CaC.

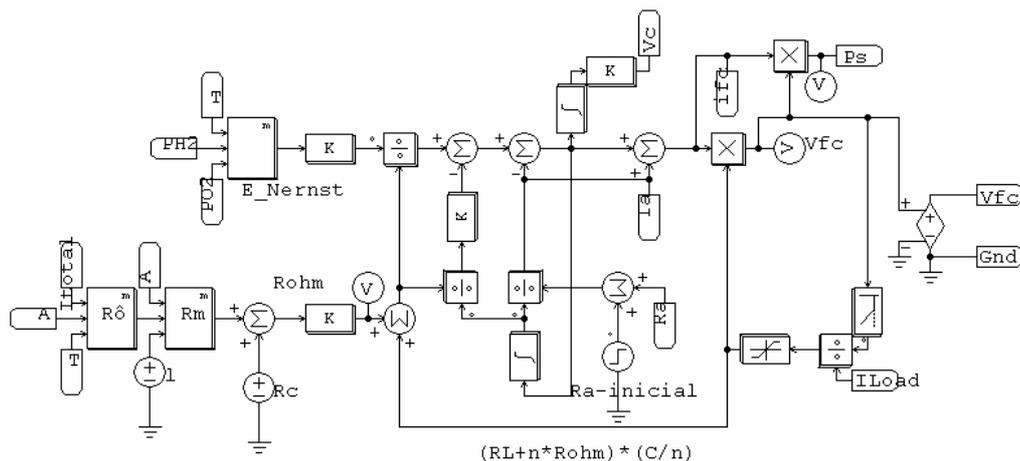


Fig. A.2. Modelo matemático de uma CaC no PSim, equação (A.12).

A Figura A.3 representa (A.11) para a determinação do valor de  $R_a$  e apresenta os parâmetros utilizados no modelo como densidade de corrente de troca, densidade de corrente inicial, densidade máxima de corrente, área efetiva da membrana, pressões de  $H_2$  e  $O_2$  e os blocos para o cálculo de  $v_{act}$  e  $v_{con}$ .

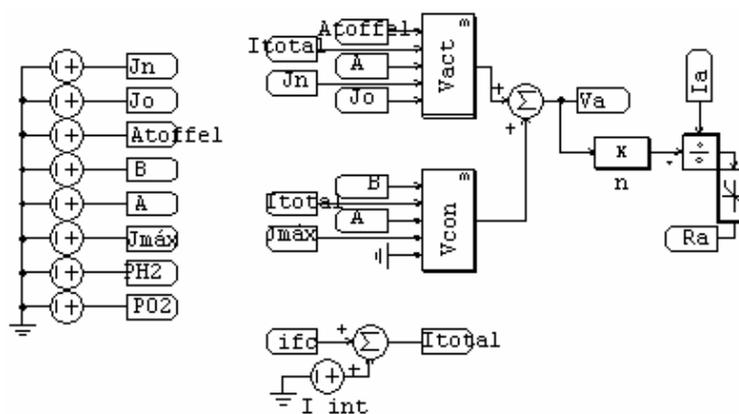


Fig. A.3. Cálculo do valor de  $R_a$  e parâmetros do modelo.

Na Figura A.4 é apresentado o comportamento dinâmico para a variação da corrente nas simulações da pilha SR-12. Nesta transição, percebe-se o transitório de corrente característico deste gerador (aproximadamente 23A em  $t = 2.04s$ ) durante a inserção da carga. Este comportamento dinâmico também é reproduzido de forma adequada pelo modelo.

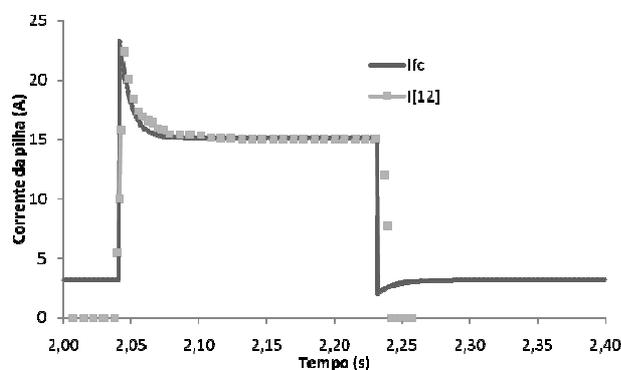


Fig. A.4. Cálculo do valor de  $R_a$  e parâmetros do modelo.

Na Figura A.5 tem-se o comportamento dinâmico da tensão da pilha SR-12 a qual foi simulada e comparada com dados reais provenientes do trabalho de Novaes [12]. Nota-se que a tensão apresenta uma queda rápida durante a inserção da carga e sofre uma recuperação lenta durante a remoção da mesma. O modelo apresentado neste trabalho tem uma boa aproximação com os dados reais obtidos do trabalho de Novaes [12]. Assim, pode-se verificar a capacidade da abordagem utilizada para representar as diferentes ações dinâmicas intrínsecas da pilha.

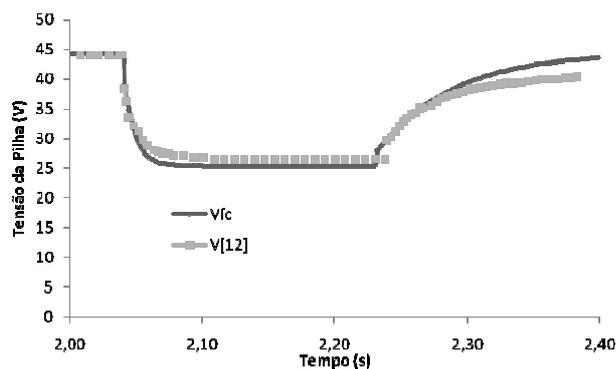


Fig. A.5. Cálculo do valor de  $R_a$  e parâmetros do modelo.

Na Figura A.6 têm-se a representação da potência para a simulação do modelo dinâmico. As diferenças entre os valores iniciais e finais da curva devem-se a limitações encontradas do programa PSim. Entretanto, o restante da curva modelada segue bem os resultados do trabalho de Novaes [12].

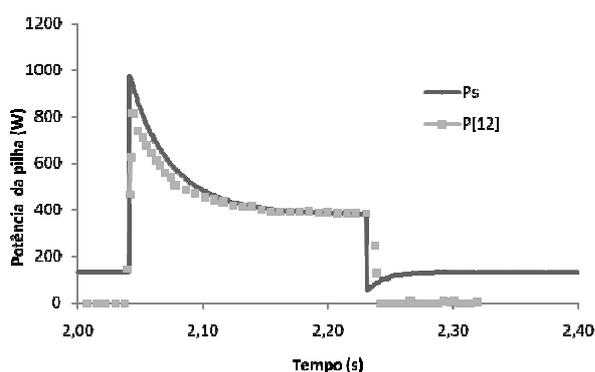


Fig. A.6. Cálculo do valor de  $R_a$  e parâmetros do modelo.

O modelo de um sistema de pilhas de células a combustível, utilizado nesta dissertação mostra uma redução na complexidade quando comparado a outros modelos apresentados pela literatura, e permite ao usuário final uma rápida implementação. O programa PSim como ferramenta de modelagem para células a combustível também consiste em uma vantagem considerando-se a simplicidade para manipulação deste programa, é possível a obtenção de resultados satisfatórios em um tempo relativamente reduzido.

## ANEXO 01

### IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR DE PILHAS DE CAC TIPO PEM

---

Com base em modelos matemáticos apresentados por (Corrêa, 2002) e através da simulação no Labview é possível demonstrar o comportamento das CaCs, Corrêa desenvolveu um programa que é capaz de realizar simulações utilizando cargas reais, podendo-se assim, observar e obtermos um maior entendimento dos principais fenômenos envolvidos no processo. A possibilidade da simulação de sistemas de geração de energia com células a combustível, frente à cargas elétricas reais torna-se atraente para a área de geração de energia e sistemas de potência, pois acrescenta maior veracidade às simulações realizadas tanto em condições normais como também para chaveamento de cargas elétricas, transitórios causados por estes chaveamentos, além de evitar o uso de hidrogênio. Permitindo-se simular de forma satisfatória o modelo da CaC, da qual se possui o modelo matemático, com segurança e custo reduzido.

As principais características das células, resultado do modelo matemático, são utilizadas como referência no simulador frente à cargas elétricas reais, utilizando sistemas físicos controlados por microcontrolador e por um computador conectado a uma placa de aquisição para obtenção dos dados. Com o simulador é possível avaliar o consumo de reagentes, adequação da velocidade de resposta para compensar oscilações externas naturais da rede, possibilidade de correção de fator de potência, inserções e retiradas de carga, análise de estabilidade, simulações de curvas de carga, desenvolvimento e testes de conversores de potência dedicados, e principalmente o desenvolvimento de técnicas de controle para as CaCs (Corrêa, 2002). O simulador permite a obter informações sobre temperatura e umidade da membrana da célula, quantidade de calor gerada, consumo de hidrogênio e oxigênio/ar, pressões dos reagentes, tensão e corrente de carga.

O simulador implementado tem como objetivos principais:

- i) reproduzir o comportamento dinâmico da geração de energia utilizando células a combustível frente à cargas elétricas reais;
- ii) permitir o desenvolvimento e testes de instrumentação e controle de células a combustível reais;
- iii) possibilitar uma avaliação do comportamento da pilha de geração com baixo custo, segurança e rapidez nos testes;
- iv) acompanhar o consumo e condições físicas dos reagentes;
- v) possibilitar a análise do comportamento elétrico para variações de carga.

O simulador deve comportar-se como uma CaC real, de tal forma que demonstre as suas dinâmicas características. A potência elétrica de saída da pilha deve, na maioria dos casos, ser condicionada, utilizando-se conversores de potência, exceto para as pilhas de baixas potências. A pilha de CaC tipo PEM gera energia na forma de corrente contínua com um nível de tensão relativamente baixo variável em função da corrente de carga e do número de células. Assim, é prática utilizar conversores de potência dedicados para condicionar e elevar esta tensão e/ou para transformá-la em corrente alternada, com um nível constante e adequado para a aplicação em geração de energia elétrica.

A potência do simulador desenvolvido neste trabalho é de 1 kW.

Para a implementação prática do simulador, este foi subdividido em duas partes: a) simulador eletroquímico; e b) simulador termodinâmico. Esta divisão facilita o entendimento do simulador, em relação as diversas variáveis envolvidas. Estas duas partes são, então, integradas, proporcionando a possibilidade de uma simulação completa das características fundamentais na operação de pilhas de células do tipo PEM, frente à cargas elétricas reais.

A Figura A01.1 mostra o diagrama de blocos do simulador, ambos dependentes da corrente de carga.

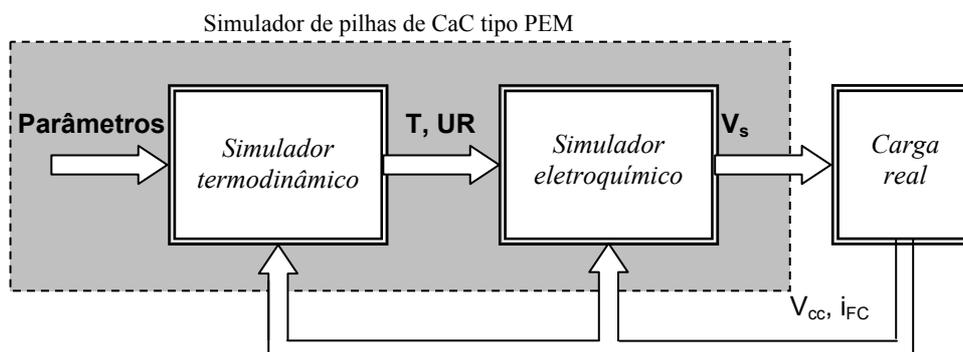


Figura A01.1 – Diagrama de blocos do simulador de pilhas de CaC PEM.

De uma forma geral, o simulador termodinâmico apresenta como saídas a temperatura da célula e umidade da membrana. Neste trabalho o comportamento da simulação física do modelo termodinâmico não foi considerada, utilizando-se pelo simulador eletroquímico apenas os parâmetros da pilha, a tensão e a corrente de carga para reproduzir o comportamento da pilha frente à carga elétrica real. A corrente de carga e a tensão resultante são realimentadas para os módulos, permitindo a determinação do novo ponto de operação.

### A.1 Simulador Eletroquímico

O simulador eletroquímico constitui-se de um conversor CA/CC de potência a tiristor para 1 kW, 220/380 V, com filtro passivo de saída e controle por computador e microcontrolador, o qual é responsável por fornecer a potência elétrica para a carga. O diagrama de blocos desse simulador é apresentado na Figura A01.2. Seus componentes principais são: conversor CA/CC, filtro de saída do tipo LC, computador, microcontrolador, sistema de aquisição de dados e sensores de tensão e corrente.

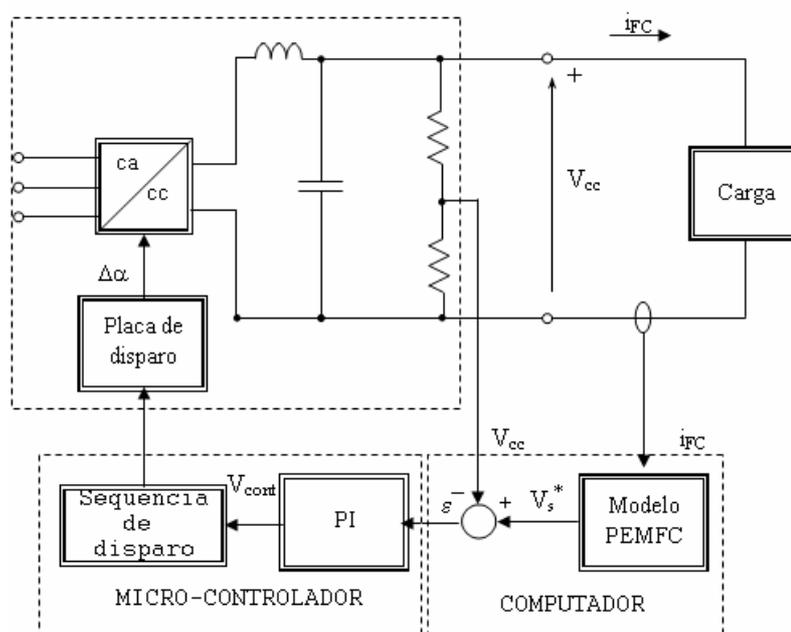


Figura A01.2 – Diagrama de blocos do simulador de pilhas de CaC.

O programa do simulador é composto pela etapa do modelo da pilha e do controle em malha fechada do conversor CA/CC. O algoritmo de controle digital para o conversor CA/CC é do tipo Proporcional-Integral (PI).

O funcionamento do módulo de simulação elétrica pode ser descrito pelas seguintes etapas:

Inicialmente, definem-se os parâmetros construtivos e operacionais da pilha a ser utilizada. Estes dados são armazenados para utilização ao longo das várias rotinas do programa.

A cada intervalo de simulação, são adquiridos os valores reais instantâneos da corrente e da tensão presentes na carga.

Com base na corrente de carga, é calculada a tensão de saída da pilha,  $V_s$ , através do modelo matemático. Este valor é, então, utilizado como referência para o controle do conversor ( $V_s^*$ ).

A tensão de saída do conversor CA/CC ( $V_{cc}$ ) é comparada com o valor de referência ( $V_s^*$ ). O sinal de erro resultante ( $\varepsilon$ ) é utilizado como entrada para o algoritmo de controle PI.

O sinal de saída do controlador PI é convertido em uma tensão de controle ( $V_{cont}$ ), com nível adequado para acionar a placa de disparo dos tiristores.

Na placa de disparo, a tensão de controle é convertida em um sinal de gatilho para os tiristores, resultando em uma variação no ângulo de disparo ( $\Delta\alpha$ ), tal que a tensão de saída do conversor siga o comportamento da tensão de referência.

Os parâmetros necessários para a simulação são os parâmetros construtivos e operacionais da pilha a ser simulada.

A Figura A01.3 mostra a foto do conversor implementado para simular modelo eletroquímico antes da instalação no gabinete, juntamente com o filtro e a placa de aquisição de dados, na Figura A01.4 é mostrada a placa do microcontrolador e dos sensores de tensão e corrente utilizados no simulador e na Figura A01.5 é apresentado um fluxograma do algoritmo de controle do simulador.



Figura A01.3 – Foto do simulador eletroquímico ligado a placa de aquisição

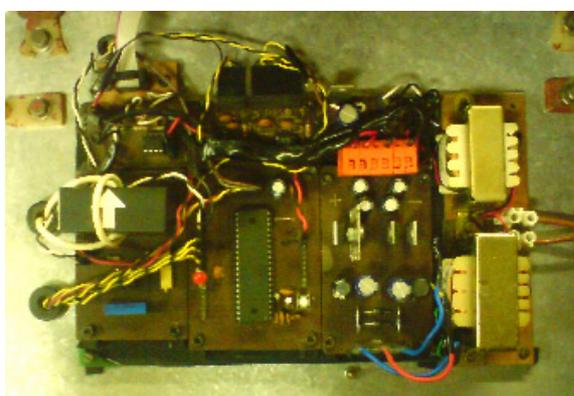


Figura A01.4 – Foto da placa do microcontrolador e dos sensores de tensão e corrente do simulador

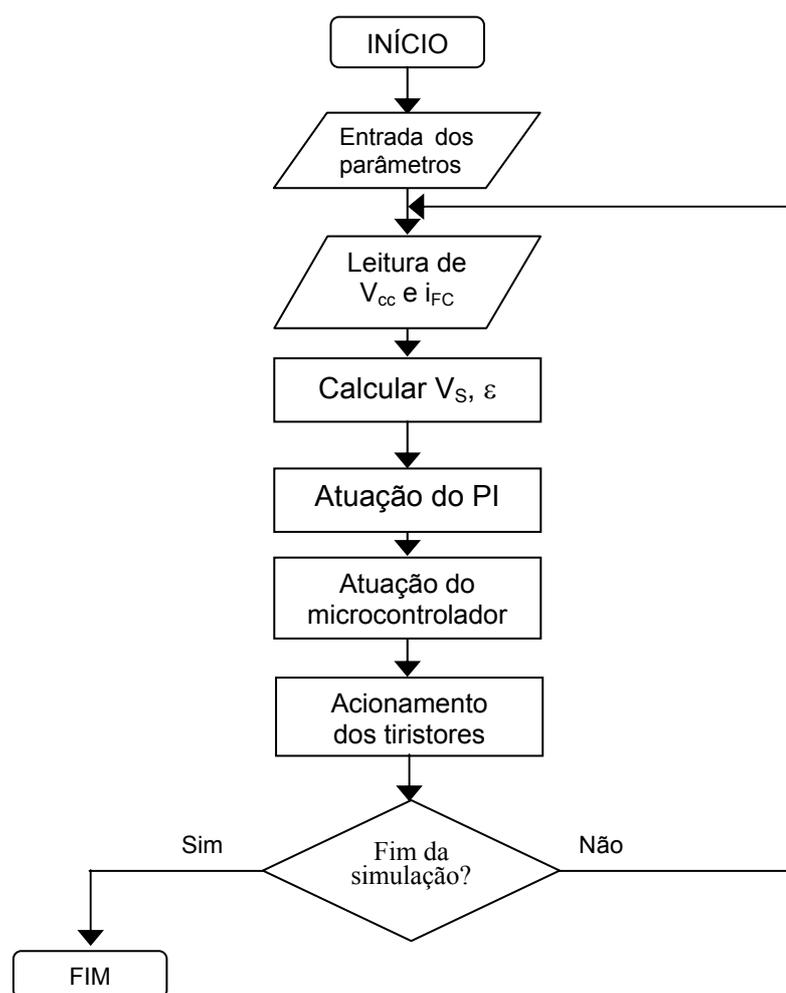


Figura A01.5 – Fluxograma do algoritmo de controle do simulador eletroquímico

## A.2 Modelagem do Conversor CA/CC

Como visto anteriormente uma pilha de células de combustível fornece em sua saída uma tensão CC com valor variável. O valor da tensão de saída da pilha segue a equação abaixo:

$$V_S = n \cdot V_{FC}$$

Esta tensão varia em função da corrente de carga. Para possibilitar que o simulador tenha as mesmas características da pilha, no que se refere à tensão, foi

utilizado um conversor CA/CC, seguido de um filtro passa-baixas LC. A Figura A01.6 apresenta o esquema do conversor, filtro e o transformador trifásico de entrada.

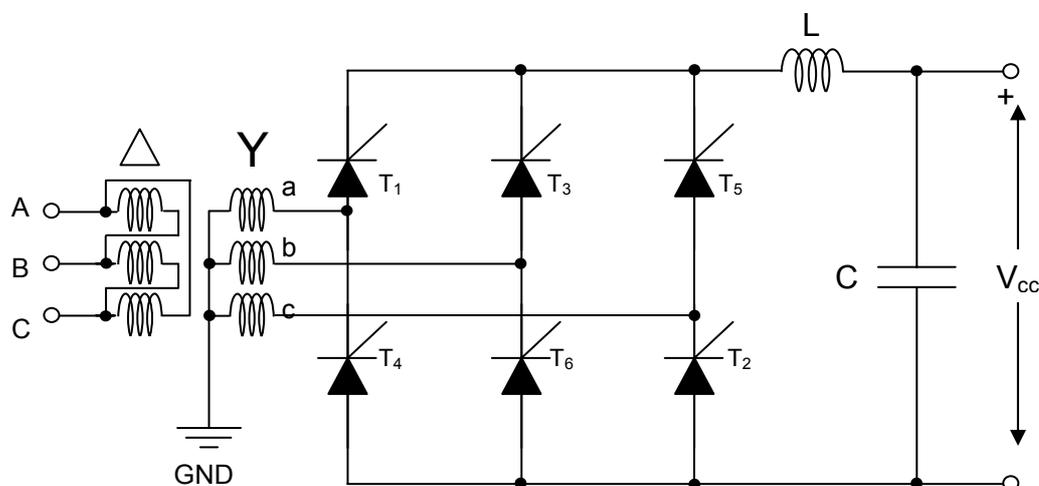


Figura A01.6 – Conversor de potência CA/CC

O conversor CA/CC implementado para o simulador utiliza tiristores, em uma ponte trifásica totalmente controlada de seis pulsos. O conversor é alimentado por um transformador trifásico de 1 kVA.

Os enrolamentos do circuito primário do transformador são ligados em triângulo ( $\Delta$ ), enquanto que o circuito secundário está ligado em estrela (Y). O terminal central do circuito secundário é usado como referência para o circuito de disparo dos tiristores. Para o controle do conversor em malha fechada foi utilizado um controlador PI digital.

Na Figura A01.7 é mostrado o simulador instalado em um gabinete, com um transformador um filtro passivo LC, circuitos de disparo, e sensores .



Figura A01.7 – Foto do simulador implementado fisicamente.





## ANEXO 03

### AQUISIÇÃO DOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE

---

Os valores de tensão dos geradores e do barramento CC são obtidos por intermédio de um divisor de tensão resistivo, mostrado na Figura A03.1, ajustado de modo que a amplitude do sinal de tensão que chega ao DSP não ultrapasse 3,3 V, que é o valor máximo admitido pelo conversor analógico/digital do mesmo.

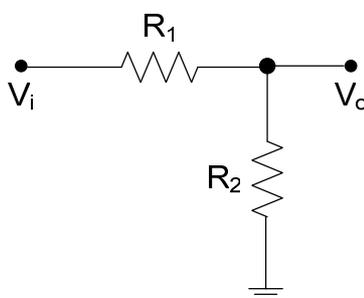


Figura A03.1 – Sensor de tensão.

Os sinais de corrente são medidos através de um dispositivo de efeito Hall, de dimensões pequenas e isolamento elétrico de 800 V, marca Allegro, modelo ACS704ELC-015, que permite correntes de até 15 A. O ganho do circuito sensor é definido de modo que o valor de saída não ultrapasse 3,3 V. Na Figura A03.2 é mostrada a foto do sensor num circuito prático.

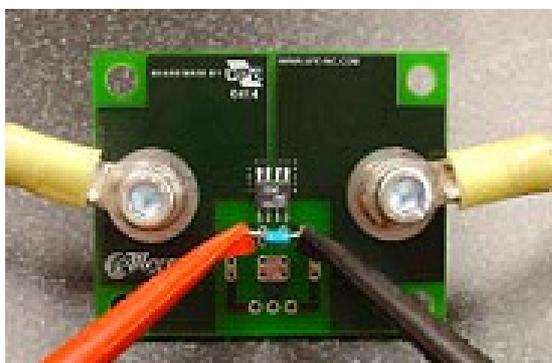


Figura A03.2 – Foto do sensor de corrente.

A Figura A03.3 é apresentada o diagrama de blocos do sensor de corrente ACS704, mostrando a simplicidade de ligação do circuito.

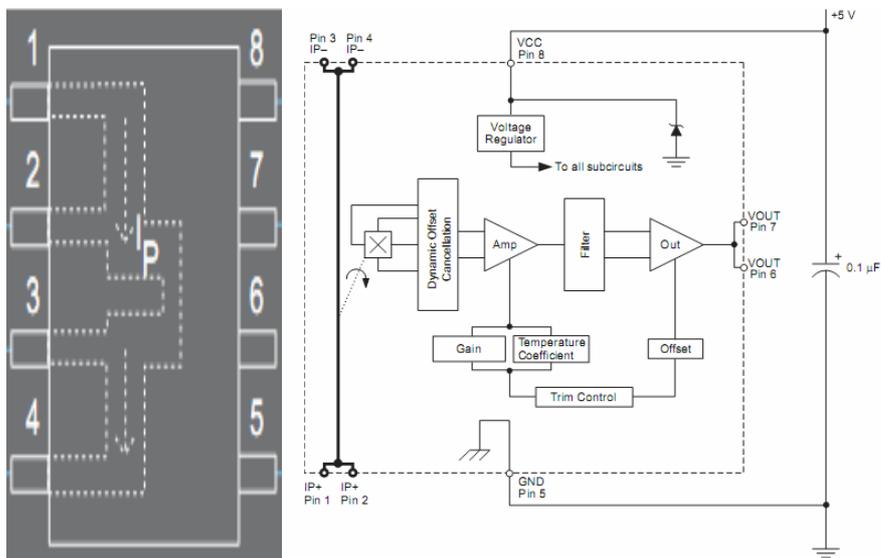


Figura A03.3 – Diagrama de blocos do sensor de corrente.