

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

**BASES EXPERIMENTAIS PARA O PROJETO,  
AUTOMAÇÃO E INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA COM CÉLULAS DE  
COMBUSTÍVEL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Frank Gonzatti**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**BASES EXPERIMENTAIS PARA O PROJETO, AUTOMAÇÃO E  
INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM  
CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL**

**por**

**Frank Gonzatti**

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

**Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005**

**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

**BASES EXPERIMENTAIS PARA O PROJETO, AUTOMAÇÃO E  
INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM  
CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL**

elaborada por  
**Frank Gonzatti**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

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

**Jonas Rodrigues Gomes, Dr. (CGTEE)**

**Luciane Neves Canha, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**

**Ricardo Quadros Machado, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 15 de setembro de 2005.

**Dedico este trabalho ao meu filho  
Franco, por mostrar que as melhores  
coisas da vida são simples e de graça.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica pelo confiança em mim depositada no desenvolvimento do meu trabalho, e aos grupos NUPEDEE (Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica) e CEEMA (Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente) pelo apoio técnico e administrativo.

Aos componentes do CEEMA, principalmente ao Prof. Geomar, Ricardo, Andrei, Henrique, Fredi, Diego B., Diego M., Marcos e Jocemar pelo auxílio técnico, compartilhamento de idéias e críticas, as quais contribuíram para desenvolvimento desse trabalho.

Ao Professor Felix A. Farret, pela sugestão do tema da dissertação e pela orientação com entusiasmo, confiança, motivação e humanismo.

A minha família, pelo apoio incondicional nas minhas decisões, pelo incentivo, amor e carinho mesmo estando longe geograficamente.

Agradecimento especial a minha esposa Cíntia por estar sempre do meu lado, pelo seu amor, compreensão e dedicação.

**“Algo só é impossível até que alguém  
duvide e acabe provando o  
contrário.”**

(Albert Einstein, cientista)

## RESUMO

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

### **BASES EXPERIMENTAIS PARA O PROJETO, AUTOMAÇÃO E INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL**

AUTOR: FRANK GONZATTI

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 15 setembro de 2005.

O tema principal desta dissertação é o estabelecimento de bases experimentais para o projeto, automação e a instalação de uma microcentral de geração de energia elétrica com pilhas de células de combustível do tipo PEM (BCS Technology). Esta central deve operar automaticamente, comandada por microcontrolador que atua diretamente na temperatura, na umidade da membrana, na quantidade de ar de reação, no monitoramento da tensão individual de cada célula e na tentativa da recuperação de células problemáticas. Para que este controle atue são necessários mecanismos auxiliares especiais de forma a não causarem danos às células. Na confecção do protótipo procurou-se especificar dispositivos de baixo custo e de fácil disponibilidade no mercado nacional. Locais especiais também foram projetados e construídos para abrigar a pilha quando em operação de forma a garantir o máximo de segurança. Portanto, este trabalho busca fornecer bases teóricas e experimentais para a implementação de uma central estacionária de geração com pilhas de células de combustível.

Palavras-chaves: Energia alternativa, Automação, Células de Combustível.

## **ABSTRACT**

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

### **EXPERIMENTAL BASES FOR THE PROJECT, AUTOMATION AND INSTALLATION OF POWER GENERATION SYSTEMS WITH FUEL CELLS**

AUTHOR: FRANK GONZATTI

SUPERVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Date and Place: September, 15<sup>th</sup> 2005, Santa Maria, RS, Brazil

The main concern of this dissertation is the establishment of experimental bases for the project, automation, and installation of a micro-power plant for electric power generation based on PEM fuel cell stacks (BCS Technology). The plant operates automatically, and its control is accomplished by a microcontroller acting directly in the temperature, in the humidity of the membrane, in the amount of reaction air, in the monitoring of the individual voltage of each cell and in the attempt of recovery of a possibly problematic cell. For control operation special auxiliary mechanisms are necessary to avoid dangerous conditions to the stack. The making of the prototype is of low cost and easily found items in national market access have been intended. Special controlled atmospheres were also designed and built to shelter the stack and obtain safety operation when the stack is on. Therefore, the work tries to find the theoretical and experimental bases for a static power plant implementation based on fuel cell systems.

Word-keys: Alternative Energy, Automation, Fuel Cell.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Gráfico Umidade Relativa versus Temperatura, para uma dada razão estequiométrica, pressão de 1 bar, com ar de entrada a 20°C e 70% de umidade relativa.....	20
FIGURA 4.1 – Princípio de funcionamento de uma célula de combustível .....	22
FIGURA 4.2 – Característica tensão versus corrente de uma célula de combustível .....	23
FIGURA 4.3 – Circuito equivalente de uma célula de combustível .....	24
FIGURA 4.4 – Características tensão versus corrente da pilha de 500W da BCS Technology	25
FIGURA 4.5 – Degrau de corrente para simulação dinâmica.....	26
FIGURA 4.6 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente .....	26
FIGURA 4.7 – Rendimento da pilha para um degrau de corrente .....	27
FIGURA 4.8 – Potência gerada pela pilha para um degrau de corrente .....	27
FIGURA 5.1 – Esquema do chaveamento entre o cátodo e o ânodo da célula de combustível para fins de recuperação da operação normal da célula e aumento do rendimento.....	34
FIGURA 6.1 – Esquema da montagem mecânica do protótipo .....	37
FIGURA 6.2 – Foto interno da central de gás.....	38
FIGURA 6.3 – Foto da instalação na sala de hidrogênio .....	38
FIGURA 6.4 – Foto do sistema de medição de temperatura e umidade .....	40
FIGURA 6.5 – Foto do sistema de refrigeração a água.....	40
FIGURA 6.6 – Foto do sistema de injeção do ar de reação .....	41
FIGURA 6.7 – Foto da pilha com a estrutura auxiliar. ....	42
FIGURA 6.8 – Circuito para medição da tensão individual de cada célula.....	43
FIGURA 6.9 – Foto do circuito de medição da tensão individual em cada célula .....	44
FIGURA 6.10 – Esquema do circuito de seleção para o chaveamento do conjunto de células. ....	46
FIGURA 6.11 – Foto da placa do circuito de seleção para o chaveamento do conjunto de células.....	47
FIGURA 6.12 – Foto do circuito para o acionamento das cargas.....	49
FIGURA 6.13 – Fluxograma do controlador primário.....	51

FIGURA 6.14 – Fluxograma do controlador secundário .....	52
FIGURA 6.15 – Sub-rotina para medição e controle da tensão individual de cada célula .....	53
FIGURA 6.16 – Sub-rotina para o controle do chaveamento das células.....	54
FIGURA 7.1 – Comportamento do PWM da bomba de ar para variação da umidade relativa. .....	59

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Geração de energia versus impacto ambiental.....	3
TABELA 3.1 – Valores de $\Delta\bar{g}_f$ , $E_r$ e $\eta_{FCmax}$ (ref. a HHV).....	11
TABELA 3.2 – Valores da pressão de saturação do vapor para uma dada temperatura.....	19
TABELA 3.3 – Valores da umidade relativa para o ar de saída para uma dada razão estequiométrica e temperatura a uma pressão de 1 bar, com ar de entrada a 20°C e 70% de umidade relativa .....	20
TABELA 4.1 – Parâmetros de uma célula do tipo PEM de 500 W da BCS.....	25
TABELA 6.1 – Tabela verdade da seleção das células para medição.....	45
TABELA 6.2 – Fórmula para obter o código de seleção para medição da tensão individual das células.....	46
TABELA 6.3 – Tabela verdade para seleção das células para chaveamento.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS

### Lista de Abreviaturas

FC	Células de combustível (fuel cell)
LHV	Poder calorífico inferior (Lower Heating Value)
HHV	Poder calorífico superior (Higher Heating Value)
Mux	Multiplexador
PEM	Membrana de troca protônica (Próton Exchange Membrana)
PWM	Modulação por largura de pulso

### Lista de Símbolos

A	Área ativa da célula ( $\text{cm}^2$ )
$a_x$	Atividade da substância "x"
B	Constante para determinação do potencial de concentração (V)
Ca	Capacitância equivalente para resposta dinâmica (F)
$c_{\text{O}_2}$	Concentração de oxigênio ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ )
$E_{\text{Nernst}}$	Potencial de Nernst – Tensão da célula em circuito aberto (V)
$E_r$	Tensão reversível da célula de combustível
F	Constante de Faraday (96485)
$\Delta \bar{g}_f$	Mudança na energia livre de Gibbs de formação molar (J/mol)
$\Delta \bar{g}_f^0$	Mudança na energia livre de Gibbs de formação molar à pressão de 100kPa e temperatura de 25°C (J/mol)
$\Delta \bar{h}_f$	Mudança na entalpia de formação (J)

$i_{FC}$	Corrente de operação da célula (A)
$I_S$	Corrente da pilha (A)
$J$	Densidade de corrente elétrica (A/cm <sup>2</sup> )
$J_{Máx}$	Densidade de corrente elétrica máxima (A/cm <sup>2</sup> )
$\ell$	Espessura da membrana (cm)
$\dot{m}$	Taxa de fluxo de massa (kg/s)
$m_{H_2}$	Massa de hidrogênio (kg)
$n$	Número de células na pilha
$P_{H_2}$	Pressão parcial de hidrogênio (atm)
$P_{O_2}$	Pressão parcial de oxigênio (atm)
$P_S$	Potência elétrica da pilha de células de combustível (W)
$P_{sat}$	Pressão de vapor saturado (kPa)
$P_t$	Pressão de operação da célula (atm)
$P_W$	Pressão parcial de água (kPa)
$Q$	Vazão (L/min)
$q$	Carga elétrica (C)
$R$	Constante universal dos gases (8,3145 J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$R_{ativação}$	Resistência equivalente ao sobrepotencial de ativação ( $\Omega$ )
$R_C$	Resistência equivalente de contatos ( $\Omega$ )
$R_{concentração}$	Resistência equivalente ao sobrepotencial de concentração ( $\Omega$ )
$R_M$	Resistência equivalente da membrana ( $\Omega$ )
$R_{\text{ôhmico}}$	Resistência equivalente ao sobrepotencial ôhmico ( $\Omega$ )
$\Delta \bar{s}_f$	Mudança na entropia de formação molar (J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )
$T$	Temperatura
$T_{ref}$	Temperatura de referência (298,15 K)
$UR$	Umidade relativa do ar
$W_{el}$	Trabalho elétrico (J/mol)
$V_{con}$	Sobrepotencial de concentração (V)
$V_{control}$	Tensão submetido à bomba de injeção de ar (V)
$V_{FC}$	Tensão média da célula de combustível (V)
$V_{\text{ôhmico}}$	Sobrepotencial ôhmico (V)

## Lista de Letras Gregas

$\eta_{FC}$	Eficiência da célula de combustível
$\rho_M$	Resistividade específica da membrana para o fluxo de íons ( $\Omega.cm$ )
$\lambda$	Razão estequiométrica
$\mu_f$	Coefficiente de utilização de combustível
$\Psi$	Parâmetro utilizado para cálculo da resistividade da membrana
$\xi_i (i=1 \dots 4)$	Coefficientes paramétricos para o cálculo do sobrepotencial de ativação

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Manual da pilha BCS.....	80
ANEXO B – Hidrogênio .....	88
ANEXO C – Fatores de conversão para as principais unidades de pressão .....	93

## SUMÁRIO

RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS .....	x
LISTA DE ANEXOS .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	4
1.1.1 Objetivo geral .....	4
1.1.2 Objetivos específicos .....	4
1.2 Importância do trabalho .....	4
1.3 Estrutura do trabalho .....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3 DETALHAMENTO MATEMÁTICO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL .....	9
3.1 Tensão reversível .....	9
3.2 Eficiência .....	10
3.3 Tensão gerada e quedas de tensão .....	13
3.3.1 Tensão de Nernst .....	13
3.3.2 Potencial de ativação .....	14
3.3.3 Perdas por correntes internas e passagem direta de combustível .....	15
3.3.4 Potencial ôhmico .....	15
3.3.5 Potencial de concentração .....	16



3.4 Consumo de gases e produção d'água.....	17
3.4.1 Consumo de oxigênio.....	17
3.4.2 Consumo de hidrogênio.....	17
3.4.3 Água gerada pela reação.....	18
3.5 Umidade relativa.....	18
3.6 Considerações finais.....	21
4 COMPORTAMENTO DINÂMICO E SIMULAÇÃO DO MODELO ELETROQUÍMICO.....	22
4.1 Simulação do modelo eletroquímico.....	24
4.2 Considerações finais.....	28
5 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS GRANDEZAS CONTROLADAS.....	29
5.1 Temperatura da membrana.....	29
5.2 Umidade da membrana.....	30
5.3 Fluxo de hidrogênio.....	32
5.4 Desempenho da célula.....	33
5.5 Considerações finais.....	34
6 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	36
6.1 Montagem mecânica do sistema.....	36
6.1.1 Instalação de hidrogênio.....	36
6.1.2 Sistema de refrigeração da pilha.....	39
6.1.3 Injeção do ar de reação.....	40
6.1.4 Preparação da pilha.....	41
6.2 Circuitos eletrônicos auxiliares.....	42
6.2.1 Medição da tensão individual de cada célula.....	43
6.2.2 Seleção para o chaveamento das células.....	46
6.2.3 Circuitos de medição.....	48
6.2.4 Circuitos dos atuadores.....	48
6.3 Fluxogramas.....	49
6.3.1 Fluxograma do controlador principal.....	50
6.3.2 Fluxograma do controlador secundário.....	51
6.4 Considerações finais.....	54

7 RESULTADOS PRÁTICOS.....	56
8 CONCLUSÕES.....	64
8.1 Contribuições.....	65
8.2 Sugestões para continuidade do trabalho.....	65
APÊNDICES .....	68
ANEXOS.....	81

## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

---

A geração de energia elétrica nas últimas décadas não acompanhou o crescimento do consumo, agravando-se no final da década de 90 com a crise no abastecimento a qual levou o governo a adotar uma série de medidas. Uma delas foi estimular a geração de energia descentralizada e em pequena escala.

Porém, qualquer forma de geração de energia está ligada estreitamente à poluição e degradação do meio ambiente. Este fato preocupa tanto a população quanto o governo, pois nos últimos anos vêm ocorrendo uma conscientização e maior comprometimento de ambas as partes com o meio ambiente. Uma demonstração disso foi dada pelo governo brasileiro em 1992 na cidade do Rio de Janeiro na histórica ECO-92, onde 170 países reuniram-se para a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Nesta ocasião foi gerada e assinada a Agenda 21 que é um compromisso internacional dos governos com o meio ambiente. Tais propósitos foram reafirmados em setembro de 2002, na Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (também conhecida como Rio+10), em Joanesburgo, na África, e também através do Protocolo de Kyoto, que é um acordo internacional que estabelece metas de redução de gases poluentes para países industrializados. Este documento foi assinado por 141 nações e foi finalizado em 1997. Portanto, a instalação de novas estações de geração de eletricidade é de suma importância para o país, mas tem-se que considerar os impactos ambientais por elas ocasionadas, pois é um compromisso firmado pelo Brasil com a sociedade internacional e também com seus descendentes.

Então, o desafio é gerar energia com o mínimo de poluição e degradação do meio ambiente. Entre as fontes geradoras com este perfil e que merece destaque e análise é a pilha de Células de Combustíveis (FC), a qual é o objeto de estudos desta dissertação. Seu princípio foi descoberto em 1839 por William Grove e suas primeiras aplicações foram feitas pela NASA na década de 50 em programas espaciais. Ressurgiram nos últimos anos em pesquisas como uma forma promissora de fontes de energia para automóveis e geração estacionária. Este conhecimento, porém, tem sido restrito a fabricantes e centros de pesquisas e com rápidos desdobramentos onde muito segredo industrial está envolvido. Com isto, tem sido

difícil saber-se dos desenvolvimentos mais recentes em automação para seleção das melhores soluções com este propósito.

Para situar melhor este panorama, são considerados diferentes tipos de pilhas de células de combustível, sendo que a principal diferença entre elas reside no tipo de eletrólito utilizado para o transporte dos ânions. Isto faz com que elas possuam características individuais de funcionamento. Atualmente, os tipos mais conhecidos de células de combustível são:

- Células de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC);
- Células de Combustível de Membrana de Troca Protônica (PEM);
- Células de Combustível de Carbonatos Fundidos (MCFC);
- Células de Combustível de Óxido Sólido (SOFC);
- Células de Combustível Alcalina (AFC);
- Células de Combustível de Metanol Direto (DMFC);
- Células de Combustível Regenerativas;
- Células de Combustível de Zinco-Ar (ZAFC);
- Células de Combustível de Cerâmica Protônica (PCFC).

Essas pilhas, por sua vez, agrupam-se em duas categorias, as células de baixa temperatura de operação e as de alta temperatura de operação. As pilhas de baixa temperatura requerem um processamento mais complexo do combustível, pois só podem funcionar com hidrogênio molecular puro. Como tal, neste tipo de pilha de célula de combustível é necessário um equipamento auxiliar (reformador) para converter o combustível primário, em geral hidrocarbonetos (gás natural, metanol, gasolina,...) em hidrogênio.

Na célula de combustível não existe combustão, mas uma reação química para formação de água. As emissões nestes sistemas são muito inferiores às que teriam lugar caso se efetuasse a queima destes combustíveis, como ocorre nas centrais clássicas. Portanto, este tipo de geração produz uma energia limpa, onde quase não existem problemas com emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio, conhecidos como  $SO_x$ ,  $NO_x$ , conforme quadro comparativo 1.1. Sua operação é silenciosa e a estrutura apresenta uma tecnologia modular, vida útil razoavelmente longa, seus componentes são facilmente recicláveis e, ainda, possui poucas partes móveis com desgastes desprezíveis.

Tipo de geração de energia	Impacto Ambiental (Valores em kg de poluentes por MWh)			
	Combustão a gás	Combustão a óleo	Combustão a carvão	Célula a combustível
Particulados	0.2	0.2	0.2	0.0000045
NOx	0.3	0.5	1.1	0.028 a 0.2
SOx	-	1.2	1.9	0.00036
Fumaça	Opacidade	Opacidade	Opacidade	Desprezível

Tabela 1.1 – Geração de energia versus impacto ambiental. (Fonte: Web Site do Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT).

Entre as células de combustíveis existentes, a que se mostra a mais promissora candidata para geração estacionária, tanto para operação isolada como conectada a rede pública, é a do tipo PEM (Próton Exchange Membrane - Membrana de Troca de Prótons). Este tipo de célula pode ter água pura como resíduo, e opera em baixas temperaturas, possibilita uma partida relativamente rápida, seu eletrólito é um polímero sólido, o que reduz as preocupações na construção, transporte e segurança e apresenta elevada densidade de potência.

Como se disse anteriormente, a pilha de células de combustível é comercialmente promissora, motivo pelo qual as diferentes tecnologias de fabricação são ainda mantidas sob muito segredo por indústrias e grupos de pesquisas. Portanto, o desenvolvimento de um sistema de automação para esse tipo de geração para atuar como fonte isolada ou conectada a rede é de suma importância para ampliar o conhecimento, dominar a tecnologia, e assim dar continuidade a pesquisas neste tipo de geração.

A automação de células de combustível pode ser dividida em duas partes: a automação interna e a automação externa. A automação externa envolve-se com a utilização da energia vinda da célula de combustível com base em informações advindas das necessidades do sistema de energia ao qual ela está conectada. Por exemplo, no caso de uma célula conectada a rede de distribuição, a função da automação externa seria responsável por compatibilizar a tensão, frequência e sincronismo com a rede. Esta parte da automação é fortemente relacionada com a eletrônica de potência, eletroquímica, sistemas elétricos, técnicas de controle e otimização.

Já a automação interna, preocupa-se com a operação da célula propriamente dita, e seu controle depende do conhecimento de detalhes construtivos da célula, do comportamento eletroquímico e térmico, entre outros. A partir destas informações o controle irá garantir o bom desempenho e maior vida útil e atuará diretamente no controle do fluxo de gases, da

pressão, da estequiometria, da temperatura e umidade na membrana, além das variáveis elétricas, rendimento eletroquímico, corrente, tensão e potência. Os conhecimentos envolvidos nesta parte referem-se à eletroquímica, eletromecânica, otimização, automação, controle de processos e materiais.

A automação interna, o projeto e a instalação deste tipo de geração são os focos desta dissertação dentro do objetivo maior de buscar a operação da pilha sem danos à membrana, com mínima perda, com confiabilidade e segurança, sempre atendendo a um sinal de ordem externa.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

Estabelecimento de bases experimentais para o projeto, automação e instalação de sistemas de geração de energia com pilhas de células de combustível do tipo PEM de pequena potência. Com isso pretende-se ampliar as oportunidades de usuários, técnicos e pesquisadores com o conhecimento e domínio de uma tecnologia promissora e muito pouco divulgada tecnicamente no Brasil.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Levantamento dos conhecimentos disponíveis e desenvolvimento de bases experimentais para a instalação de um protótipo para geração de energia elétrica baseada em células de combustível (FC) do tipo PEM, visando o melhor aproveitamento dos recursos financeiros e de energia, mínimo impacto ambiental e atendendo normas de segurança no uso de hidrogênio.

## **1.2 Importância do trabalho**

Este trabalho justifica-se pela divulgação da automação de sistemas de energia na tentativa de solucionar um problema que nos últimos anos tem chamado muito a atenção: a geração de energia elétrica com baixíssimos impactos ambientais e máximo rendimento.

Além disso, pretende-se ampliar os conhecimentos e o domínio das tecnologias ainda mantidas com um certo grau de segredo por indústrias e instituições de pesquisas.

Este estudo contribuirá não só para a abertura do conhecimento no mundo acadêmico, como para a formação de especialistas no assunto, já que se trata de uma tecnologia nova e promissora. Também contribuirá para a preservação do meio ambiente, para abastecimento de energia e para familiarização com a tecnologia.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

No Capítulo 1 é dada uma visão geral sobre geração de energia elétrica convergindo para o uso de pilhas de células de combustível. Aborda também a proposta de automação interna dessas pilhas desenvolvida neste trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da literatura sobre as grandezas que devem ser controladas e métodos de automação de pilhas de células de combustível bem como, quais dispositivos a serem utilizados.

No Capítulo 3 é feita uma revisão matemática das células de combustível que ajudarão no entendimento dos capítulos posteriores bem como para modelagem da célula para simulação.

No Capítulo 4 apresentam-se as características da tensão da saída conforme as quedas de potencial. São realizadas também, simulações do modelo eletroquímico usando Matlab<sup>®</sup> a partir das equações do capítulo anterior com os parâmetros da célula usados no protótipo.

No Capítulo 5 são mostradas as principais grandezas, considerações e formas de automação interna usada no protótipo.

O Capítulo 6 mostra detalhes da instalação do protótipo, como: edificação do ambiente da sala de hidrogênio, central de gás, placas de interface e medições, sistema de refrigeração e de injeção de ar. Neste capítulo, também é apresentado e comentado o fluxograma de controle da pilha.

O Capítulo 7 mostra os testes feitos no protótipo sendo montado no Laboratório do CEEMA adicionando-se comentários sobre os resultados obtidos.

Finalmente, as principais conclusões, idéias para prosseguimento do trabalho e principais contribuições dessa dissertação são apresentadas no Capítulo 8.

## CAPÍTULO 2

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

Para a instalação e a automação de pilhas de células de combustível assim como em qualquer outra fonte geradora, existem alguns fatores que devem ser levados em consideração para que a mesma atue com segurança e sem danos. Um desses cuidados é a escolha da bomba responsável pela injeção de ar para a reação. Em [10] são mostrados vários tipos de compressores existentes. Parece ser consenso que a bomba ideal para operar em células de 200W a 2kW é a bomba de diafragma, principalmente por não contaminar o ar de reação e conseqüentemente, a célula com lubrificantes ou resíduos oriundos da bomba. Seu princípio de funcionamento faz com que o ar seja movido pela deformação do diafragma, evitando assim que o ar entre em contato com as partes móveis da bomba que são os principais responsáveis pela contaminação, além de serem de baixo custo, baixo consumo, silenciosas e operarem por longos períodos.

Além do cuidado com equipamentos auxiliares, existem grandezas que devem ser controladas e mantidas na sua faixa de operação. Duas dessas grandezas são a pressão e temperatura de operação, que geralmente são estabelecidas pelo fabricante em seu manual. A pressão do gás na entrada da célula é algo em torno de 1,5 psi e a temperatura máxima de operação é em torno de 65° C, os quais são definidos em [2]. Segundo [10], além da pressão de entrada do gás, este deve possuir poucos contaminantes, ou seja, a qualidade do hidrogênio injetado na célula deve possuir uma quantidade mínima de monóxido de carbono, uma vez que este reage com a platina, assim contaminando o catalisador. A porção desse gás deve ser menor do que 10 ppm. Em diversas pilhas o fabricante estipula a pureza, [1] informa que a pureza mínima permitida é de 0,9995 com preferência ao gás com pureza de 0,9999. Nesta mesma bibliografia são definidos itens de segurança para a operação com gás hidrogênio, que comumente são compostos dos seguintes itens: válvula corta chamas, válvulas de segurança, válvulas redutoras de pressão, válvulas solenóides, exaustor além do detector de presença de hidrogênio.

Outro item que se deve considerar é o que diz respeito à umidade da membrana. Para que a pilha tenha um bom desempenho e opere sem danos à membrana, tem que estar bem hidratada, porém sem condensação. As referências [9,10] descrevem formas de controlar a



umidade da membrana. Entre elas a umidificação externa, que consiste em umedecer os gases de entrada, envolvendo neste caso um custo adicional e um processo mais complexo. Existe ainda a célula "auto-umidificada", descrita por Watanabe (1996), onde o eletrólito é modificado, não só para reter água, mas também para produzi-la. Retentores são incrementados pelas impregnações do eletrólito com partículas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e titânia ( $\text{TiO}_2$ ), as quais são materiais higroscópicos. Nanocristais de platina são também impregnados dentro do eletrólito, o qual é feito particularmente fino. Como algumas quantidades de hidrogênio e oxigênio difundem-se através do eletrólito, e, devido ao efeito catalítico da platina, a reação produz água. Por isso, o eletrólito usa uma quantidade de hidrogênio, para melhorar sua performance justificando a perda por combustível parasita. Porém, em grandes sistemas a umidificação extra dos gases de reação precisa ser ativamente controlada, conforme [10]. Fica evidenciada também em [10], que controlando a quantidade do ar para a reação controla-se indiretamente a umidade da membrana, pois o mesmo carrega consigo para fora da pilha a umidade produzida pela célula durante sua operação.

Duas patentes americanas [7,8] evidenciam a presença de chaves eletrônicas para causarem curto circuito controlado entre o cátodo e o ânodo da célula. Em condições anômalas, estas chaves são usadas para evitar danos à célula e para melhorar sua performance e, ainda, como auxílio na fase de pré-aquecimento em três condições. Na primeira condição, a chave é posicionada para conduzir a corrente da pilha se a célula em que a chave estiver em paralelo apresentar alguma falha severa (como uma tensão menor de 0,4V). Neste caso a chave assume a corrente total da pilha e o fluxo de combustível para esta célula é interrompido.

Na segunda condição de operação, o dispositivo é chaveado com uma certa frequência caso a performance da célula apresente-se fora de padrões pré-estabelecidos. Neste caso, o fornecimento de hidrogênio é mantido. Este chaveamento também acontece ciclicamente para melhorar o rendimento final quando, então, o calor produzido evapora possíveis gotículas d'água presentes nos poros dificultando a passagem dos gases. O chaveamento pode produzir ainda água que umedece a membrana e diminui a resistência a passagem dos íons. Pode haver, neste caso um ganho adicional de em torno de 5%. A abertura e o fechamento da chave devem corresponder a um ciclo de operação de 0,01 segundo a 4 minutos por célula e com razão cíclica menor que 20% do ciclo de operação.

A terceira condição de operação dessa chave eletrônica descrita em [7] é durante o warming-up (pré-aquecimento), onde a membrana para atingir a temperatura de 15°C é usada

uma resistência como fonte suplementar de calor. Após os 15°C é feito o chaveamento cíclico entre o cátodo e o ânodo das células até a pilha atingir a temperatura de operação de 30°C.

Para verificar possíveis anomalias ocorridas nas células é necessário monitorar a tensão individual de cada célula. Em [14] é feito um estudo de diferentes topologias para a medição individual de cada célula, onde se conclui que método mais indicado, ou seja, menor custo e menor erro, é o resistor-diodo. Esse se resume em um resistor em série com o multiplexador que faz a seleção do canal e um diodo que faz a proteção de entrada da medição. Naquele trabalho, está incluso o método patenteado por Becker-Irvin, descrito em [3] que demonstra vários métodos de seleção da célula e medidas da tensão. Um desses métodos consiste em um divisor resistivo com o canal selecionado por um multiplexador com 8 canais e duas saídas, que faz a seleção célula por célula.

Já em [12], optou-se por fazer a medição da tensão através do divisor resistivo, onde a célula é selecionada através de um multiplexador. Cada vez que um canal é selecionado inclui-se uma nova célula, que se deseja medir, ao bloco de medição. Para obter o valor da tensão desta célula, é subtraída da medida da tensão do bloco atual a medida do bloco anterior. Para esse método é necessário um AD de 12 bits devido a possibilidade de alto erro de medição, e mesmo assim tem-se um erro de 6,25%.

Todas as etapas de automação da pilha de células de combustível foram relacionadas neste capítulo, cujos conhecimentos foram adquiridos através de livros, artigos, manuais, catálogos e patentes, fornecendo as bases experimentais para o projeto, automação e instalação de sistemas de geração de energia com células de combustível. Os detalhes deste projeto e análise serão apresentados nos próximos capítulos.

## CAPÍTULO 3

**DETALHAMENTO MATEMÁTICO  
DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL**

---

Neste capítulo é feita uma revisão das equações que determinam teoricamente as grandezas mais comumente envolvidas nas células de combustível como: tensão gerada, perdas, consumo de gases, umidade, temperatura e produção de água. Estas equações fornecem embasamento para o conhecimento, simulação e automação da pilha.

**3.1 Tensão reversível<sup>[10]</sup>**

Conforme a operação básica de uma célula de combustível, para cada molécula de água formada é preciso uma de hidrogênio fazendo com que pelo circuito externo, passem dois elétrons. Ainda, para cada mol de hidrogênio circulam  $2N$  elétrons no circuito externo (onde  $N$  é o número de Avogadro). Então a carga que flui para cada mol de hidrogênio é:

$$q = - 2 \cdot N \cdot e = - 2 \cdot F \quad (3.1)$$

sendo:

$q$ : carga elétrica (C);

$F$ : é constante de Faraday (96485 C/mol);

$e$ : carga de um elétron;

Em uma célula de combustível ideal, sem perdas, o processo envolvido na geração é dito reversível, pois toda energia química dos reagentes é convertida em energia elétrica, de onde se pode determinar a tensão reversível de circuito aberto da célula.

Então, se  $E_r$  for a tensão reversível de circuito aberto, o trabalho elétrico realizado por mol será dado por:

$$W_{EL} = - 2 \cdot F \cdot E_r \quad (3.2)$$

A energia fornecida pela célula para o deslocamento das cargas pelo circuito externo é definida pela energia livre de Gibbs. Ela é definida como a energia disponível para realizar trabalho externo, desprezando-se qualquer trabalho feito por variações de pressão ou volume.

Se o sistema é reversível (sem perdas) o trabalho elétrico é igual a energia livre de Gibbs de formação,  $\Delta\bar{g}_f$ , que pode ser escrita:

$$\Delta\bar{g}_f = - 2 \cdot F \cdot E_r \quad (3.3)$$

Reescrevendo em função da tensão reversível:

$$E_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 fornece a tensão de circuito aberto, considerando o sistema sem perdas e operando a pressão padrão de 100 kPa. Na prática, ocorrem algumas perdas, ou seja, mesmo em circuito aberto a tensão será menor que o valor obtido pela Equação 3.4.

### 3.2 Eficiência <sup>[10]</sup>

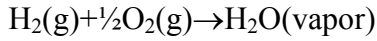
A eficiência da célula de combustível pode ser definida como a razão entre a energia elétrica produzida e a quantidade de calor produzida pelo combustível usado. Este calor produzido é definido como a mudança na entalpia de formação molar ( $\Delta\bar{h}_f$ ).

$$\eta_{FC} = \frac{W_{el}}{-\Delta\bar{h}_f} \quad (3.5)$$

A quantidade de energia elétrica  $W_{el}$  é a quantidade de energia elétrica produzida por um mol de combustível. Como o calor é liberado para o ambiente, a quantidade  $\Delta\bar{h}_f$  por

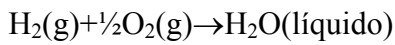
convenção assume valor negativo. Existem duas possibilidades para a mudança na entalpia molar ( $\Delta \bar{h}_f$ ), usando hidrogênio:

-LHV ("lower heating value"), poder calorífico inferior.



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

-HHV ("higher heating value"), poder calorífico superior.



$$\Delta \bar{h}_f = -285,84 \text{ kJ/mol}$$

A diferença entre as entalpias de formação molar (44,01 kJ/mol) é a entalpia molar de vaporização da água, conhecida como calor latente molar.

Como a máxima energia elétrica produzida pela célula de combustível é igual à mudança da energia livre de Gibbs, então, define-se a máxima eficiência, ou eficiência termodinâmica como:

$$\eta_{\text{FC Máx}} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{-\Delta \bar{h}_f} \quad (3.6)$$

Estado da água	Temperatura °C	$\Delta \bar{g}_f$ (kJ/mol)	Máxima $E_r$ (V)	$\eta_{\text{FC máx}}$ (%)
Líquida	25	-237,2	1,23	83
Líquida	80	-228,2	1,18	80
Gasosa	100	-225,3	1,17	79
Gasosa	200	-220,4	1,14	77
Gasosa	400	-210,3	1,09	74
Gasosa	600	-199,6	1,04	70
Gasosa	800	-188,6	0,98	66
Gasosa	1000	-177,4	0,92	62

Tabela 3.1 – Valores de  $\Delta \bar{g}_f$ ,  $E_r$  e  $\eta_{\text{FC máx}}$  (ref. a HHV).

A partir da Tabela 3.1 observa-se que a eficiência máxima cairia com o aumento da temperatura, porém na prática isso não acontece, devido às quedas de tensão em temperaturas elevadas serem menores. Isso faz com que a eficiência seja maior em temperaturas elevadas.

Se toda a energia do combustível for transformada em energia elétrica, ou seja, em sua entalpia de formação, isso resultariam em uma eficiência de 100%. Para adequação de uma expressão para a eficiência, pode-se definir a máxima tensão reversível, que é escrita como:

$$E_r = \frac{-\Delta \bar{h}_f}{2 \cdot F} \quad (3.7)$$

Podendo ter dois níveis de tensão:

1,48 V para HHV ("higher heating value");

1,25 V para LHV ("lower heating value");

Desta forma, pode-se definir a eficiência da célula de combustível como a razão entre a tensão de saída e a tensão reversível máxima considerando um sistema ideal, que é definido por:

$$\eta_{FC \text{ Máx}} = \frac{V_{FC}}{E_r} \quad (3.8)$$

Na prática, nem todo o combustível que entra na célula reage. Como apenas uma pequena parcela dele passa através da membrana sem reagir, onde se pode definir um coeficiente de utilização do combustível, que é a relação entre a massa de hidrogênio que entra realmente na reação e a massa total que entra na célula:

$$\mu_f = \frac{(m_{H_2})_{\text{reage}}}{(m_{H_2})_{\text{entra}}} \quad (3.9)$$

Redefine-se a eficiência para levar em conta o coeficiente de utilização como sendo:

$$\eta_{FC} = \mu_f \cdot \frac{V_{FC}}{E_r} \quad (3.10)$$

Normalmente, o coeficiente de utilização encontra-se na faixa de 0,95, para células de combustível sem recirculação de hidrogênio.

### 3.3 Tensão gerada e quedas de tensão

#### 3.3.1 Tensão de Nernst<sup>[10]</sup>

A mudança da energia livre de Gibbs, em uma reação química, varia com a temperatura, a pressão e a concentração dos reagentes. Conseqüentemente, a tensão de circuito aberto da célula de combustível varia de acordo com estes fatores.

Para a reação química que ocorre na PEMFC, a mudança na energia livre de Gibbs é definida por:

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - R \cdot T \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (3.11)$$

sendo:

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

T: é a temperatura da célula (K);

a: é a atividade dos reagentes e produto.

Substituindo a Equação 3.4 na Equação 3.11, tem-se a tensão de circuito aberto ou equação de Nernst:

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta \bar{g}_f^0}{2 \cdot F} - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (3.12)$$

Assumindo-se que os reagentes são gases ideais, que a água apresenta-se no estado líquido e que a temperatura é diferente da temperatura de referência (298,15 K), é possível reescrever a Equação 3.12 como:

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{-\Delta \bar{g}_f^0}{2 \cdot F} + \frac{\Delta \bar{s}_f \cdot (T - T_{\text{ref}})}{2 \cdot F} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln(P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}) \quad (3.13)$$

sendo:

P: é pressão parcial (atm) dos gases correspondentes.

$\Delta \bar{s}_f$ : é a mudança na entropia de formação molar ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Substituindo os valores padrões tem-se:

$$E_{\text{Nernst}} = 1,299 - 8,5 \times 10^{-4} \times (T - 298,15) + 4,308 \cdot 10^{-5} \times T \times \left[ \ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (3.14)$$

### 3.3.2 Potencial de ativação

As perdas devidas ao potencial de ativação são causadas pela redução na velocidade das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos. Uma parcela de tensão é perdida nas reações químicas que transferem elétrons de/ou para o eletrodo. Essa queda foi definida por Mann<sup>[11]</sup> como:

$$V_{\text{act}} = - \left| \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(c_{\text{O}_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i_{\text{FC}}) \right| \quad (3.15)$$

sendo:

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

$c_{\text{O}_2}$ : é a concentração de oxigênio no cátodo ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ );

$\xi_{1,2,3,4}$ : são coeficientes paramétricos que possuem valores diferentes para cada modelo de célula.



### 3.3.3 Perdas por correntes internas e passagem direta de combustível<sup>[10]</sup>

As perdas por correntes internas e passagem direta de combustível estão relacionadas com a passagem de combustível através do eletrólito sem reagir e, em menor expressão, com a condução de elétrons através do eletrólito. Estes efeitos causam uma redução de tensão mesmo em circuito aberto. O valor desta corrente é estimado de 2 a 3 mA/cm<sup>2</sup> que deve ser acrescentado a corrente da célula para determinar a tensão de saída.

### 3.3.4 Potencial ôhmico

As perdas devidas ao potencial ôhmico estão relacionadas à resistência ao fluxo de íons no eletrólito e aos elétrons no eletrodo. Mann<sup>[11]</sup> definiu-as por:

$$V_{\text{ohmico}} = i_{\text{FC}} \cdot (R_{\text{M}} + R_{\text{C}}) \quad (3.16)$$

sendo:

$R_{\text{M}}$  e  $R_{\text{C}}$ : resistência da membrana e resistência dos contatos, respectivamente.

A resistência dos contatos é praticamente constante entre 50°C e 90°C, mas a resistência da membrana à passagem de íons é dada por:

$$R_{\text{M}} = \frac{\rho_{\text{M}} \cdot \ell}{A} \quad (3.17)$$

sendo:

$\rho_{\text{M}}$ : é a resistividade da membrana ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

A: área ativa da célula ( $\text{cm}^2$ );

$\ell$ : espessura da membrana (cm).

Segundo [11], uma célula de combustível com membrana Nafion® possui a resistividade dada por:

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left[ 1 + 0,03 \cdot \left( \frac{i_{FC}}{A} \right) + 0,063 \cdot \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{i_{FC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[ \Psi - 0,634 - 3 \cdot \left( \frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4,18 \cdot \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (3.18)$$

sendo:

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

O termo exponencial é um fator de correção da temperatura se estiver operando com temperatura diferente de 30°C e T é dado em Kelvin.

\(\psi\): é um parâmetro influenciado pelo procedimento da preparação da membrana, e é em função da umidade relativa e razão estequiométrica do gás no anodo. Ele assume um valor de 14 em condições de 100% de umidade e de 22 a 23 em condições supersaturadas.

### 3.3.5 Potencial de concentração<sup>[10]</sup>

Quando a célula está em operação há uma circulação de oxigênio e hidrogênio. Essa circulação faz com que haja uma mudança de concentração de gases na região do eletrodo e, conseqüentemente, das pressões parciais destes gases. Este fenômeno depende da corrente exigida e das características físicas do sistema. Esta perda pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_{\text{con}} = -B \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{\text{Máx}}} \right) \quad (3.19)$$

sendo:

J: densidade de corrente em que se quer calcular (\(\text{A}/\text{cm}^2\));

\(J\_{\text{Máx}}\): densidade máxima de corrente, que o combustível pode suprir (\(\text{A}/\text{cm}^2\));

B: constante que depende dos reagentes e seu estado de operação (\(\frac{R \cdot T}{2 \cdot F}\)).

### 3.4 Consumo de gases e produção d'água

#### 3.4.1 Consumo de oxigênio<sup>[10]</sup>

O consumo de oxigênio em uma célula de combustível, em kg/s, é dado em função da potência e da tensão de saída:

$$\dot{m}_{O_2} = 8,29 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_S}{V_{FC}} \quad (3.20)$$

Como, o oxigênio fornecido para a célula será proveniente do ar atmosférico, então se deve fazer algumas alterações na equação. A massa molar do ar é  $28,97 \cdot 10^{-3}$  kg/mol, e possui em torno de 21% da massa molar de oxigênio. Então, o fluxo de massa de ar a ser fornecido para a célula em kg/s será:

$$\dot{m}_{ar} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{P_S}{V_{FC}} \quad (3.21)$$

A Equação 3.21 fornece a quantia exata de ar consumido pela célula. O ar sai da célula sem nenhuma quantidade de oxigênio. Porém, na prática, costuma-se fornecer ar com vazão em torno de duas vezes maior que o valor consumido. Então, adiciona-se um termo chamado razão estequiométrica ( $\lambda$ ), o qual estabelece essa relação:

$$\dot{m}_{ar} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_S}{V_{FC}} \quad (3.22)$$

#### 3.4.2 Consumo de hidrogênio<sup>[10]</sup>

O consumo de hidrogênio em kg/s pela célula é dado por:

$$\dot{m}_{H_2} = 1,05 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_S}{V_{FC}} \quad (3.23)$$

Esta quantidade vale para o fornecimento de hidrogênio puro, porém para o fornecimento através de reformador deve-se levar em conta a quantidade de monóxido de carbono presente no combustível após a reforma.

### 3.4.3 Água gerada pela reação<sup>[10]</sup>

A quantidade de água produzida (kg/s) em uma célula em que o hidrogênio é fornecido puro, sem o processo de reforma, é dada por:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 9,34 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_s}{V_{\text{FC}}} \quad (3.24)$$

Entretanto, se houver uma mistura de monóxido de carbono no hidrogênio, a produção de água é menor em proporção do que a quantidade de monóxido presente nesta mistura.

## 3.5 Umidade relativa

A umidade relativa é uma relação entre a quantidade de água no estado vapor no ar e a quantidade máxima de vapor que o ambiente suporta naquela temperatura e pressão sem condensar. Por exemplo, uma umidade de 100%, significa que o ar não possui um efeito secante, ou seja, a quantidade de vapor que o ar absorve será condensada no mesmo valor. Ela pode ser rearranjada e definida pela pressão parcial de água ( $P_w$ ) e pressão de vapor saturado ( $P_{\text{sat}}$ ):

$$\text{UR} = \frac{P_w}{P_{\text{sat}}} \quad (3.25)$$

A pressão de vapor saturado para uma temperatura é dada pela Tabela 3.2<sup>[10]</sup>.

T (°C)	P <sub>sat</sub> (kPa)
15	1,705
20	2,338
30	4,246
40	7,383
50	12,350
60	19,940
70	31,190
80	47,390
90	70,130

Tabela 3.2 – Valores da pressão de saturação do vapor para uma dada temperatura.

Conforme [5] a umidade relativa do ar de saída é dada pela umidade de entrada mais a produzida pela reação dos gases. Tal cálculo pode ser feito pelas pressões parciais, através de:

$$UR_{out} = \frac{P_{W_{in}} + P_{W_{out}}}{P_{sat_{out}}} \quad (3.26)$$

sendo:

$P_{W_{in}}$  : pressão parcial da água do ar de entrada;

$P_{W_{out}}$  : pressão parcial da água do ar de saída;

$P_{sat_{out}}$  : pressão de vapor saturado do ar de saída, e é obtido da Tabela 3.2.

Em [10] definiu-se a pressão parcial de água ( $P_{W_{out}}$ ) dependendo da pressão de operação da célula ( $P_t$ ) e da razão estequiométrica ( $\lambda$ ) como sendo:

$$P_{W_{out}} = \frac{0,421}{\lambda + 0,188} \cdot P_t \quad (3.27)$$

A pressão parcial da água no ar de entrada ( $P_{W_{in}}$ ) pode ser obtida pela definição da umidade relativa:

$$P_{W_{in}} = UR_{in} \cdot P_{sat} \quad (3.28)$$

Com isto, pode-se determinar a umidade relativa do ar de saída para determinadas temperaturas e razões estequiométricas, como mostrado na Tabela 3.3.

T(°C)	$\lambda=1,5$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=6$	$\lambda=12$	$\lambda=24$
20					218	145
30				199	120	79
40		282	201	114	69	46
50	215	169	120	68	41	27
60	133	104	74	42		
70	85	67	48			
80	56	44	31			
90	38	30				

Tabela 3.3 – Valores da umidade relativa do ar de saída para uma dada razão estequiométrica e temperatura a uma pressão de 1 bar, com ar de entrada a 20°C e 70% de umidade relativa.

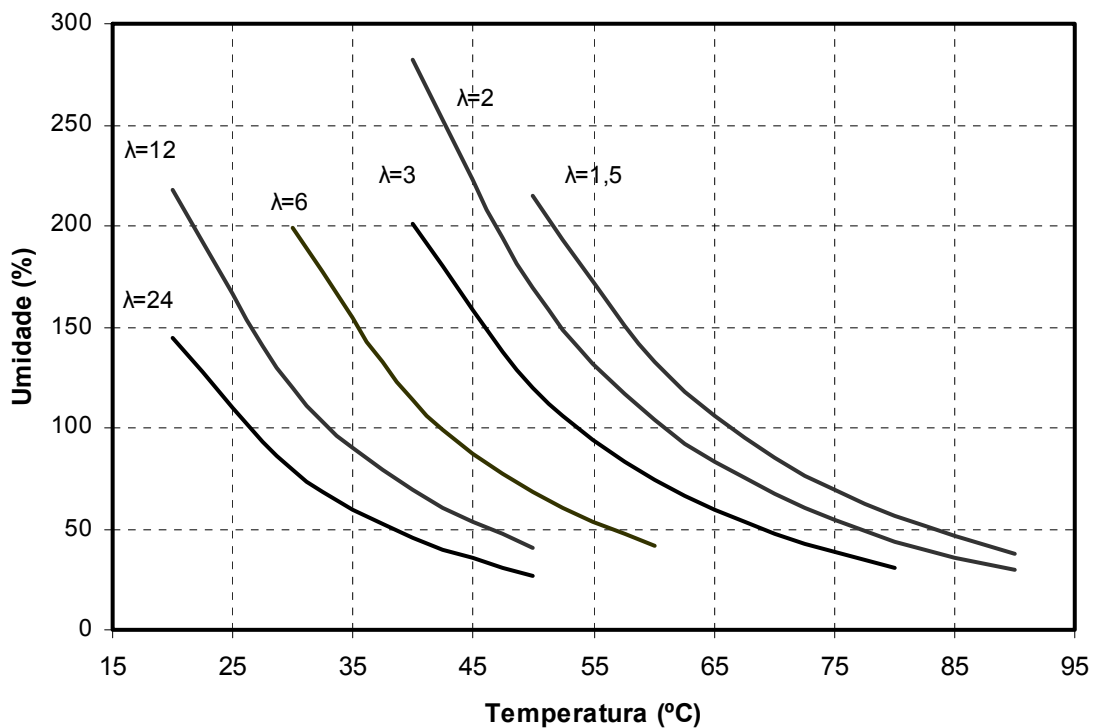


Figura 3.1 – Gráfico Umidade Relativa versus Temperatura, para algumas razões estequiométricas, pressão de 1 bar, com ar de entrada a 20°C e 70% de umidade relativa.

Percebe-se que a umidade da membrana pode ser controlada pela quantidade de ar que é injetada na célula; porém este controle não será mais possível quando for ultrapassada temperatura em torno de  $60^{\circ}\text{C}$ , como pode ser verificado pela Figura 3.1. Acima desta temperatura, a razão estequiométrica terá um valor menor que dois para manter uma boa hidratação da célula, porém este valor não pode ser atingido, pois o fornecimento de oxigênio pode ser prejudicado em algumas das células da pilha.

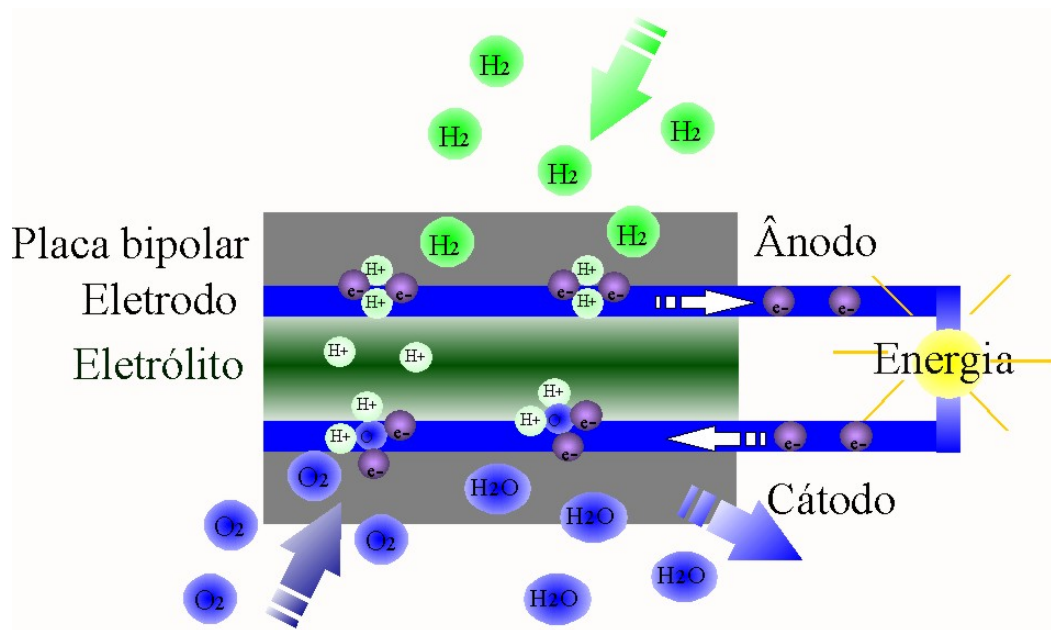
### **3.6 Considerações finais**

Este capítulo apresentou as equações que descrevem as principais grandezas envolvidas na operação de uma célula de combustível, as quais servirão de base para o controle ou para o melhor entendimento da operação. As equações que representam a tensão gerada e as quedas de potenciais de uma célula são utilizadas, nesta dissertação, para a simulação do comportamento eletroquímico da célula com a variação de carga. Essas simulações serão usadas com os parâmetros da célula usada nos testes e mostradas no próximo capítulo. Já as equações que calculam a quantidade de ar necessária para reação, produção d'água e umidade relativa serão usadas para o controle da umidade relativa na automação interna da pilha e descritas nos próximos capítulos.

## CAPÍTULO 4

## COMPORTAMENTO DINÂMICO E SIMULAÇÃO DO MODELO ELETROQUÍMICO

Células de combustível são compostas basicamente por um ânodo e um cátodo poroso, ver Figura 4.1, cada um revestido num dos lados por uma camada catalisadora de platina, e separados por um eletrólito que impede a passagem dos elétrons e facilitando a passagem dos íons positivos. O ânodo é alimentado pelo combustível, enquanto que o cátodo é alimentado por um oxidante, normalmente o ar atmosférico.



Figuras 4.1 - Princípio de funcionamento de uma célula de combustível.

Os elétrons liberados pela separação das moléculas de hidrogênio pela ação do catalisador no ânodo são conduzidos através de um circuito elétrico até o cátodo, originando uma corrente elétrica contínua. Os íons (neste caso,  $H^+$ ) são transferidos para o cátodo através do eletrólito, onde se associam às moléculas de oxigênio formando moléculas de água. Dessa forma, as grandezas elétricas oriundas desse tipo de geração possuem características especiais devido a sua construção, os quais serão analisados e simulados neste capítulo. No capítulo



anterior foram mostradas matematicamente as perdas decorrentes do comportamento da PEMFC em função de seus parâmetros construtivos e de operação. Essas perdas possuem pontos de operação onde são mais sensíveis aos seus parâmetros. O gráfico da Figura 4.2 apresenta as características da tensão em função da corrente fornecida por uma célula, onde está evidenciada a região em que as perdas possuem maior peso, detalhada na seção 4.1.

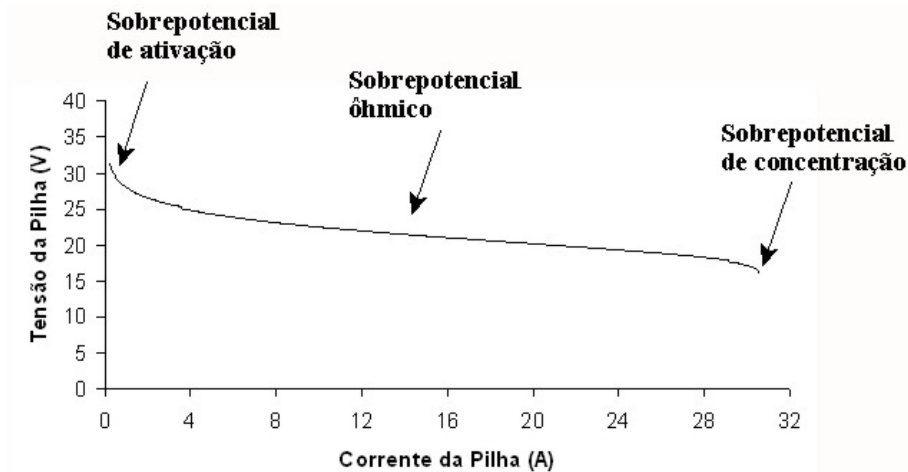


Figura 4.2 – Característica tensão versus corrente de uma célula de combustível.

Agregado a esse comportamento da tensão versus corrente existe ainda uma resposta dinâmica, ou seja, a tensão varia com a variação da carga. Esta dinâmica surge devido ao fenômeno chamado “camada dupla de carga” (*charge double layer*). Sempre que dois materiais diferentes eletricamente carregados estão em contato, há um acúmulo de carga nas superfícies ou uma transferência de carga de um para o outro<sup>[10]</sup>. Este fenômeno também está associado à interface eletrodo-eletrólito das células de combustível que pode armazenar e liberar cargas elétricas, ou seja, essas placas comportam-se como um capacitor.

A dinâmica envolvida afeta diretamente o sobrepotencial de ativação e de concentração. Já o sobrepotencial por queda ôhmica não é afetado, pois esta perda diz respeito à resistência ôhmica dos eletrodos e membrana.

O circuito equivalente apresentado por [10], representada na Figura 4.3, define o comportamento da célula. Como se observa, a resposta dinâmica é de primeira ordem com a capacitância na ordem de Farads. Os valores das resistências que representam os sobrepotenciais ôhmico, de concentração e de ativação são não-lineares, portando as resistências se alteram devido a vários parâmetros vistos nas equações do Capítulo 3.

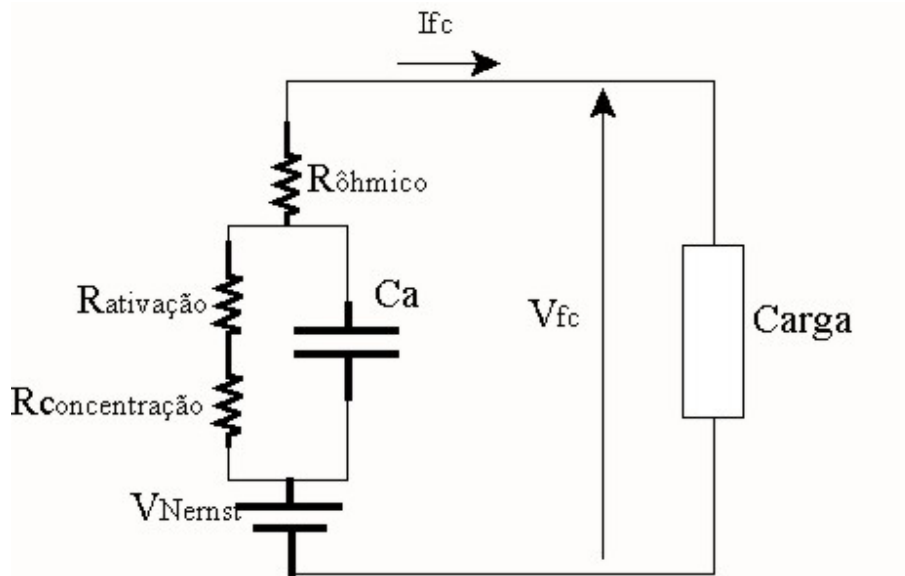


Figura 4.3 – Circuito equivalente de uma célula de combustível.

#### 4.1 Simulação do modelo eletroquímico

Para se ter uma idéia do comportamento da pilha a ser automatizada foram realizadas simulações onde se levou em conta as equações das perdas agregadas ao modelo dinâmico e repassadas ao programa MathLab<sup>®</sup>. As resistências obtidas representando as perdas são não-lineares, ou seja, não são constantes, daí a dificuldade de se implementar em outro tipo de programa com poucos recursos. Para a simulação do modelo, foram utilizados os parâmetros da célula de 500W do tipo PEM da BCS Technology utilizando a membrana Nafion 117, listados no quadro da Tabela 4.1.

Na primeira simulação variou-se a corrente e observou-se o valor da tensão, o gráfico gerado está representado na Figura 4.4, no qual ficam evidenciadas as regiões de quedas de tensão predominantes. Para a faixa em torno de 0 e 4 A predomina a queda de tensão de ativação, já na região linear de operação em torno de 4 a 30 A as quedas ôhmicas, e finalmente, acima de 30 A estão as quedas de tensão de concentração.

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
T	333,15 K	$\xi_1$	-0,948
A	64 cm <sup>2</sup>	$\xi_2$	$0,00286+0,0002.\ln A$ $+(4,3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
$\ell$	178 $\mu$ m	$\xi_3$	$7,6.10^{-5}$
P <sub>O<sub>2</sub></sub>	0,2095 atm	$\xi_4$	$-1,93.10^{-4}$
P <sub>H<sub>2</sub></sub>	1 atm	$\psi$	23,0
R <sub>C</sub>	0,0003 $\Omega$	J	3 mA/cm <sup>2</sup>
B	0,016 V	J <sub>max</sub>	469 mA/cm <sup>2</sup>
n	32	Ca	3 F

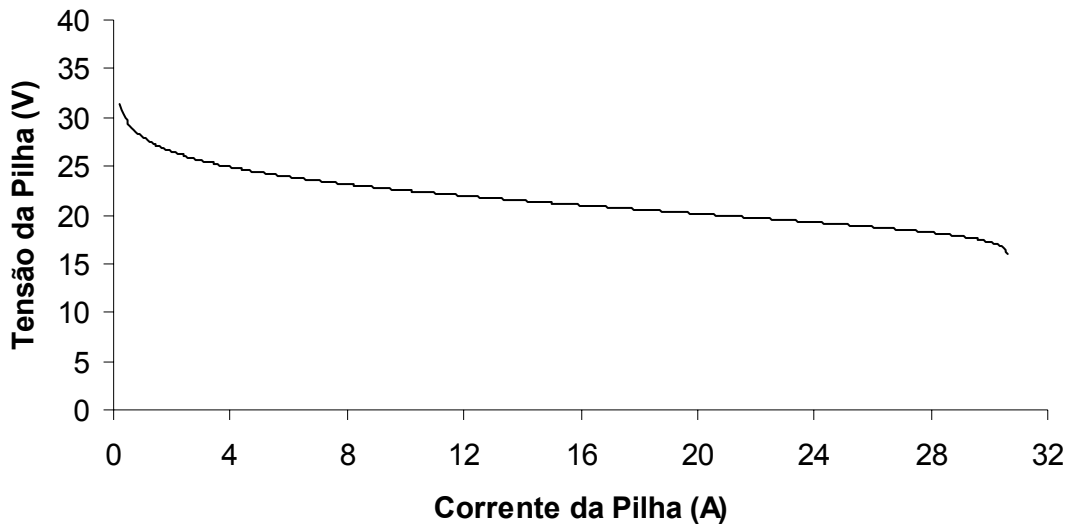
Tabela 4.1 - Parâmetros de uma célula do tipo PEM de 500 W da BCS. <sup>[4]</sup>

Figura 4.4 – Característica tensão versus corrente para pilha de 500W da BCS Technology.

Em uma segunda simulação e análise foi inserida uma carga para avaliar a resposta dinâmica da pilha para uma variação de carga. No primeiro momento a pilha opera em vazio, possuindo apenas a corrente de circulação interna; após 200 segundos aproximadamente de simulação é inserida a carga com corrente de 15 A mantida por 325 segundos, conforme mostrado na Figura 4.5. Essa inserção da carga gerou uma resposta de tensão demonstrada na Figura 4.6. A tensão partiu de 39 V e, antes mesmo de colocar a carga, ou seja, para uma corrente externa nula sua tensão foi reduzida para 30 V, queda é devida a corrente interna. Com a inserção da carga, houve uma rápida queda de tensão atingindo um novo ponto de equilíbrio em 21 V. Com a retirada da carga, ou seja, uma variação de 15 A para uma corrente

praticamente nula, a tensão apresenta um comportamento de primeira ordem até atingir novamente o primeiro ponto de equilíbrio, porém sua recuperação foi mais lenta que a queda com a inserção da carga, em outras palavras, as constantes de tempo foram diferentes.

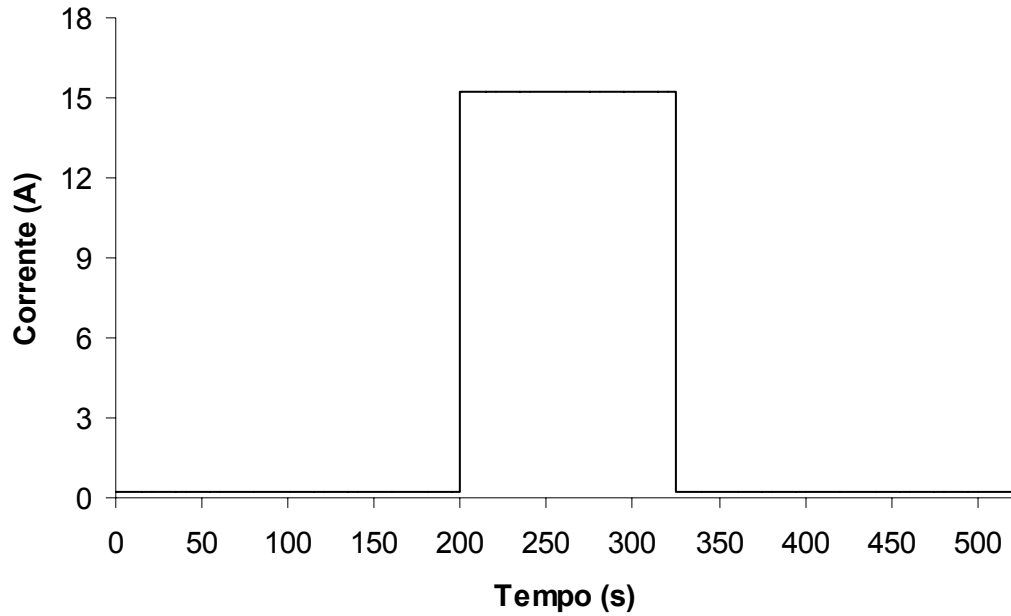


Figura 4.5 – Degrau de corrente para simulação dinâmica.

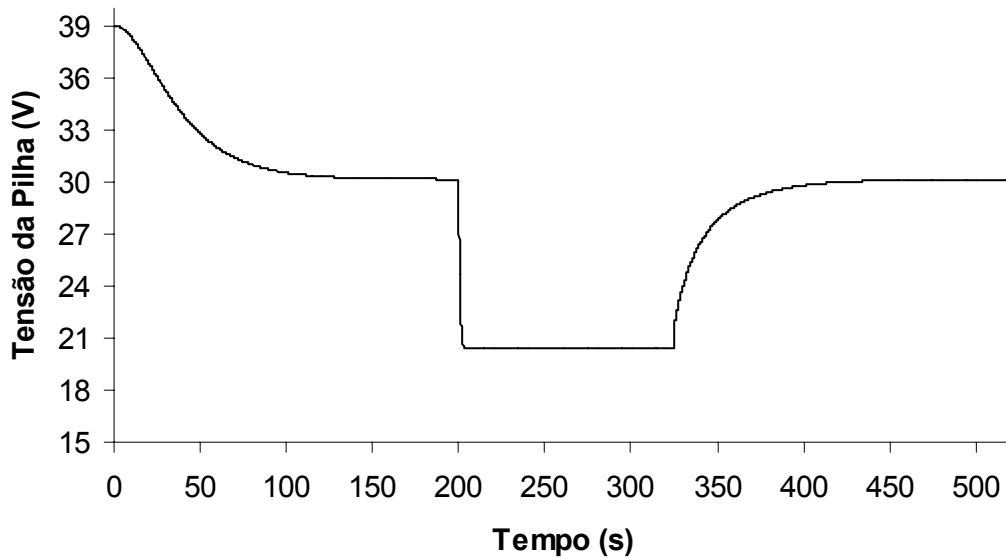


Figura 4.6 – Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente.

Com as curvas da corrente e tensão gerada anteriormente gerou-se duas novas curvas, a curva da Figura 4.7 que representa o rendimento para esta carga, cuja forma é semelhante a curva da tensão, e a curva da Figura 4.8 que representa a potência para a pilha quando é inserida uma carga abruptamente.

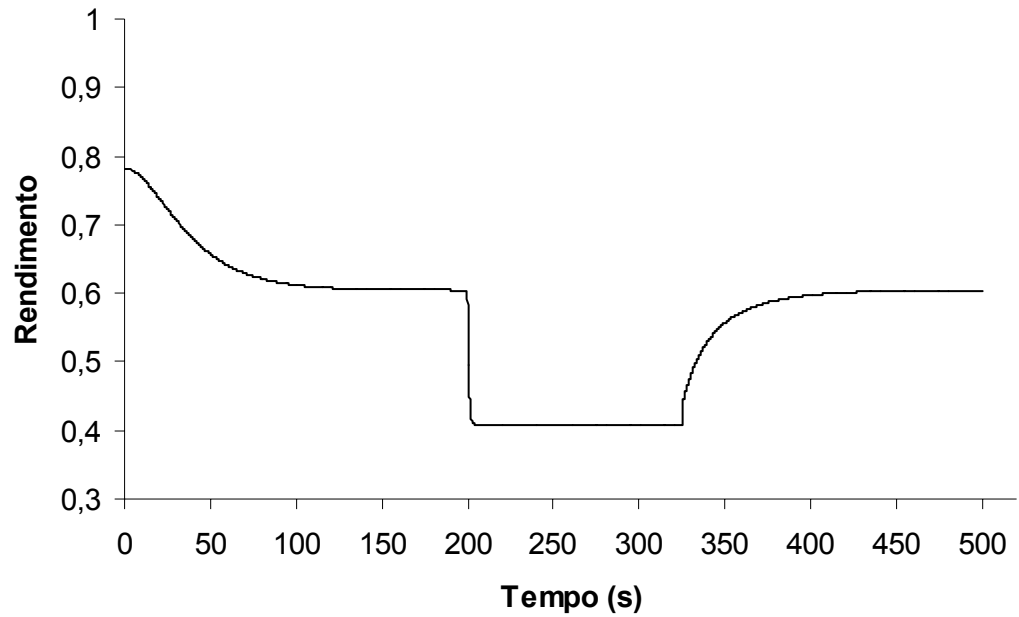


Figura 4.7 – Rendimento da pilha para um degrau de corrente.

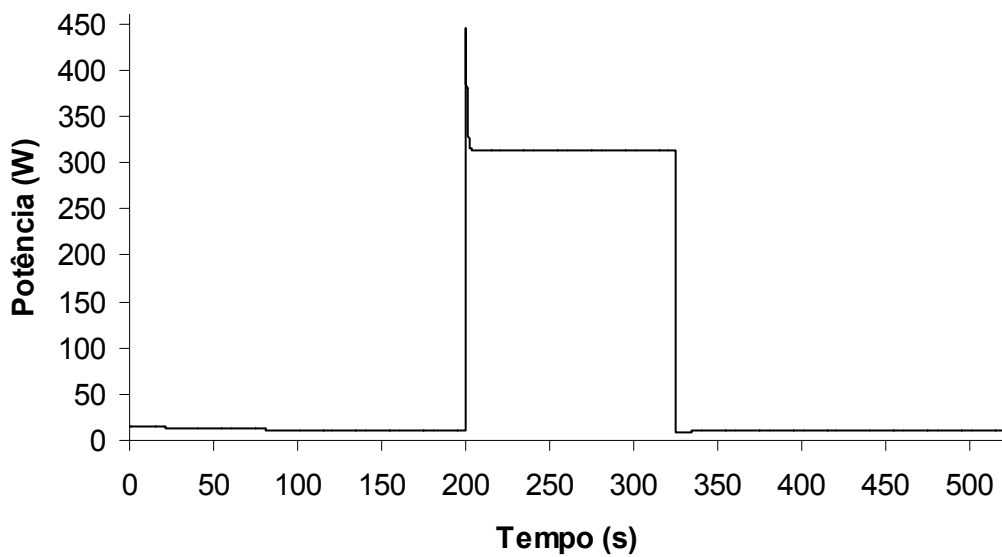


Figura 4.8 – Potência gerada pela pilha para um degrau de corrente.

## **4.2 Considerações finais**

Com base nas equações descritas no capítulo anterior foi simulado o comportamento eletroquímico da pilha que será usada no protótipo. Os resultados confirmam os relatos existentes na bibliografia. Este capítulo fornece de antemão o comportamento elétrico da pilha, onde os resultados servirão de comparativo para os resultados obtido na prática quando a pilha entrar em operação.

## CAPÍTULO 5

## CONSIDERAÇÕES SOBRE AS GRANDEZAS CONTROLADAS

---

Para que a pilha opere sem danos e com bom rendimento, assim como nos motores de combustão interna, existem alguns fatores fundamentais que devem ser controlados, entre eles: temperatura e umidade da membrana, pressão do gás combustível e quantidade de ar para a reação. Além destas grandezas, outras de ordem elétrica também precisam ser monitoradas: tensão, corrente, potência e rendimento. A seguir discutem-se estas grandezas controladas as quais serão empregados em uma pilha de célula de combustível do tipo PEM de 500 W da BCS Technology visando satisfazer alguns critérios de automação além do monitoramento das tensões individuais das células para prever possíveis falhas. Todas as ações sugeridas neste capítulo terão por base esta pilha de células de combustível.

### 5.1 Temperatura da membrana

A temperatura da célula de combustível influencia diretamente a tensão de saída bem como a sua vida útil. Quando a célula inicia sua operação, a temperatura da membrana certamente estará abaixo do seu valor ótimo de operação e uma maior queda de tensão. Essa situação pode ser contornada fazendo-se um pré-aquecimento na pilha.

Até a pilha atingir a temperatura de 15° C é usado um resistor alimentado por fonte auxiliar para aquecer a entrada do ar de reação e, conseqüentemente, aquecendo a membrana. Quando a temperatura interna da célula atingir 15° C a resistência é desligada e acionado o sistema de chaveamento, que faz o curto-circuito entre o cátodo e o ânodo da célula, com isso gerando calor e aquecendo-a. Esta técnica é aplicada até a pilha atingir a temperatura de 30°C.

Após esse pré-aquecimento o monitoramento e controle da temperatura são realizados permanentemente, pois além de manter a célula a uma temperatura que implica em maior rendimento, é preciso que a temperatura da membrana fique abaixo da máxima especificada pelo fabricante (em torno de 65°C), pois acima desta temperatura a membrana pode sofrer danos irreparáveis. Para isso, utilizam-se três meios de troca de calor com o ambiente.

O primeiro meio de troca é por convecção, ou seja, troca natural de calor com o ambiente. Essa troca é usada quando a célula fornece pequena potência, ou seja, uma temperatura abaixo de 50°C.

O segundo meio de retirar calor é através da ventilação forçada por ventiladores dispostos na lateral da pilha. Esses ventiladores possuem velocidades controladas, que mantêm a temperatura dentro de uma faixa de operação. Este meio de refrigeração ocorre quando a pilha atingir uma potência entre 150 a 200W, ou uma temperatura entre 50 a 60°C.

O terceiro meio consiste no bombeamento de água pelas canaletas internas da célula. A refrigeração à água é feita juntamente com a ventilação forçada. Esta técnica é aplicada quando a pilha atingir potências acima de 200W ou uma temperatura acima de 60°C.

O controle da temperatura é fundamental tanto para que a pilha atinja o mais breve possível a temperatura de operação como para não deixar ultrapassar a máxima suportada.

## **5.2 Umidade da membrana**

Para uma boa condução de íons através da membrana, ou seja, uma resistência ôhmica pequena, esta deve estar bem hidratada. Porém, excessos podem também ser prejudiciais, pois gotículas d'água podem impedir a passagem do gás através dos poros. Então a umidade relativa da membrana tem que se manter em uma faixa entre 85% e 100%.

Um problema que ocorre na célula de combustível é a perda de umidade da membrana pela passagem dos íons. Quando estes passarem através da membrana arrastam consigo moléculas de água (carregamento eletro-osmótico), fazendo com que a umidade da membrana diminua. Outro problema encontrado é que a umidade no eletrólito não é distribuída uniformemente.

Em temperaturas acima de 60°C ocorre a desidratação da membrana, que a faz secar mais rápido que a produção de água pela reação dos gases.

Estes problemas podem ser resolvidos umidificando adequadamente seus reagentes, pelas diversas maneiras existentes, porém este processo eleva o custo da planta devido aos equipamentos auxiliares e também apresenta dificuldades no controle do mesmo.

A célula usada como protótipo é do tipo auto-umidificada, porém para evitar um processo mais complexo e equipamentos auxiliares ocasionando um elevado custo, optou-se por fazer o controle da quantidade de ar injetada na pilha e, conseqüentemente, da umidade interna, conforme descrito no Capítulo 3. O controle atua diretamente na velocidade da bomba



de injeção do ar de reação realimentado com a medida da umidade. Ou seja, se a umidade relativa estiver acima de 95% a velocidade da bomba do ar é acrescida e, ao contrário, decrescida se a umidade se aproximar de 85%. Com essa técnica simples consegue-se ter um controle interno e indireto do ar na membrana.

Porém, existe uma quantidade mínima de ar para que a reação ocorra. Essa quantia deve ser no mínimo duas vezes maior que a de hidrogênio, onde esse múltiplo é denominado de razão estequiométrica. Através da Equação 3.22 é conhecida a quantidade de ar em kg/s que deve ser injetada na célula em função da potência, da tensão média das células e da estequiometria. Reescrevendo a equação para nos fornecer a informação em L/min, e sabendo que a densidade do ar é em torno de 0,0012 kg/L, tem-se a Equação 5.1.

$$Q(\text{L/min}) = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_s}{V_{FC}} \cdot \frac{60}{0,0012} \quad (5.1)$$

simplificando tem-se:

$$Q(\text{L/min}) = 0,01785 \cdot \lambda \cdot \frac{P_s}{V_{FC}} \quad (5.2)$$

Reescrevendo a Equação 5.2 e substituindo a potência da pilha pelo produto da corrente pela tensão total da pilha, tem-se:

$$Q(\text{L/min}) = 0,01785 \cdot \lambda \cdot \frac{n \cdot V_{FC} \cdot I_s}{V_{FC}} \quad (5.3)$$

Logo:

$$Q(\text{L/min}) = 0,01785 \cdot n \cdot \lambda \cdot I_s \quad (5.4)$$

A equação que descreve a vazão em função da tensão de alimentação para a bomba de ar utilizada neste trabalho é definida pela Equação 5.5. Esta equação foi obtida através do levantamento prático de dados.

$$Q(\text{L/min}) = 2,5 \cdot V_{\text{control}} \quad (5.5)$$

Substituindo a Equação 5.5 em 5.4 e considerando que o número de células na pilha é de 32, o resultado é a razão estequiométrica. Através da Equação 5.6, é possível saber se a quantidade de ar injetado na pilha pela bomba ensaiada é suficiente para a reação.

$$\lambda = \frac{2,5 \cdot V_{\text{control}}}{0,05712 \cdot I_s} \quad (5.6)$$

O controle da umidade relativa é obtido variando-se a tensão de alimentação da bomba de ar. Porém, para que não haja falta de oxigênio para a reação na pilha, a Equação 5.6 deve ser maior ou igual a dois. Este fato faz com que o controle da umidade tenha um limitante, ou seja, há um valor mínimo de tensão de controle determinado pela corrente instantânea da pilha. Portanto, na automação da pilha a Equação 5.6 deve ser considerada, para que mesmo no pior caso tenha oxigênio suficiente para a reação.

### 5.3 Fluxo de hidrogênio

O hidrogênio possui um fluxo proporcional à potência gerada pela célula, ou seja, consome-se gás à medida que a corrente é exigida. Assim, não é obrigatório o uso de um controlador ativo de fluxo, apenas um regulador de pressão para mantê-la constante. Isso fica claro fazendo-se a seguinte análise: considerando que a membrana deixa passar através dela apenas íons  $H^+$ , impedindo a passagem do gás hidrogênio, pode-se afirmar, então que, se a célula estiver em circuito aberto, não há caminho para os elétrons reagirem com o  $O_2$  no outro lado da célula. Então, não há fluxo de elétrons e nem de íons e, portanto, também não há fluxo de gás hidrogênio.

Agora, se houver uma carga, e onde se permita a passagem de elétrons, o fluxo de hidrogênio será proporcional a esta corrente, pois a passagem de elétrons e íons para o outro lado da membrana fará com que dê lugar a mais gás hidrogênio para dentro da célula, e assim haverá um fluxo de gás. Portanto, fica evidenciada uma relação entre o fluxo de hidrogênio com a potência da carga instalada na célula de combustível.

## 5.4 Desempenho da célula

Alterações na tensão da célula em certas faixas podem indicar um mau funcionamento. Para identificar a célula problemática monitora-se a tensão de cada célula da pilha. Um problema que influencia nessa queda de tensão acontece quando há desidratação da célula, fazendo com que a resistência da membrana aumente e, com isso a tensão seja reduzida e o calor gerado aumente. Este processo entra em um laço de realimentação positiva fazendo com que a desidratação seja acelerada. Dependendo da situação pode ocorrer a inversão de polaridade da tensão, o que resulta em danos irreparáveis a membrana. Quando esse processo é identificado na medição de tensão, em torno de 0,3 V ou menos, a pilha será desligada para que a mesma não seja danificada.

Para evitar que a célula seja desligada observa-se a tensão (0,5 V) ou algum outro parâmetro de análise, e inicia-se um processo para reverter a situação. Então, realiza-se um curto circuito entre o cátodo e o ânodo através de uma chave eletrônica operando em uma frequência pré-estabelecida e mantendo o fornecimento normal do gás combustível. Esse chaveamento normalmente gera mais água na membrana ocasionando assim um aumento na hidratação da célula e restabelecendo a tensão na célula.

Se o chaveamento acontecer periodicamente, a pilha terá um ganho em torno de 5% no rendimento final<sup>[8]</sup>. Este curto-circuito entre o cátodo e o ânodo deve ter um ciclo de operação algo entre 0,01 segundo e 4 minutos por célula e a uma razão cíclica menor que 20% do ciclo de operação, conforme a Figura 5.1. Este ganho de potência será em função do chaveamento, gerando calor e água, fazendo com que se elimine possíveis gotículas presentes nos poros da célula que dificultariam a passagem de gases ou aumentando a hidratação da membrana se ocorrer um início de desidratação.

O chaveamento entre o cátodo e o ânodo tanto serve para aquecer a célula, como para restabelecer a tensão ou até mesmo dar um incremento de potência. Porém, está técnica deve ser empregada com cuidado, pois pode causar danos a pilha.

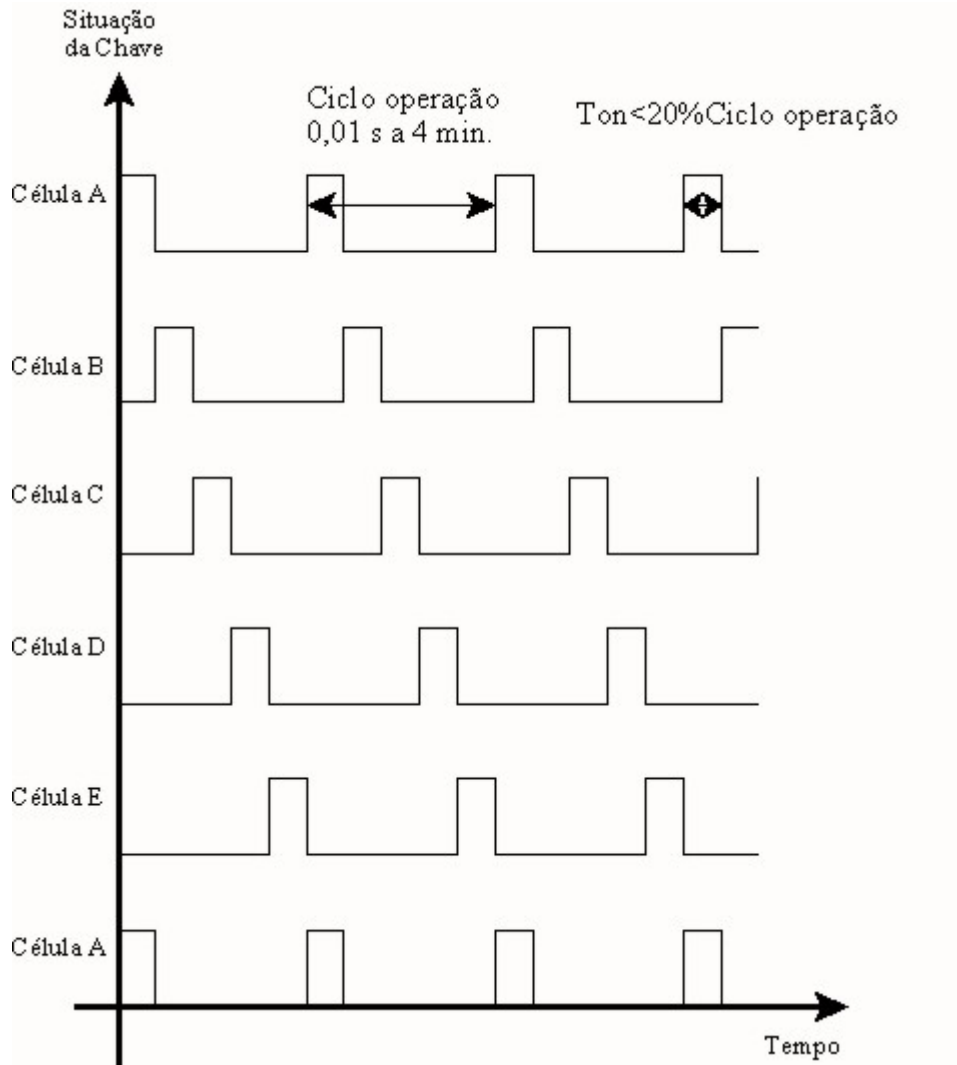


Figura 5.1 – Esquema do chaveamento entre o cátodo e o ânodo da célula de combustível para fins de recuperação da operação normal da célula e aumento do rendimento.

## 5.5 Considerações finais

As principais grandezas controladas foram introduzidas e comentadas neste capítulo, para que a célula opere com segurança e performance aceitáveis.

A temperatura é uma dessas grandezas, onde baixos valores comprometem a performance da pilha enquanto que para altos valores pode danificá-la. Assim a temperatura é mantida dentro de uma faixa operação, conseguido com o pré-aquecimento no início e eliminando calor durante seu funcionamento.

A umidade da pilha também altera significativamente a performance da pilha podendo até danificá-la. O controle pode ser feito controlando a quantidade de ar para a reação. Porém, existe uma quantidade mínima de ar para a mistura desenvolver a potência

desejada. Para isso, é necessário conhecer-se a relação estequiométrica que é feito com a obtenção da corrente instantânea e a relação tensão/vazão da bomba usada.

O melhoramento da performance da pilha também pode ser obtido através de curto-circuitos controlados (chaveamento) entre o cátodo e ânodo, que também são utilizados para restabelecer a tensão em caso de quedas por falta de umidade. Porém, o chaveamento deve obedecer a uma frequência pré-estabelecida para não causar danos à célula.

A implementação do controle dessas grandezas e a instalação da pilha serão apresentadas no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 6

## DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

---

Este capítulo descreve a utilização das bases experimentais para montagem da planta completa para a operação da pilha, onde são comentadas as adequações das salas que abrigam a pilha e o cilindro de hidrogênio juntamente com os equipamentos mínimos necessários para o manuseio e segurança da linha de hidrogênio. São mostradas também, a montagem do protótipo com a localização de cada dispositivo auxiliar com suas características e placas de interfaceamento com o microcontrolador e, finalmente, são apresentados os fluxogramas do algoritmo que faz o controle interno da pilha com comentários de cada tomada de decisão.

### 6.1 Montagem mecânica do sistema

As instalações de hidrogênio são divididas em dois ambientes: um compartimento externo para a central de hidrogênio, equipada com cilindro de hidrogênio e válvulas de segurança, e uma sala negativamente pressurizada abrigando a pilha com seus dispositivos de controle propriamente ditos. A Figura 6.1 mostra o esquema geral da instalação mecânica da pilha e a localização de cada equipamento auxiliar, evidenciando o sistema de injeção de ar e hidrogênio para a reação e o sistema de refrigeração da pilha.

#### 6.1.1 Instalação de hidrogênio

A construção das salas que abrigam a célula e a central de hidrogênio, assim como a confecção da linha de hidrogênio buscou-se seguir as sugestões de segurança descritas no Anexo B.

A central de gás foi projetada e construída no lado externo (isoladamente) da sala da pilha de células de combustível, com dimensões de 1,4 m x 0,8 m. Ela abriga um cilindro de hidrogênio com pureza de 99,999, equipado com uma válvula redutora de pressão que rebaixa da pressão padrão de armazenagem de 125 kgf/cm<sup>2</sup> (em torno de 1778,85 psi) para 15 psi. A canalização também possui uma válvula esfera para o fechamento da saída do gás,

proporcionando assim uma maior segurança contra vazamentos quando a central não estiver operando ou até mesmo, servindo para impedir a entrada do gás para o sistema quando a tubulação for purgada pela segunda válvula que conduz o gás para fora da central. Para o controle eletrônico da abertura do gás está instalada uma válvula solenóide Parker (COD: 54DF20CNZNI): 02 vias, normalmente fechada, vedação em *viton*<sup>®</sup>, conexão da rosca 1/2", lavagem com desengraxante para uso em hidrogênio, ver Figura 6.2.

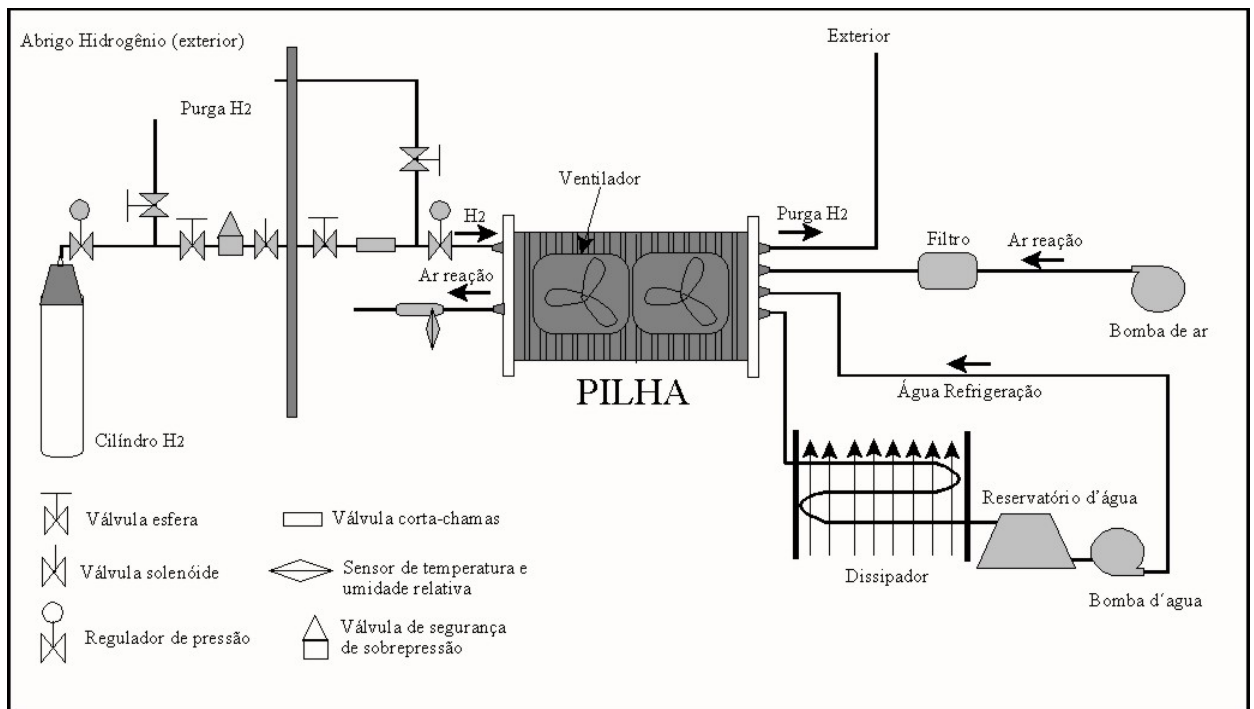


Figura 6.1 – Esquema da montagem mecânica do protótipo.

No interior da sala de hidrogênio, Figura 6.3, a tubulação possui uma válvula esfera para o fechamento local do gás quando for necessário, não necessitando para tal se deslocar até a central. Em série com esta, existe uma válvula corta-chamas que evita o retorno de possíveis chamas para a fonte de hidrogênio. Finalizando, na tubulação existem: uma válvula esfera que faz a purga de todo o sistema, e próximo à célula de combustível, um regulador de pressão, que é responsável pela regulagem fina da pressão; este reduz a pressão de 15 psi para no máximo 1,5 psi. Com o auxílio das válvulas esferas existe a possibilidade de injetar-se nitrogênio gasoso como forma de expelir restos de hidrogênio da tubulação neutralizando-a ou até mesmo para limpeza de possíveis contaminantes.



Figura 6.2 – Foto interno da central de gás.

Toda linha é confeccionada em tubos de cobre com solda em prata o que garante imunidade ao hidrogênio, boa vedação e resistência mecânica. Já as mangueiras flexíveis conectadas à célula são de *tygon*® cujo material possui paredes que não permitem a infiltração de hidrogênio, o que aconteceria com mangueiras comuns de silicone ou similares forem utilizadas.

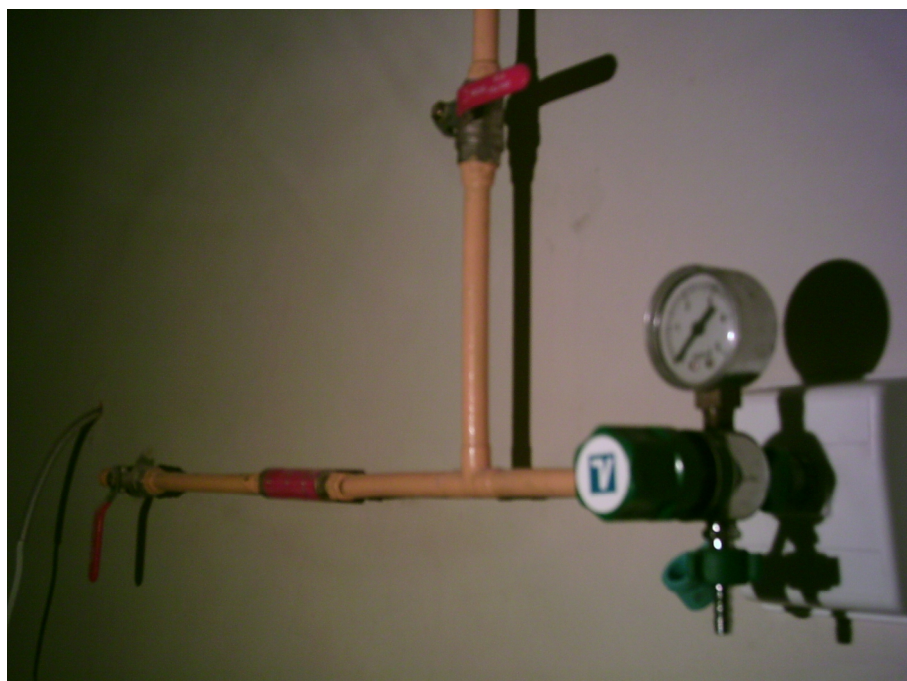


Figura 6.3 – Foto da instalação na sala de hidrogênio.



Na sala de hidrogênio usa-se um sistema especial de exaustão que possui a função de garantir que nenhum resíduo de hidrogênio se acumule no recinto. Isto é garantido pela criação de uma pressão negativa dentro da sala, admitindo o ar através de respiros localizados na parte inferior da parede oposta ao exaustor o qual dirige-os para fora da sala e passando pela local de instalação da pilha. Como o hidrogênio é mais leve que o ar e tende a se acumular nas partes superiores do recinto, este sistema foi instalado no teto da sala e construídos os orifícios na parte inferior das paredes fazendo com que o ar externo circule de baixo para cima garantindo assim a sua efetividade.

#### 6.1.2 Sistema de refrigeração da pilha

O monitoramento e controle da temperatura são realizados permanentemente. A temperatura e a umidade são medidas na saída do ar de reação da pilha através de um sensor RHT-DM da Novus Produtos Eletrônicos LTDA, Figura 6.4. Se a temperatura ultrapassar os limites da faixa prevista para as células, ver Capítulo 5, é acionado o sistema de refrigeração da pilha que é composto de ventiladores e bomba d'água. A ventilação forçada se faz através de dois pares de ventiladores instalados em lados opostos da pilha, ver Figura 6.7. O par instalado em um dos lados tem o efeito de sugar o ar da pilha, enquanto que o outro de injetar ar, isso faz com que haja uma circulação forçada e controlada de ar através da célula em uma única direção.

A refrigeração realizada através da circulação de água por canaletas internas em cada célula é feita por uma bomba tipo diafragma da Flojet, modelo LF122002 com fluxo de 2 L/min. A água usada é deionizada e depositada em um botijão plástico. Logo após sua passagem pela célula, ela sofre um processo de troca de calor através de um dissipador semelhante ao de ar condicionado e é armazenada novamente, formando assim um sistema fechado, ver Figura 6.5.

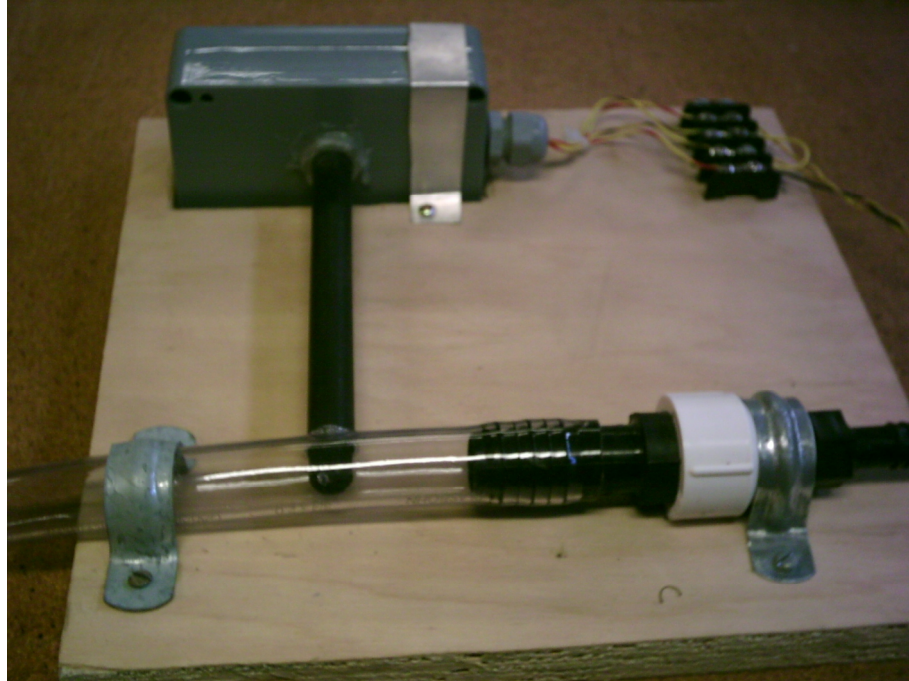


Figura 6.4 – Foto do sistema de medição de temperatura e umidade.

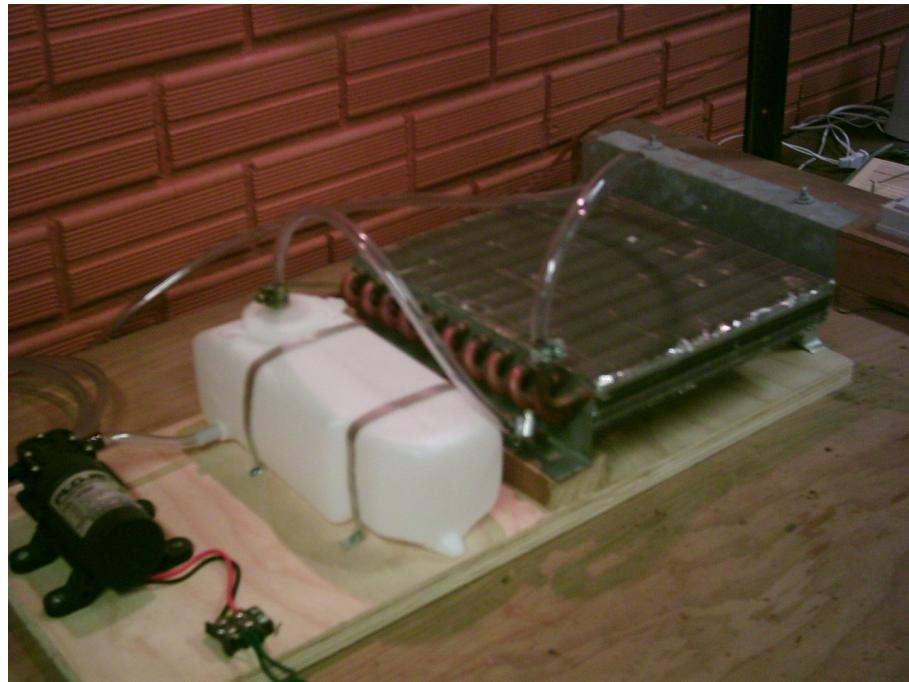


Figura 6.5 – Foto do sistema de refrigeração a água.

### 6.1.3 Injeção do ar de reação

O ar de reação é injetado na célula através de duas bombas do tipo diafragma da marca Flojet, modelo 4300, que capta o ar do ambiente. A bomba garante que o ar através

dela não se contamine com resíduos, graxas, pois o mesmo não entra em contato com as partes móveis e vedações da bomba. Porém, para evitar a presença de poeira oriunda do ambiente, é acoplado a ela o filtro que garante a limpeza do ar, como mostra a Figura 6.6. A bomba possui ainda um controle de velocidade com a finalidade de controlar a umidade relativa interna da membrana conforme visto no capítulo anterior. A umidade relativa é lida através do mesmo sensor de temperatura situado na saída do ar de reação.



Figura 6.6 – Foto do sistema de injeção do ar de reação.

#### 6.1.4 Preparação da pilha

A pilha adquirida da BCS Technology não possui nenhuma facilidade, periférico ou acesso elétrico às células independentemente. Portanto, foi necessário prepará-la para a implementação do controle e monitoramento, ver Figura 6.7. Primeiramente foi desenvolvido um suporte, onde a pilha é fixada sobre uma superfície isolante, proporcionando assim uma maior resistência mecânica e uma isolação elétrica de outros corpos. Junto ao suporte foi anexada uma estrutura auxiliar para fixação dos quatros ventiladores responsáveis pela ventilação forçada.

Para o monitoramento das tensões individuais de cada célula é necessário ter-se acesso aos pólos das células, porém a pilha não os disponibiliza. Mas, as placas bipolares

possuem pequenos orifícios onde foram presas, por pressão, sondas adaptadas, disponibilizando-se assim o acesso.

Devido à fragilidade quanto à corrente elétrica (estrutura de grafite das placas) estes contatos não podem ser usados para realizar os chaveamentos nas células, uma vez que a corrente de curto é relativamente alta. Para isso, foram pressionados contra a placa parafusos, os quais fazem um contato mais robusto e podem assim assumir a corrente total da pilha. Porém esta adaptação apresenta algumas dificuldades de se implementar, então se optou por realizar o chaveamento de grupos de 4 células, diminuindo assim a quantidade de contatos.

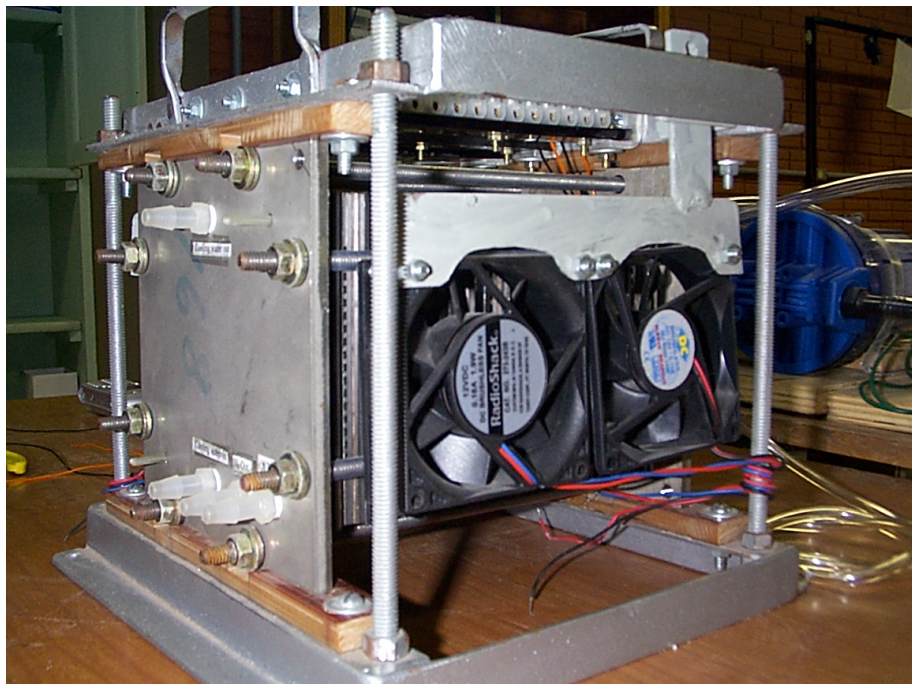


Figura 6.7 – Foto da pilha com a estrutura auxiliar.

## 6.2 Circuitos eletrônicos auxiliares

As placas eletrônicas foram confeccionadas para interfaceamento entre o microcontrolador e seus periféricos. Estes circuitos são: o circuito para seleção da medida da tensão individual de cada célula, circuito para seleção do chaveamento das células, circuito de condicionamento de sinal do sensor de umidade e temperatura, circuito de controle de velocidade da bomba de ar e dos ventiladores bem como a chave liga/desliga da válvula solenóide, bomba d'água e resistência e, também, placa de medição de corrente.