

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

**INSTRUMENTAÇÃO PARA PILHAS DE CÉLULAS A  
COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM VISANDO A  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Fredi Zancan Ferrigolo**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**INSTRUMENTAÇÃO PARA PILHAS DE CÉLULAS A  
COMBUSTÍVEL TIPO PEM VISANDO A EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA**

**por**

**Fredi Zancan Ferrigolo**

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: Prof. 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

**INSTRUMENTAÇÃO PARA PILHAS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL  
DO TIPO PEM VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

elaborada por  
**Fredi Zancan Ferrigolo**

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)**

---

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

Santa Maria, 22 de Junho de 2009

**Dedico esta dissertação à minha família e à  
minha namorada Fernanda, pelo incentivo, apoio  
e dedicação durante todos estes anos, sem os  
quais este trabalho não existiria.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador Prof. Dr. Felix Aberto Farret pelo conhecimento transmitido, estímulo e amizade com que orientou as atividades ao longo do trabalho.

Ao doutorando Diego Berlezi Ramos pela amizade, atenção e pronta disponibilidade para auxílios nas atividades ao longo do trabalho.

Aos colegas do CEEMA Henrique Wild Stangarlin, Jocemar Biasi Parizzi, Luciano Porto de Lima, Jordan Gustavo Trapp, Álvaro Brezolin Serdotte, Renata Carnieletto, Adriane Dutra, Álvaro Ricardo Augustin, Diego Roberto Zandoná, Dreifus Medeiros e todos os demais colegas do grupo, pelo auxílio a este trabalho e pelos momentos de descontração e estudo.

Agradecimento especial à família e a minha namorada Fernanda, pelo incentivo, carinho e amparo em todos os momentos.

A CAPES, Universidade Federal de Santa Maria e ao CEEMA (Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente) pelo apoio financeiro na realização deste projeto.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	5
1.1.1. Objetivo geral .....	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
1.2. Organização dos capítulos .....	6
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 3 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO E MODELAGEM DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....</b>	<b>12</b>
3.1. Princípios teóricos de células a combustível .....	12
3.1.1. Tipos de células .....	12
3.1.2. Funcionamento básico de uma CaC tipo PEM.....	13
3.2. Análise do equacionamento do modelo clássico .....	14
3.2.1. Tensão de Nernst .....	15
3.2.2. Potencial de ativação .....	16
3.2.3. Potencial ôhmico .....	17
3.2.4. Potencial de concentração .....	18
3.2.5. A camada dupla de carga.....	19
3.3. Análise do modelo eletrônico de CaC .....	21
3.3.1. Características do modelo eletrônico.....	22
3.3.2. Proposta de aprimoramento do modelo eletrônico .....	24
3.4. Resultados das simulações com o modelo eletrônico.....	25
3.4.1. Comparação com os dados experimentais da BCS de 500W.....	25
3.4.2. Comparação com os dados experimentais da SR-12 de 500W .....	29
3.5. Resumo do capítulo .....	32
<b>CAPÍTULO 4 - INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA PILHA.....</b>	<b>33</b>
4.1. Instalação e fornecimento de hidrogênio.....	34
4.1.1. Instalações da canalização de hidrogênio.....	34
4.1.2. Controle eletrônico da entrada de hidrogênio.....	36
4.1.3. Controle do fluxo de hidrogênio.....	37
4.1.4. Medição da pressão do hidrogênio .....	37
4.1.5. Hidrogênio usado por uma célula.....	37
4.2. Monitoramento e controle da temperatura da pilha.....	38
4.2.1. Temperatura da pilha .....	38
4.2.2. Medição da temperatura da membrana.....	38

4.2.3. Fluxograma de controle da temperatura .....	39
4.2.4. Produção de água e calor pela CaC .....	41
4.3. Monitoramento e controle do ar de reação .....	41
4.3.1. Umidade relativa da membrana .....	41
4.3.2. Quantidade de ar injetado .....	42
4.3.3. Monitoramento e controle do fluxo de entrada do ar de reação .....	43
4.3.4. Fluxograma de controle do ar de reação .....	44
4.4. Desempenho de uma CaC .....	46
4.4.1. <i>By-pass</i> .....	46
4.4.2. Implementação eletrônica .....	46
4.4.3. Medição da tensão individual de cada célula .....	47
4.4.4. Circuito eletrônico .....	48
4.4.5. Fluxograma da rotina do curto-circuito .....	50
4.5. Medição de corrente e tensão .....	53
4.6. Carga eletrônica variável .....	53
4.7. Umidificador do ar de reação .....	53
4.8. Sistema de geração com a SR-12 .....	54
4.9. Resumo do capítulo .....	55
<b>CAPÍTULO 5 - PROGRAMA DE MONITORAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO MECÂNICA DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>56</b>
5.1. Programa de monitoramento .....	56
5.2. Construção mecânica do protótipo .....	62
5.3. Resumo do capítulo .....	66
<b>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>67</b>
6.1. Análise estática do cartucho SR-12 .....	67
6.1.1. Variação da pressão do hidrogênio.....	67
6.1.2. Variação da temperatura do ar de reação.....	68
6.1.3. Variação da umidade relativa do ar de reação.....	70
6.1.4. Variação do fluxo do ar de reação.....	71
6.1.5. Aumento da temperatura e diminuição da pressão do hidrogênio.....	72
6.1.6. Relação entre os ensaios de variações com o consumo de hidrogênio e a potência .....	73
6.2. Análise dinâmica do cartucho SR-12 .....	75
6.3. Análise em regime permanente da SR-12 .....	76
6.3.1. Região da polarização de ativação.....	76
6.3.2. Região da polarização ôhmica.....	78
6.3.3. Região da polarização de concentração.....	80
6.4. Resultados da aplicação da técnica de curto-circuito nas membranas .....	83
6.4.1. Ensaio 1 - 50ms .....	83
6.4.2. Ensaio 2 - 200ms .....	85
6.4.3. Ensaio 3 - 1s .....	87
6.3.4. Ensaio 4 - 200ms (variação de umidade do ar de reação).....	91
6.5. Resumo do capítulo .....	92
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
7.1. Contribuições da pesquisa .....	95
7.2. Sugestões para continuidade do trabalho.....	95

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE A - SENSORES DE TEMPERATURA .....</b>	<b>100</b>
A.1. Características teóricas dos termopares .....	100
A.2. Características construtivas do sensor .....	101
A.3. Circuito eletrônicos de condicionamento dos sinais.....	102
A.4. Calibragem dos sensores .....	103
<b>APÊNDICE B - SENSORES DE PRESSÃO .....</b>	<b>106</b>
B.1. Descrição do sensor .....	106
B.2. Circuito para condicionamento do sinal dos sensores .....	106
B.3. Calibragem dos sensores.....	108
<b>APÊNDICE C - SENSOR DE UMIDADE E TEMPERATURA NOVUS.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO I - CIRCUITO PARA OS TERMOPARES.....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO II - CIRCUITO PARA O SENSOR DE PRESSÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO III - CIRCUITO PARA O SENSOR DE TENSÃO E CORRENTE.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO IV - PLACA ELETRÔNICA DO PIC E CARGA VARIÁVEL.....</b>	<b>114</b>

## RESUMO

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

### **INSTRUMENTAÇÃO PARA PILHAS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: FREDI ZANCAN FERRIGOLO

ORIENTADOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PHD.

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 22 de Junho de 2009

Esta dissertação refere-se ao desenvolvimento de um sistema de monitoramento, acionamento e controle de uma pilha de células a combustível (CaC) do tipo PEM e de seu equipamento auxiliar. A primeira etapa deste trabalho é relacionada à modelagem da CaC e a segunda refere-se à instrumentação eletrônica para obtenção de dados práticos da pilha. Para os estudos teóricos vários modelos matemáticos são estudados, com maior ênfase à modelagem eletrônica de CaC. Para o modelo eletrônico são propostas modificações em relação a sua proposta original e sua validação é realizada através de testes estáticos e dinâmicos, e pela comparação dos dados obtidos com dados de fabricantes e também de outros autores. De modo a avaliar o impacto que a variação das principais grandezas de controle causam na eficiência da CaC é apresentado um sistema de monitoramento e controle baseado no programa Labview. Este sistema foi implementado em um protótipo de laboratório que faz uso de uma placa de aquisição para coleta de dados e geração de sinais PWM de controle. Também é apresentada a instrumentação eletrônica necessária para o mesmo protótipo. A pressão de entrada dos reagentes, a temperatura de operação, a umidade da membrana, o fluxo de ar e a razão estequiométrica são as principais variáveis a serem monitoradas e controladas. Também são realizados ensaios de funcionamento dinâmico da pilha com a aplicação da técnica de *by-pass* ou curtos-circuitos entre o anodo e o catodo.

*Palavras-chave:* Fontes alternativas de energia, células a combustível, instrumentação eletrônica e eficiência energética.

## **ABSTRACT**

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

### **INSTRUMENTATION FOR PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS AIMING AT ELECTRICAL EFFICIENCY**

AUTHOR: FREDI ZANCAN FERRIGOLO  
ADVISOR: PROF. FELIX ALBERTO FARRET, PHD.  
Date and Local: Santa Maria, June 22<sup>th</sup>, 2009

This work aims at the development of an instrumentation prototype to monitor, control and drive a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and its ancillary equipment. The first stage of this work is related to PEMFC stack modeling and the second is focused on electronic instrumentation to obtain practical data regarding to the stack behavior. Several theoretical models are analyzed. However, more attention is paid to the electronic model. Considering other electronic PEMFC models, changes were made to make it a more accurate. In this way, this modified model was validated by laboratory static and dynamic tests. These tests were compared with real data, available from the manufacturer's manual and other information from literature. To evaluate the variation in the main external parameters (reactant pressures, temperature, humidity of the membranes and coolant fluids, stoichiometric ratio, power, current and voltage) a full fuel cell instrumentation circuitry was developed to monitor and control them. This software is fully implemented in Labview, so as to verify and to control the whole fuel cell efficiency by using only a computer-based terminal. Additionally, the whole instrumentation system is presented and discussed. Finally, experimental tests were carried out to evaluate a by-pass technique (set of controlled short-circuits) to maximize the stack output power.

*Keywords:* Alternative energy sources, fuel cells, electronic instrumentation and energy efficiency.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E LETRAS GREGAS

### Lista de Abreviaturas

AFC	Alkaline Fuel Cell
CaCs	Células a Combustível
CaC	Célula a Combustível
CEEMA	Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEM	Proton Exchange Membrane
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PWM	Pulse Width Modulation
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
GD	Geração Distribuída
AI	Amplificador de Instrumentação

### Lista de Símbolos

$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto ( <i>open circuit</i> ) ( $V$ )
$R_{eq}$	Resistência equivalente série ( $\Omega$ )
$I_o$	Corrente de saturação reversa do diodo ( $A$ )
$e^-$	Elétron
$m$ e $n$	Parâmetros de transferência de massa ( $m = 3 \cdot 10^{-5} (V)$ ) e ( $n = 8 \cdot 10^{-3} (cm^2 \cdot mA^{-1})$ ).
$k$	Constante de Boltzmann ( $1,3806 \cdot 10^{-23} (J \cdot K^{-1})$ )
$V_{CaC\_1}$	Tensão da célula 1 ( $V$ )

$V_{CaC\_2}$	Tensão da célula 2 ( $V$ )
$V_{CaC\_3}$	Tensão da célula 3 ( $V$ )
$V_{CaC\_4}$	Tensão da célula 4 ( $V$ )
$V_{CaC}$	Tensão total da pilha ( $V$ )
$H_2$	Hidrogênio gasoso
$O_2$	Oxigênio gasoso
$E_{Nernst}$	Tensão de circuito aberto ou Potencial de Nernst ( $V$ )
$V_{at}$	Tensão de ativação ( $V$ )
$V_{con}$	Tensão de concentração ( $V$ )
$V_{\text{ohmico}}$	Tensão ôhmica ( $V$ )
$P_{CaC}$	Potência elétrica de saída da célula a combustível ( $W$ )
$C_{O_2}$	Concentração de oxigênio ( $mol/cm^3$ )
$C_{H_2}$	Concentração de hidrogênio ( $mol/cm^3$ )
$B$	Constante que depende dos reagentes da pilha ( $V$ )
$P_{H_2}$	Pressão do hidrogênio gasoso ( $psi$ )
$P_{O_2}$	Pressão do oxigênio gasoso ( $psi$ )
$H^+$	Íon hidrogênio
$R_{ohm}$	Resistência ôhmica ( $\Omega$ )
$I_{CaC}$	Corrente da CaC ( $A$ )
$R_m$	Resistência da membrana ( $\Omega$ )
$R_c$	Resistência dos contatos ( $\Omega$ )
$l$	Espessura da membrana ( $cm$ )
$A_e$	Área efetiva da membrana ( $cm^2$ )
$T$	Temperatura da pilha ( $K$ )
$F$	Constante de Faraday ( $96485(C \cdot mol^{-1})$ )
$R$	Constante universal dos gases ( $8,3145(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$ )
$J_{max}$	Densidade máxima de corrente ( $A$ )
$J_n$	Densidade de corrente interna ( $A$ )

$n_{CaC}$	Número de células que compõem a pilha
$R_S$	Resistência parasita do diodo ( $\Omega$ )
$N$	Coefficiente de emissão do diodo
$I_{SR}$	Recombinação da corrente do diodo ( $A$ )
$\Delta\bar{g}_f$	Mudança na energia livre de Gibbs de formação molar ( $J \cdot mol^{-1}$ )
$Q_{ar}$	Vazão de ar ( $L / min$ )
$UR_{ent}$	Umidade relativa do ar de reação (%)
$T_{ent}$	Temperatura de entrada do ar de reação ( $^{\circ}C$ )
$T_1$ a $T_4$	Termopares inseridos na membrana da pilha ( $^{\circ}C$ )
$T_{ent\_inicial}$	Temperatura inicial do ar de reação ( $^{\circ}C$ )
$T_{sai\_final}$	Temperatura final do ar de reação ( $^{\circ}C$ )
$I_{méd}$	Corrente média da pilha ( $A$ )
$Taxa_{méd}$	Taxa média
$PIC_{op}$	Sinal do microcontrolador PIC-18F452 ( $V$ )
$V_{ar}$	Tensão no ventilador do ar de reação ( $V$ )
$a$	Atividade dos reagentes
$\Delta\bar{g}_f^{\circ}$	Mudança na energia de Gibbs de formação molar, na pressão padrão (100kPa) e na temperatura padrão ( $25^{\circ}C$ ) ( $J \cdot mol^{-1}$ )
$T_{ref}$	Temperatura de referência (298,15(K))
$i$	Densidade de corrente da pilha ( $mA / cm^2$ )
$i_o$	Mudança na densidade de corrente, ou seja, valor da densidade de corrente em que a tensão começa a mover-se para zero ( $mA / cm^2$ )
$I_m$ e $V_s'$	Coordenadas, na região de concentração, onde as características da tensão e da corrente começam a ser não-lineares ( $A$ ) e ( $V$ )
$R_{at}$	Resistência de ativação ( $\Omega$ )
$R_{con}$	Resistência de concentração ( $\Omega$ )
$R_{ohm}$	Resistência ôhmica ( $\Omega$ )
$V_T$	Tensão térmica do diodo ( $V$ )

$V_D$	Tensão no diodo ( $V$ )
$I_D$	Corrente pelo diodo ( $A$ )
$n_a$	Constante empírica entre 1 e 2
$I_S$	Corrente de saturação reversa ( $A$ )
$q$	Carregamento eletrônico ( $C$ )

### Lista de Letras Gregas

	Parâmetro influenciado pelo procedimento de preparação da
$\psi$	membrana
$\eta$	Rendimento ou eficiência da pilha (%)
$\alpha$	Coefficiente de transferência
$\rho_m$	Resistividade da membrana ( $\Omega \cdot cm$ )
	Coefficientes paramétricos para o cálculo do sobrepotencial de
$\xi_{1,2,3,4}$	ativação
$\lambda$	Razão estequiométrica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Análise dos principais investidores em CaC.....	2
Figura 1.2 - Análise da poluição gerada por cada fonte .....	2
Figura 1.3 - Estimativas de custos de uma CaC e do $H_2$ .....	4
Figura 3.1 - Operação básica de uma CaC do tipo PEM.....	14
Figura 3.2 - Curva característica $V \times I$ de polarização de uma CaC.....	15
Figura 3.3 - Circuito elétrico equivalente.....	20
Figura 3.4 - Curva teórica dinâmica para obtenção de parâmetros da CaC. ....	21
Figura 3.5 - Modelo eletrônico de CaC.....	23
Figura 3.6 - Fenômeno de partida de uma CaC.....	24
Figura 3.7 - Circuito elétrico completo com a introdução do efeito de partida.....	25
Figura 3.8 - Curva de polarização da pilha BCS de 500W. ....	26
Figura 3.9 - Potência da pilha BCS de 500W.....	27
Figura 3.10 - Rendimento da pilha BCS de 500W.....	27
Figura 3.11 - Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente. ....	28
Figura 3.12 - Variação na corrente para simulação dinâmica. ....	28
Figura 3.13 - Potência para um degrau de corrente.....	29
Figura 3.14 - Rendimento na pilha para um degrau de corrente. ....	29
Figura 3.15 - Curva característica de polarização. ....	30
Figura 3.16 - Potência da pilha SR-12.....	30
Figura 3.17 - Corrente em degrau para simulação dinâmica. ....	31
Figura 3.18 - Tensão para um degrau de corrente.....	31
Figura 3.19 - Potência para um degrau de corrente.....	32
Figura 4.1 - Esquema de monitoramento da pilha.....	34
Figura 4.2 - Sala externa do hidrogênio. ....	35
Figura 4.3 - Canalização interna.....	35
Figura 4.4 - Circuito de acionamento da válvula solenóide. ....	36
Figura 4.5 - Fluxograma de controle da temperatura. ....	40
Figura 4.6 - Curva vazão x tensão de alimentação do ventilador.....	43
Figura 4.7 - Circuito de acionamento dos ventiladores.....	44
Figura 4.8 - Fluxograma de controle da umidade e estequiometria. ....	45

Figura 4.9 - Esquema de ligação e medição de tensão do cartucho SR-12. ....	47
Figura 4.10 - Circuito de ligação do microcontrolador para leitura da tensão. ....	48
Figura 4.11 - Circuito para aplicação do <i>by-pass</i> . ....	49
Figura 4.12 - Caminho percorrido pela corrente sem o <i>by-pass</i> . ....	49
Figura 4.13 - a) caminho da corrente no Bloco_1 e b) Caminho da corrente no Bloco_2. ....	50
Figura 4.14 - a) caminho da corrente no Bloco_1 e b) Caminho da corrente no Bloco_2. ....	50
Figura 4.15 - Sinal dos pulsos nas chaves. ....	51
Figura 4.16 - Fluxograma da rotina do <i>by-pass</i> para o ensaio 1. ....	52
Figura 4.17 - Esquema do método de aumento da umidade do ar de reação. ....	54
Figura 4.1 - Esquema de montagem do sistema completo. ....	54
Figura 5.1 - Esquema principal de monitoramento e controle da SR-12. ....	57
Figura 5.2 - Fluxograma principal do programa. ....	59
Figura 5.3 - Painel principal de monitoramento. ....	60
Figura 5.4 - Painel para monitoramento durante ensaios de polarização . ....	60
Figura 5.5 - Painel para monitoramento da tensão, corrente e rendimento. ....	61
Figura 5.6 - Painel de monitoramento da climatização para operação em regime. ....	61
Figura 5.7 - Painel das variáveis elétricas para operação em regime permanente. ....	62
Figura 5.8 - Cartucho da SR-12 utilizado. ....	63
Figura 5.9 - Vista lateral do gabinete e indicação dos componentes. ....	63
Figura 5.10 - Vista frontal do gabinete e indicação dos componentes. ....	64
Figura 5.11 - Vista traseira do gabinete e indicação dos componentes. ....	65
Figura 5.12 - Ilustração do protótipo. ....	65
Figura 6.1 - Curva característica de polarização para variação da pressão do hidrogênio. ....	65
Figura 6.2 - Curva característica de polarização para variação da pressão do hidrogênio. ....	69
Figura 6.3 - Curva característica de polarização para variação da temperatura. ....	71
Figura 6.4 - Curva característica de polarização para a variação da umidade. ....	72
Figura 6.5 - Curva característica de polarização para a variação do fluxo de ar. ....	73
Figura 6.6 - Variação da temperatura com o aumento da corrente. ....	73
Figura 6.7 - Variação da pressão de hidrogênio com o aumento da corrente. ....	74
Figura 6.8 - Tensão em função do consumo com variação da umidade. ....	74
Figura 6.9 - Tensão em função do consumo com variação da temperatura. ....	75
Figura 6.10 - Tensão em função do consumo com variação do fluxo de ar. ....	76
Figura 6.11 - Curva experimental para o teste dinâmico. ....	77

Figura 6.12 - Temperatura interna e umidade do ar de reação .....	77
Figura 6.13 - Pressão do hidrogênio e quantidade de ar injetado.....	78
Figura 6.14 - Grandezas elétricas e rendimento na região de ativação .....	79
Figura 6.15 - Temperatura interna e umidade do ar de reação .....	79
Figura 6.16 - Pressão do hidrogênio e quantidade de ar injetado.....	79
Figura 6.17 - Grandezas elétricas e rendimento para a região ôhmica.....	80
Figura 6.18 - Temperatura interna e umidade do ar de reação .....	81
Figura 6.19 - Pressão da canalização de hidrogênio e vazão de ar.....	81
Figura 6.20 - Grandezas elétricas e rendimento da CaC .....	82
Figura 6.21 - Sinal de tensão no ventilador do ar de reação.....	82
Figura 6.22 - Sinal de tensão no ventilador de refrigeração.....	84
Figura 6.23 - Tensão, corrente e potência em regime permanente da CaC.....	84
Figura 6.24 - Curva experimental de polarização.....	85
Figura 6.25 - Curva experimental de polarização.....	85
Figura 6.26 - Curva da polarização em função do tempo.....	85
Figura 6.27 - Tensão, corrente e potência em regime permanente da CaC.....	86
Figura 6.28 - Curva experimental de polarização.....	87
Figura 6.29 - Curva experimental de polarização.....	87
Figura 6.30 - Curva da polarização em função do tempo.....	88
Figura 6.31 - Potência em regime permanente da CaC .....	89
Figura 6.32 - Tensão e corrente em regime permanente da CaC .....	89
Figura 6.33 - Curva experimental de polarização.....	89
Figura 6.34 - Curva da polarização em função do tempo.....	90
Figura 6.35 - Detalhe do by-pass.....	91
Figura 6.36 - Detalhe de aplicação do by-pass nos blocos.....	91
Figura 6.37 - Aplicação do by-pass e variação da umidade .....	91

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

### Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Custos total e por partes de uma CaC .....	03
Tabela 6.1 - Valores usados para a variação de pressão do hidrogênio .....	67
Tabela 6.2 - Valores usados para o teste de variação da temperatura .....	69
Tabela 6.3 - Valores usados para os testes de variação da umidade .....	70
Tabela 6.4 - Valores usados para os testes de variação do fluxo do ar .....	71
Tabela 6.5 - Variáveis da CaC para o teste dinâmico.....	75
Tabela 6.6 - Valores dos parâmetros para a SR-12 .....	76
Tabela 6.7 - Grandezas de controle para o teste com by-pass.....	83

### Lista de Quadros

Quadro 3.1 - Tipos de células a combustível e suas características .....	13
Quadro 6.1 - Valores para 15 minutos de operação (polarização) .....	78
Quadro 6.2 - Valores para 15 minutos de operação (ôhmica).....	80
Quadro 6.3 - Valores para 15 minutos de operação (concentração).....	82

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

---

A constante modernização industrial evidenciada nas últimas décadas tem exigido uma demanda crescente de energia, além de tecnologias de geração e conversão de energia cada vez mais eficientes e menos poluentes. Porém, os padrões mundiais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes de combustíveis fósseis, o que gera poluentes e efeito estufa. Além disso, essa produção causa a destruição da camada de ozônio, a poluição dos rios e oceanos, o crescente número de substâncias químicas perigosas e o acúmulo de resíduos que prejudicam consideravelmente a natureza.

Com isso, é necessário mudar esses padrões estimulando as energias alternativas e renováveis, e nesse cenário, o Brasil criou o Plano Nacional de Energia - PNE 2030, que tem como objetivo o planejamento de longo prazo do setor energético do país, investindo financeiramente, orientando e estudando a viabilidade de expansão de energias alternativas para as próximas décadas, incluindo a tecnologia do hidrogênio (PNE - 2030, 2007).

Dentro deste contexto, as pilhas de células a combustível (CaC) do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane* - Membrana de troca de prótons) são consideradas uma alternativa muito promissora ao consumo de energia fóssil, principalmente pela razão de ser uma tecnologia limpa, pois, como resíduo tem-se apenas calor e água limpa (Amphlett et al., 1995). O seu princípio de funcionamento foi descoberto no ano de 1839 pelo advogado e cientista inglês, William Grove, que foi considerado o precursor das células a combustível. A “Célula de Grove”, como era chamada, usava um eletrodo de platina imerso em ácido nítrico e um eletrodo de zinco imerso em sulfato de zinco para gerar uma corrente de 12 amperes e uma tensão de 1,8 volts.

De acordo com Larminie e Dicks (2003), as células a combustível produzem energia elétrica como resultado de reações eletroquímicas de oxi-redução, que ocorrem pela passagem de um gás rico em  $H_2$  através do anodo e de  $O_2$  através do catodo. O fluxo de íons através do eletrólito produz uma corrente elétrica a ser usada num circuito elétrico externo.

Mundialmente, grandes investimentos estão sendo realizados em pesquisas e projetos relacionados a fontes alternativas baseadas em células a combustível, na Figura 1.1 estão indicados os maiores investidores mundiais em pesquisas com CaC, seus investimentos atuais e algumas projeções para os próximos anos.

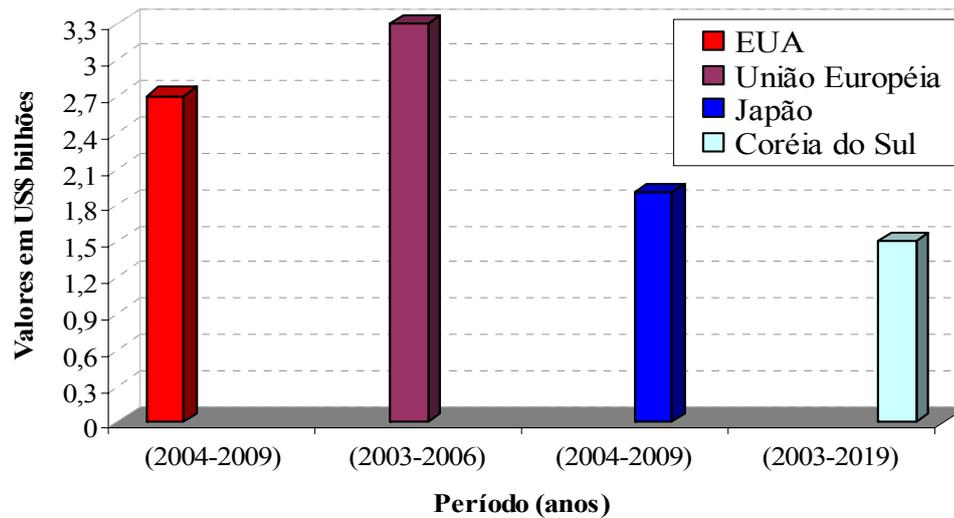


Figura 1.1 - Análise dos principais investidores em CaC.  
Fonte: IEA (2005)

O grande problema da queima de combustíveis fósseis, principalmente por indústrias e transporte é a quantidade de substâncias tóxicas que passam a fazer parte do ar, principalmente em grandes centros urbanos, como: monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e particulados (fumaça e fuligem). Portanto, o uso de células a combustível apresenta uma grande vantagem em relação à não poluição do ar. Na Figura 1.2 tem-se indicadores de valores da poluição de cada fonte de energia, assim, percebe-se uma grande vantagem no uso da tecnologia do hidrogênio em relação às outras fontes.

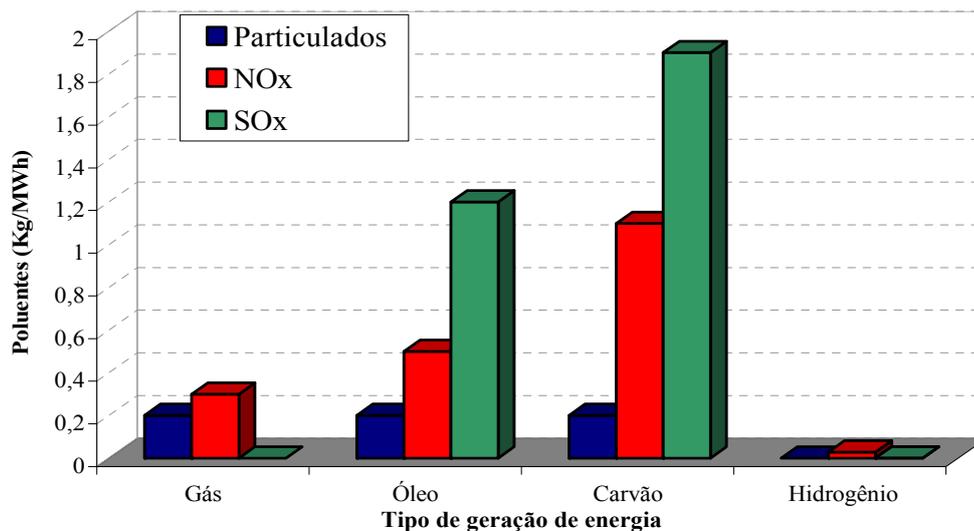


Figura 1.2 - Análise da poluição gerada por cada fonte.  
Fonte: Gonzatti (2005 apud Web site do MCT, 2005)

Algumas outras vantagens que se pode citar em relação ao uso de CaCs são: modularidade, alta eficiência quando comparada a outras fontes de energia e operação silenciosa. Além disso, como fonte de geração distribuída (GD) esta tecnologia também é considerada muito interessante. Comparando-se com outras fontes de GD como a eólica e a fotovoltaica as células possuem a vantagem da possibilidade de serem conectadas em qualquer ponto em sistemas de distribuição, sem limitações geográficas para alcançar o seu melhor desempenho, como acontece com as outras fontes (Wang et al., 2005).

Em contraposição às várias vantagens citadas, as quais tornam as CaCs muito promissoras, tem-se o alto custo atual de sua implementação. O custo médio de uma CaC é exposto na Tabela 1.1. Mas, com o grande desenvolvimento da área de materiais nos últimos anos, esta tecnologia vem tornando-se mais viável economicamente, associada à crescente exigência mundial de fontes de energia com baixo impacto ambiental. As células a combustível representam, já em médio prazo, uma alternativa tanto para motores à combustão (unidades móveis), como para geradores de energia de médio porte (100kW) até plantas da ordem de MW de potência (unidades estacionárias) (Farret e Simões, 2006).

Tabela 1.1 - Custos total e por partes de uma CaC.

	Membrana	Eletrodo	Placas bipolares	Catalisador de platina	Periféricos	Total
<i>Custo US\$/kW</i>	250	712	825	24	16	<b>1826</b>

Fonte: IEA (2005)

A *International Energy Agency* (IEA) (Agência Internacional de Energia) em seu estudo *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells - 2005* (Perspectivas para o hidrogênio e células a combustível - 2005) faz uma estimativa da evolução dos custos até o ano de 2030. Na Figura 1.3 é indicada essa estimativa de custos para uma pilha de células a combustível e também para o hidrogênio. Observa-se na mesma figura que para o ano de 2030 as previsões indicam uma diminuição bastante considerável dos custos da CaC com uma queda no preço do kWh de mais de 95% . E para a produção/armazenagem de hidrogênio a queda será de mais de 85%.

Esta dissertação foi dividida em duas partes: a primeira sobre a modelagem de CaCs e a segunda sobre a instrumentação eletrônica necessária para obtenção de dados práticos de uma pilha. Os principais modelos foram estudados, com um melhor detalhamento da modelagem eletrônica de uma pilha. Foram propostas modificações no modelo eletrônico e

sua validação foi realizada através de testes estáticos e dinâmicos, e pela comparação dos dados obtidos com dados de fabricantes e também de outros autores.

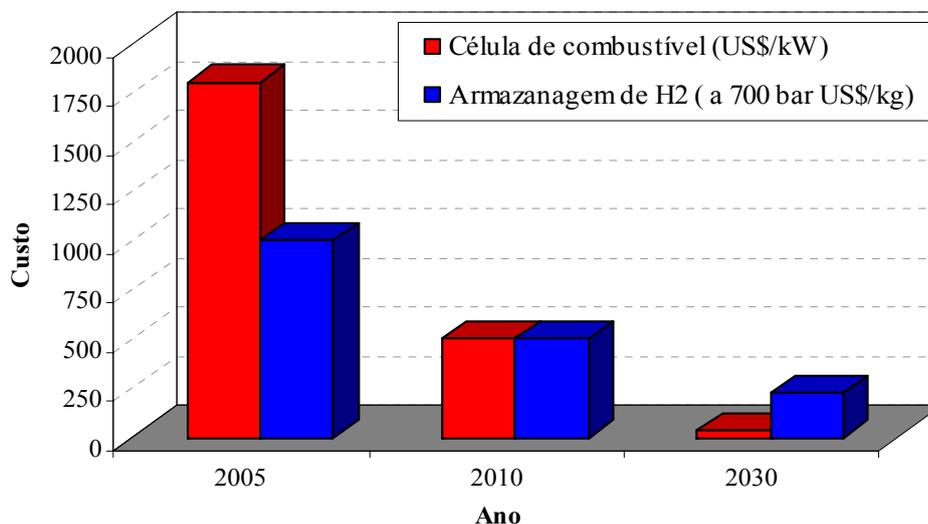


Figura 1.3 - Estimativas de custos de uma CaC e do H<sub>2</sub>.  
Fonte: IEA (2005)

Em relação à instrumentação eletrônica, tratou-se da automação interna da pilha. Existem grandezas que devem ser monitoradas e controladas para mantê-las dentro de uma faixa de operação indicada pelo fabricante e dependente do tipo de pilha. A pressão de entrada dos reagentes, a temperatura de operação, a umidade da membrana, o fluxo de ar e a razão estequiométrica são as principais variáveis a serem monitoradas e controladas. Para isso é apresentado um sistema de monitoramento e controle baseado no programa Labview, que faz uso de uma placa de aquisição para coleta de dados e geração de sinais PWM de controle. Também é apresentada toda instrumentação eletrônica necessária a esse protótipo.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é realizar a instrumentação eletrônica necessária à obtenção de parâmetros e coleta dados das células, para assim, avaliar a eficiência da pilha frente a variações nas condições normais de operação. Estuda-se então, a variação da eficiência de uma pilha com a variação de parâmetros externos como: temperatura do ar de reação, pressões dos reagentes, umidade da membrana, variação do fluxo de ar de reação e aplicação da técnica de curtos-circuitos ou *by-pass*. Também foram realizados testes de funcionamento dinâmico da pilha.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo geral

Desenvolvimento e aperfeiçoamento da instrumentação eletrônica necessária ao monitoramento e controle dos dispositivos auxiliares da CaC e de aquisição de dados, visando um estudo da influência da variação de parâmetros externos na eficiência elétrica global da CaC. Como decorrência disto, busca-se a obtenção e o domínio das tecnologias mais recentes e promissoras para projeto prático de pilhas, a qual é pouco difundida ainda na literatura.

### 1.1.2. Objetivos específicos

a) Realizar um estudo detalhado do princípio de funcionamento, dos fenômenos envolvidos e da modelagem de células a combustível, de modo a avaliar as possibilidades de aperfeiçoamentos dos modelos matemáticos existentes;

b) Analisar um sistema de geração de energia elétrica usando uma CaC, realizando para isso o desenvolvimento e aperfeiçoamento da instrumentação eletrônica para o monitoramento dos equipamentos auxiliares como: válvula solenóide, regulador de pressão, ventiladores, sensores de pressão, sensores de corrente, de tensão e sensores de umidade. Desenvolvendo também, recursos de programação e aquisição de dados, e equipamentos que permitam validar as teorias desenvolvidas;

c) A partir do protótipo construído, realizar diversos testes com o sistema completo em operação, avaliando sua resposta de eficiência frente a variações dos parâmetros externos. Além disso, realizar testes com a CaC operando com carga permanente, com mudanças bruscas de cargas e com aplicação da técnica de curtos-circuitos.

## 1.2. Organização dos capítulos

O Capítulo 1 apresenta uma visão global sobre energia e células a combustível. Onde é realizada uma breve discussão sobre os investimentos mundiais na tecnologia do hidrogênio e também algumas perspectivas desta tecnologia para os próximos anos, bem como a idéia básica deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, descrevendo o conteúdo do material utilizado no trabalho fundamentando teoricamente o estudo a ser realizado.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão sobre as principais características construtivas e operacionais de células a combustível, em especial as células do tipo PEM. É apresentado o modelamento matemático das células, descrevendo detalhadamente cada termo e cada fenômeno envolvido no seu funcionamento. São analisados teoricamente o modelo eletrônico e o modelo clássico de CaC. São demonstradas as respostas estáticas e dinâmicas destes modelos. Simulações de inserção e rejeição de carga são realizadas, visando avaliar o desempenho da pilha frente a estas situações. O capítulo apresenta, também, uma análise dos principais parâmetros envolvidos na modelagem e na operação de pilhas de células a combustível. Os resultados obtidos são analisados e discutidos.

O Capítulo 4 descreve detalhadamente cada variável necessária à operação prática de uma pilha. É mostrada a técnica de instrumentação utilizada para o monitoramento de cada variável, bem como os circuitos eletrônicos necessários e os fluxogramas de programação.

O Capítulo 5 descreve a construção mecânica do protótipo e os equipamentos para aquisição de dados, juntamente com a interface de monitoramento criada no programa Labview. Também são apresentados o fluxograma principal e os painéis de monitoramento.

O Capítulo 6 apresenta os resultados do trabalho. No capítulo serão analisadas duas formas de operação da CaC. Primeiramente, os resultados da operação estática, com uma análise da eficiência da CaC com a variação das condições externas e uma análise dinâmica da pilha, para a obtenção de parâmetros como a capacitância e resistência interna. Também será apresentada uma coleta de dados que possibilite a verificação das características da tensão, corrente, potência e rendimento e, além disso, o consumo de gases, produção de água e calor da CaC, dentro de um período de operação.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas, as contribuições do estudo e também algumas propostas de continuidade da pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

A fim de analisar-se o funcionamento básico de uma pilha de células a combustível, podem-se citar Larminie e Dicks (2003), Farret (1999), Barbir (2005) e Hirschenhofer (2005). Nestes trabalhos encontra-se um embasamento teórico, com descrições detalhadas dos termos usados e dos fenômenos envolvidos como; temperatura de operação, pressão, densidade de corrente, característica do combustível utilizado, umidade da membrana, tipos de bombas de ar usadas e características de pureza dos combustíveis. A obtenção do hidrogênio, necessário para operação de células do tipo PEM, é apresentada, bem como as questões de segurança que merecem atenção. Também se encontra em Farret e Simões (2006) a explicação detalhada da metodologia de obtenção dos principais parâmetros de uma CaC. Um parâmetro importante é a capacitância da pilha, que é obtida usando-se o método da interrupção de corrente. Outra abordagem dessas referências, que será amplamente utilizada nesta dissertação, é o equacionamento necessário às estimativas de consumo de oxigênio, consumo de hidrogênio, produção de calor e produção de água de uma CaC.

A modelagem de células a combustível vem sendo muito pesquisada em empresas, centros de pesquisa e universidades, em vista dos altos custos de uma célula comercial. Assim sendo, para projetos de desenvolvimento de sistemas de energia torna-se mais interessante adotar-se um modelo computacional que permita prever seu comportamento, facilitando assim, os estudos para seleção, operação e levantamento de dados. De acordo com Chu et al. (2000), Wang et al. (2005), Alejandro (2007) e Weydahl (2007) um modelo eletroquímico baseado em equações semi-empíricas que predigam o comportamento estático, e também, um circuito elétrico equivalente para a modelagem dinâmica são as formas de simulação mais utilizadas atualmente.

Runtz et al. (2005 apud Larminie, 1994) afirma que o primeiro modelo dinâmico desenvolvido para CaC foi uma associação de dois capacitores, duas fontes e duas resistências. Para obtenção dos valores destes parâmetros o autor desenvolveu uma técnica de interrupção brusca da corrente da CaC. Mais adiante, o mesmo autor em sua nova publicação Larminie e Dicks (2003) apresenta uma reformulação do modelo, que é composto por uma fonte de tensão ( $E$ ) em série com um circuito paralelo composto por um capacitor ( $C$ ) e um resistor ( $R_a$ ), e em série com uma outra resistência ( $R_r$ ). A tensão de saída ( $V_{CaC}$ ) está

relacionada com a tensão de Nernst ( $E$ ), que é a tensão ideal ou tensão de circuito aberto. A tensão de saída da pilha é obtida pelo somatório da tensão de Nernst e de três irreversibilidades, ou quedas, presentes: quedas de ativação ou polarização de ativação, queda ôhmica ou polarização ôhmica e queda de concentração ou polarização de concentração. O capacitor  $C$  é utilizado para modelar o comportamento dinâmico da CaC. Porém, Amphlett (1995) observa que, para o comportamento dinâmico existem questões mais complexas que devem ser levadas em consideração na modelagem, pois as condições de operação normalmente sofrem mudanças com o tempo. Por exemplo, o fenômeno de partida da CaC ou *start-up*, e grandes mudanças nos níveis de potência deverão ser acompanhados por mudanças na temperatura da pilha, na umidade da membrana e também por mudança nas concentrações dos reagentes no eletrólito. À primeira vista esta modelagem representa um circuito bastante simples, mas, no entanto, todas as resistências são variáveis e dependem de um equacionamento eletroquímico bastante complexo.

Vários outros autores contribuíram significativamente para este modelo, onde apresentam conclusões importantes e novos parâmetros de análise. De acordo com Corrêa, (2001, 2002) observa-se que a variação da área efetiva de uma CaC muda os valores de tensão do final da curva de polarização, na região da queda por ativação. A espessura da membrana e a resistência dos contatos não possuem uma influência significativa na tensão de saída. Nota-se, em particular, uma grande influência de um coeficiente envolvendo a temperatura e a corrente de operação, denominado  $\xi_1$  na curva de polarização. Este parâmetro é obtido das leis eletroquímicas e termodinâmicas.

No estudo de Xue et al. (2006) é desenvolvida uma técnica de modelagem matemática unificada. Trata de uma análise computacional baseada na técnica do quadrado mínimo e um conjunto de equações eletroquímicas que representam o funcionamento de uma célula, e tem como objetivo analisar o comportamento estático e dinâmico. Esta técnica unifica a modelagem estática e dinâmica.

Em Corrêa et al. (2005) é realizada uma análise da sensibilidade dos principais parâmetros usados no resultado final. Assim, é determinado o grau de importância de cada parâmetro no resultado do modelo. Observou-se que os parâmetros de maior sensibilidade são a densidade máxima de corrente ( $J_{máx}$ ) e os coeficientes  $\xi_3$  e  $\xi_1$ . Os parâmetros com média sensibilidade são  $J_n$ ,  $B$  e  $\xi_4$  e os parâmetros com pouca sensibilidade são  $A$  e  $R_C$ . São apresentadas curvas da variação de cada parâmetro e gráficos da influência dessas variações

na tensão de saída, na corrente e na potência. Porém, não é apresentada uma comparação com dados experimentais.

Já Laurencelle (2001) apresenta resultados de investigação experimental de um balanço energético no módulo comercial Ballard. São analisados os fenômenos transitórios que ocorrem durante o *start-up* (partida do funcionamento da pilha), com o chaveamento de cargas estando a pilha conectada a um inversor DC/AC.

Mas a complexidade desses modelos eletroquímicos e a quantidade de variáveis necessárias para uma modelagem razoável na prática, e que reproduza todos os fenômenos eletroquímicos transitórios e permanentes dificultam sobremaneira estes estudos. Existem problemas relacionados à necessidade de um número elevado de parâmetros, o que acaba por levar a algum grau de empirismo, tornando difícil a determinação de alguns valores de modelagem. Também, outros elementos ainda não são totalmente definidos sendo restritos aos fabricantes. Além disso, existia uma lacuna na literatura com relação a um modelo adequado à Engenharia Elétrica, que fosse facilmente utilizado como um bloco de análise em simulações envolvendo conversores, eletrônica de potência, e até mesmo a integração com outras fontes de energia.

Assim, com o intuito de facilitar a análise de CaCs, principalmente para engenheiros eletrônicos, Yuvarajan et al. (2004), Andréa et al. (2004), Balasubramanian (2005) e Yu et al. (2004) apresentaram um modelo baseado em dispositivos não-lineares, chamado modelo eletrônico de CaC. Esta abordagem baseia-se na modelagem de diferentes regiões da curva característica de operação da CaC usando elementos da biblioteca do programa Pspice-Orcad. Ambas as respostas, dinâmica e estática, são consideradas. O modelo usa um diodo e transistores para as características estáticas, e um capacitor e um indutor para as características dinâmicas. Trata-se de um modelo puramente elétrico, onde seu projeto baseia-se no conhecimento prévio dos valores de correntes e tensões da operação de uma pilha real a qual se deseja modelar. A referência Yuvarajan et al. (2005) trata basicamente o mesmo assunto do trabalho comentado anteriormente. Porém, esclarece alguns pontos que são de difícil entendimento como: o equacionamento para determinação das resistências  $R_1$  e  $R_2$  do circuito eletrônico e um melhor esclarecimento sobre as variáveis dos modelos dos componentes na biblioteca do Pspice. Entretanto, este modelo não inclui em sua abordagem o efeito de partida ou *start-up* de uma CaC. De acordo com WU et al. (2006), Larminie e Dicks (2003) e Marquezini (2007), na operação dinâmica é necessário um período de operação a vazio da pilha, antes de inserir-se a carga. Devido à pilha apresentar correntes internas de

operação, precisa-se de um tempo razoável para iniciação propriamente dita do seu funcionamento nominal. Este tempo de iniciação pode levar, em uma pilha real, vários minutos e até mesmo horas. Mas isso é muito variável e específico de cada modelo de pilha.

Além disso, existem modelos passivos para células a combustível, os quais representam o seu funcionamento sem estar em operação. Também se tratam de circuitos que fazem uso de associações entre resistores e capacitores. Esses modelos passivos representam a resposta da pilha frente a estímulos elétricos externos Runtz et al. (2005 apud Larminie, 1994). No entanto, como o objetivo deste trabalho é o estudo da célula em operação, esses modelos passivos não serão abordados.

Neste trabalho é realizado um estudo sobre o modelo eletrônico de CaC, onde será realizada uma modificação do modelo original. Esta modificação trata da inclusão do efeito de partida de uma CaC em sua análise. Para validar o modelo eletrônico modificado os resultados alcançados são comparados com os resultados obtidos usando o modelo clássico para as mesmas pilhas. Ambos os conjuntos de resultados são comparados com dados reais fornecidos pelos fabricantes das mesmas (Avista Laboratories, 2000), (BCS technology, 2002). Marquezini (2007) apresenta a modelagem e simulação do modelo clássico para várias pilhas comerciais como Mark V, BCS de 500W e SR-12 de 500W. Nesta referência encontram-se dados reais dos fabricantes e curvas obtidas em simulações usando o programa Matlab. Os dados dessa referência são utilizados para efetuar a validação e comparação do modelo eletrônico modificado. No estudo de Yales (2006) também se encontram dados experimentais de testes de variação de carga, referentes à pilha SR-12 de 500W.

Nesta dissertação estuda-se detalhadamente o funcionamento das CaCs e todo equacionamento que envolve sua operação. Isso serve para um melhor entendimento e fornece bases para o estudo da eficiência das pilhas. Para avaliar a eficiência de uma pilha necessita-se realizar a automação e instalação de um protótipo que possibilite a obtenção de dados práticos, assim sendo, se faz necessária a observação de alguns conceitos importantes. Em primeiro lugar devem-se manter as grandezas de controle nas faixas de operação previamente determinadas pelo fabricante (Avista Laboratories, 2000).

Para que a pilha opere com alta eficiência a umidade da membrana deverá ser mantida dentro de uma faixa bastante restrita, algo em torno de 85% a 100% de umidade (Wu et al., 2006). Uma membrana muito seca eleva as perdas resistivas internas da pilha e uma membrana muito úmida dificulta a passagem dos gases.

Existem várias formas de se atuar sobre a umidade da CaC ( Larminie e Dicks, 2003 e Hirschenhofer, 2005). Um processo de umidificação comumente usado é a técnica de

umidificar os gases de entrada na célula, porém este método representa um alto custo adicional, além de ser complexa sua implementação. Pois a célula precisa estar bem hidratada, porém, sem acúmulo de gotículas de água sobre a membrana.

A técnica de controle da umidade utilizada neste trabalho é descrita por Larminie e Dicks (2003). Consiste, basicamente, no controle indireto da umidade, ou seja, através do controle da quantidade de ar de reação que entra na pilha. Porém, deve-se manter essa quantidade de ar entre limites mínimos e máximos para que a reação química ocorra adequadamente. Assim sendo, o monitoramento da umidade deve estar atrelado à razão estequiométrica. A razão estequiométrica, ou estequiometria é a relação entre a quantidade ar que está sendo injetado na pilha e o que realmente está sendo consumido. Segundo Larminie e Dicks (2003), a estequiometria deve ser sempre maior ou igual a dois.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da eficiência de uma CaC e a sua variação em relação a parâmetros externos de operação. Assim sendo, existe uma técnica de chaveamento em curto-circuito de cada CaC numa pilha que pode representar um aumento de até 5% no rendimento total. Este chaveamento ou *by-pass* consiste na aplicação de um curto-circuito entre o cátodo e o ânodo da CaC. Este aumento do desempenho é possível, pois este processo estabelece uma melhor umidificação na membrana. O chaveamento pode produzir água que umedece a membrana e diminui a resistência a passagem de íons positivos, aumentando assim, a eficiência da pilha. Também no caso de acúmulo de água sobre a membrana o curto-circuito pode distribuir essas gotículas uniformemente na membrana. As formas de aplicação deste chaveamento, juntamente com os circuitos eletrônicos e chaves eletrônicas utilizadas são apresentadas por Flugevand (2000, 2002) e Serpa (2004). Essas referências mostram que se podem realizar os curtos-circuitos de duas formas: primeiramente a chave é acionada desviando a corrente da pilha se a tensão da célula estiver a níveis muito baixos, o que indica uma falha na operação daquela célula. Uma segunda forma é estabelecer o *by-pass* ciclicamente a uma frequência pré-estabelecida.

Neste trabalho as duas formas são implementadas. O processo cíclico se faz mantendo-se a chave ligada durante 50ms e desligada durante vinte segundos e assim sucessivamente (Yap, 2007). Também foi variado o tempo do *by-pass*, em relação à Yap (2007), de modo a avaliar qual a sua influência na eficiência da CaC.

Os pontos mais relevantes deste trabalho foram mencionados nesta revisão, os capítulos que seguem farão uma abordagem mais detalhada de cada etapa, juntamente com os resultados e as conclusões obtidas.

## CAPÍTULO 3

# PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO E MODELAGEM DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

---

Este capítulo apresenta uma breve análise dos princípios físico-químicos das células a combustível e também discute as características de funcionamento das mesmas. Além disso, mostra um estudo das técnicas de modelagem citadas no Capítulo 2, juntamente com uma proposta de aprimoramento do modelo eletrônico existente.

### 3.1. Princípios teóricos de células a combustível

Nesta seção, são analisados de forma resumida as principais características de funcionamento das CaCs do tipo PEM e alguns fenômenos fundamentais envolvidos na sua operação.

#### 3.1.1. Tipos de células

Existem vários tipos de células a combustível, aqui classificadas segundo o tipo de eletrólito que utilizam e, conseqüentemente, por sua temperatura de operação.

No Quadro 3.1 estão representados os diferentes tipos de células a combustível, bem como suas características principais, temperatura de operação e aplicação prática. Atualmente, as células do tipo alcalina AFC (Alcalina) têm um papel importante em viagens espaciais, não apresentando muita aplicação terrestre, devido ao fato de poderem utilizar somente hidrogênio e oxigênio ultra puros. Além disso, funcionam a uma baixa temperatura de operação e necessitam de um processo relativamente complicado para a remoção da água do eletrólito. Entretanto, este tipo de células foi o precursor das células mais modernas.

Neste trabalho todo estudo é realizado usando-se a CaC do tipo PEM, que atualmente é a mais adequada e estudada para aplicações em veículos, unidades estacionárias e também com aplicação em geração distribuída.

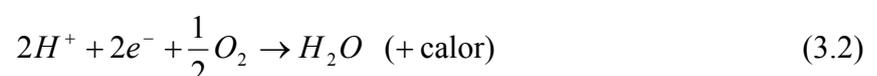
Quadro 3.1 - Tipos de células a combustível e suas características.

<i>Tipo/Característica</i>	<i>Íon móvel</i>	<i>Temperatura de operação</i>	<i>Aplicações</i>
<i>Membrana (PEM)</i>	$H^+$	30 - 100°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veículos automotivos;</li> <li>• Espaçonaves;</li> <li>• Unidades estacionárias.</li> </ul>
<i>Ácido fosfórico (PAFC)</i>	$H^+$	160 - 200°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW);</li> <li>• Cogeração, eletricidade/calor.</li> </ul>
<i>Carbonatos fundidos (MCFC)</i>	$CO_3^{2-}$	650 - 700°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias de 100 kW - 1MW;</li> <li>• Cogeração.</li> </ul>
<i>Alcalina (AFC)</i>	$OH^-$	60 - 90°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espaçonaves;</li> </ul>
<i>Cerâmicas (SOFC)</i>	$O^{2-}$	800 - 1000°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias de 10 kW a 1 MW;</li> <li>• Cogeração.</li> </ul>

Fonte: Larminie e Dicks (2003)

### 3.1.2. Funcionamento básico de uma CaC tipo PEM

As células a combustível do tipo PEM, produzem energia elétrica e calor como resultado de reações eletroquímicas de oxidação-redução que ocorrem entre o hidrogênio e o oxigênio. A estrutura básica de uma célula a combustível é mostrada na Figura 3.1, composta por dois eletrodos (anodo e catodo), separados por uma membrana sólida que atua como eletrólito. O combustível, neste caso o  $H_2$ , é introduzido pelo anodo onde é dissociado em prótons (íons positivos  $H^+$ ) e elétrons, de acordo com a Equação (3.1). Os íons positivos fluem através da membrana para o catodo enquanto que os elétrons circulam por um circuito elétrico externo formando um laço de corrente contínua. O oxidante (ar atmosférico ou  $O_2$ ) é introduzido no catodo onde reage com os elétrons provenientes do circuito externo e com os prótons que passam através da membrana. Esta reação resulta na formação de água, como se observa na Equação (3.2). A reação total inclui a formação de água, eletricidade e calor e é dada pela Equação (3.3) (Larminie e Dicks, 2003).



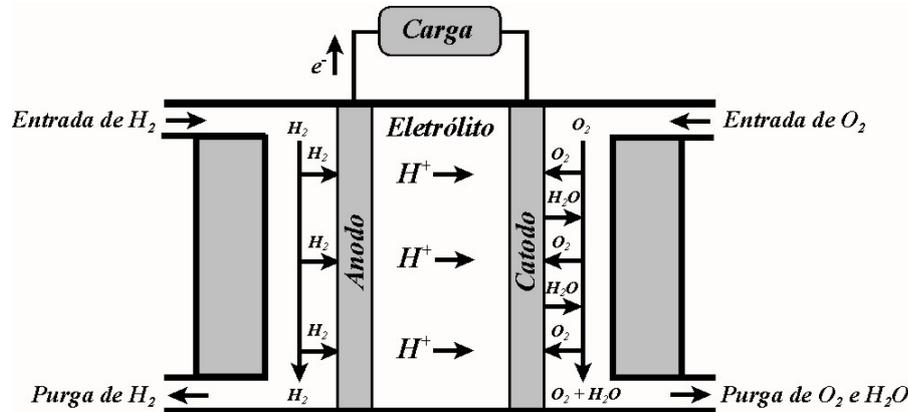
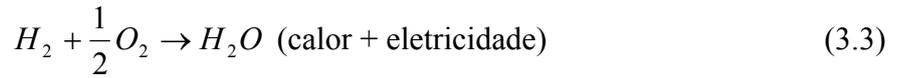


Figura 3.1 - Operação básica de uma CaC do tipo PEM.  
Zancan (2007)

### 3.2. Análise do equacionamento do modelo clássico

Nesta seção apresenta-se um resumo das principais equações para modelagem e simulação do modelo eletroquímico estático e do circuito elétrico equivalente para simulação dinâmica da CaC. Trata-se da modelagem clássica das células a combustível abordada pela grande maioria dos autores relacionados ao assunto.

De acordo com Chu et al. (2000) e Wang et al. (2005) existem três irreversibilidades principais na operação da CaC, que ocasionam uma diminuição na tensão de circuito aberto da pilha. Logo, considerando estas quedas, a tensão de saída de uma pilha ( $V_{CaC}$ ) segue a Equação (3.4) e é ilustrada pela Figura 3.2.

$$V_{CaC} = E_{Nernst} - V_{at} - V_{\text{ohmico}} - V_{con} \quad (3.4)$$

onde:

$E_{Nernst}$  : tensão de circuito aberto da célula ( $V$ );

$V_{at}$  : queda de tensão devido à ativação (ou polarização de ativação) ( $V$ );

$V_{\text{ohmico}}$  : queda de tensão ôhmica (ou polarização ôhmica) ( $V$ );

$V_{con}$  : queda de tensão devido à concentração (ou polarização da concentração) ( $V$ ).

O primeiro termo da Equação (3.4) representa a tensão de operação da célula sem carga, enquanto que os três últimos termos representam quedas de tensão resultando na tensão

útil de saída da célula, para uma determinada corrente de operação. Cada um dos termos da Equação (3.4) está explicado e modelado separadamente nas seções a seguir.

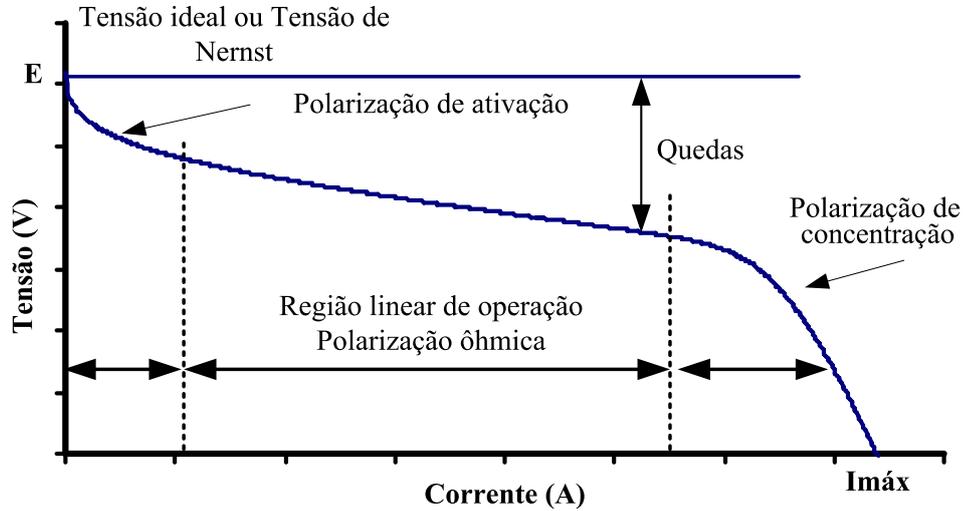


Figura 3.2 - Curva característica  $V \times I$  de polarização de uma CaC.

### 3.2.1. Tensão de Nernst

Para a reação química que ocorre na CaC, a mudança na energia livre de Gibbs é definida pela Equação (3.5).

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^o - R \cdot T \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (3.5)$$

onde:

$T$  : é a temperatura da célula (K) ;

$a$  : é a atividade dos reagentes;

$\Delta \bar{g}_f^o$  : é a mudança na energia de Gibbs de formação molar, na pressão padrão (100kPa) e na temperatura padrão (25°C) ( $J \cdot mol^{-1}$ );

$R$  : é a constante molar dos gases ( $8,314(J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1})$ ).

Através de deduções matemáticas, tem-se a tensão de circuito aberto ou equação de Nernst que pode ser escrita na forma da Equação (3.6).

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta \bar{g}_f^o}{2.F} - \frac{R \cdot T}{2.F} \cdot \ln \left( \frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (3.6)$$

Como água encontra-se no estado líquido e a temperatura é diferente da temperatura de referência (298,15K), é possível reescrever a Equação (3.6) obtendo-se a Equação (3.7).

$$E_{Nernst} = \frac{-\Delta\bar{g}_f^0}{2 \cdot F} + \frac{\Delta\bar{s}_f \cdot (T - T_{ref})}{2 \cdot F} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}) \quad (3.7)$$

onde:

$P$  : é pressão parcial dos gases correspondentes (*psi*);

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

Substituindo os valores padrões das variáveis tem-se a Equação (3.8), o que permite o cálculo da tensão de Nernst.

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \cdot \ln(P_{O_2}) \right] \quad (3.8)$$

### 3.2.2. Potencial de ativação

As perdas devidas ao potencial de ativação são causadas pela redução na velocidade das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos, dado pela Equação (3.9).

$$V_{at} = - \left[ \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{CaC}) \right] \quad (3.9)$$

onde:

$C_{O_2}$  : é a concentração de oxigênio no cátodo ( $mol / cm^3$ );

$\xi_{1,2,3,4}$  : são coeficientes que dependem de dados construtivos de cada pilha;

$I_{CaC}$  : é a corrente de operação da pilha ( $A$ );

A concentração efetiva de  $H_2$  no lado do ânodo do catalisador pode ser calculada pela concentração de hidrogênio na interface água/gás no ânodo. Este cálculo pode ser efetuado através da Equação (3.10). A concentração efetiva de  $O_2$  no lado do cátodo do catalisador pode ser calculada pela concentração de  $O_2$  na interface água/gás no cátodo. Este cálculo pode ser efetuado através da Equação (3.11).

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{5,08 \cdot 10^6 e^{-498/(T+273,15)}} \quad (3.10)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 e^{-498/(T+273,15)}} \quad (3.11)$$

Segundo Yuvarajan (2004, 2005), a queda por ativação também pode ser escrita na forma da Equação (3.12), conhecida como equação de Tafel.

$$V_{at} = A \cdot \ln \left( \frac{i}{i_o} \right) \quad (3.12)$$

onde:

$i$  : é a densidade de corrente da pilha ( $mA/cm^2$ );  
 $i_o$  : é a mudança na densidade de corrente, ou seja, valor da densidade de corrente em que a tensão começa a mover-se para zero ( $mA/cm^2$ ).

Para uma célula a combustível com dois elétrons transferidos por mol de  $H_2$ , a constante  $A$  é dada pela Equação (3.13).

$$A = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F} \quad (3.13)$$

onde:

$\alpha$  : é uma constante chamada de coeficiente de transferência;  
 $T$  : é a temperatura da pilha ( $^{\circ}C$ );  
 $F$  : é a constante de Faraday ( $96485(C \cdot mol^{-1})$ ).

### 3.2.3. Potencial ôhmico

As perdas devidas ao potencial ôhmico estão relacionadas à resistência ao fluxo de íons no eletrólito e aos elétrons no eletrodo. Pode-se dizer que essas perdas são aproximadamente lineares na região central da curva e são dadas pela equação (3.14).

$$V_{\text{ôhmico}} = I_{CaC} \cdot (R_M + R_C) \quad (3.14)$$

onde:

$R_M$ : resistência da membrana ( $\Omega$ );

$R_C$ : resistência dos contatos ( $\Omega$ ).

A resistência da membrana à passagem de íons é dada pela Equação (3.15).

$$R_M = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (3.15)$$

onde:

$l$ : espessura da membrana ( $cm$ );

$A_e$ : área ativa da célula ( $cm^2$ );

$\rho_M$ : resistividade da membrana ( $\Omega \cdot cm$ );

Para uma célula com membrana Nafion<sup>®</sup> sua resistividade é dada pela Equação (3.16).

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left[ 1 + 0,03 \cdot \left( \frac{I_{CaC}}{A_e} \right) + 0,062 \cdot \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_{CaC}}{A_e} \right)^{2,5} \right]}{\left[ \psi - 0,634 - 3 \cdot \left( \frac{I_{CaC}}{A_e} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4,18 \cdot \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (3.16)$$

onde:

$\psi$ : é um parâmetro característico do processo de construção da membrana;

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

### 3.2.4. Potencial de concentração

A queda por transporte de massa ou de concentração é devido à circulação dos gases através dos dutos presentes no interior da pilha, que afetam as concentrações de hidrogênio e oxigênio, o que, por sua vez, causa uma diminuição das pressões parciais destes gases. A polarização de concentração depende da corrente elétrica e é mais acentuada em correntes elevadas, como se observa na Figura 3.2. A equação que descreve este fenômeno pode ser escrita na forma da Equação (3.17).

$$V_{con} = -B \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3.17)$$

onde:

$B$  : constante que depende dos reagentes e seu estado de operação ( $V$ );

$J_{máx}$  : densidade máxima de corrente, que o combustível pode suprir ( $A/cm^2$ );

$J$  : densidade de corrente em que se quer calcular ( $A/cm^2$ );

De acordo com Yuvarajan (2004, 2005), pode-se representar a queda por concentração na forma da Equação (3.18).

$$V_{con} = V_s' - m \cdot I_m \cdot e^{n \cdot I_m} \quad (3.18)$$

onde:

$I_m$  e  $V_s'$ : são as coordenadas do ponto, na região de concentração, onde as características da tensão e da corrente começam a ser não-lineares ( $A$ ) e ( $V$ );

$m$  e  $n$ : são parâmetros de transferência de massa ( $m = 3 \cdot 10^{-5}(V)$ ) e ( $n = 8 \cdot 10^{-3}(cm^2 \cdot mA^{-1})$ ).

### 3.2.5. A camada dupla de carga

No momento em que houver uma variação de corrente na célula a combustível, ocorrerá uma variação na sua tensão operacional. Entretanto, esta variação não é instantânea, pois existe um regime transitório devido a um fenômeno bastante complexo quimicamente chamado de “efeito de camada dupla de carga da CaC”.

Resumidamente, este fenômeno envolve o acúmulo de cargas na superfície de dois materiais diferentes e eletricamente carregados. Na CaC ele está associado à interface eletrodo/eletrólito. Este fenômeno se comporta como a dinâmica de um capacitor.

O efeito capacitivo deste processo é representado no circuito elétrico da Figura 3.3 pelo capacitor  $C$ . Todas as resistências do circuito abaixo são variáveis e dependem de fenômenos eletroquímicos, como os já expostos em seções anteriores, o que torna o circuito mencionado bastante complexo de equacionar.

O atraso na recuperação da tensão de saída da CaC interfere na queda de polarização de ativação e por concentração, não afetando a polarização ôhmica. A resistência  $R_{ohm}$  representa as perdas ôhmicas. Os resistores  $R_{at}$  e  $R_{con}$  representam as perdas de ativação e de concentração, respectivamente. A resistência  $R_{eq}$  é equivalente à associação em série de  $R_{at}$  e  $R_{con}$ .

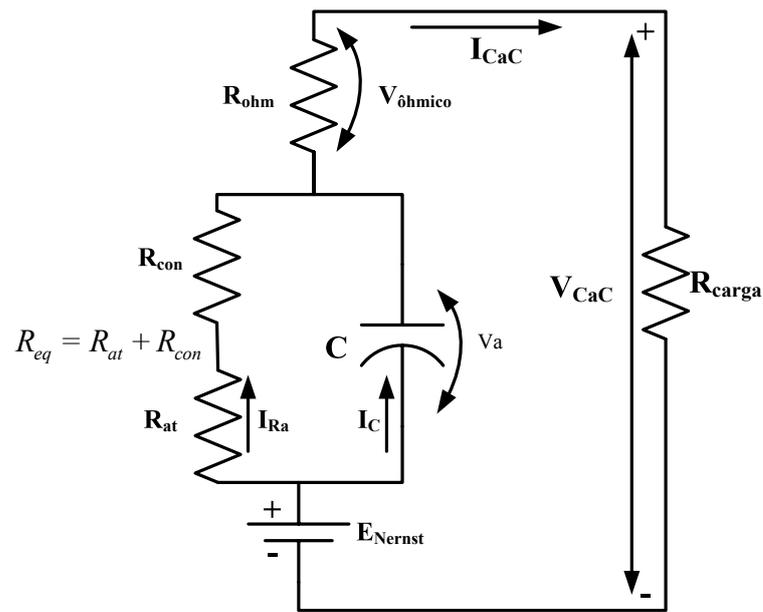


Figura 3.3 - Circuito elétrico equivalente.

Assim sendo, do circuito representado na Figura 3.3 este coeficiente pode ser calculado pela Equação (3.19).

$$\tau = C \cdot R_{eq} \quad (3.19)$$

onde:

$R_{eq}$  : resistência equivalente ( $\Omega$ );

$C$  : representa a capacitância equivalente ( $F$ ).

Um importante ponto no estudo de CaCs é a obtenção dos parâmetros internos das mesmas. Isso permite a aplicação desses parâmetros nos modelos teóricos dando-lhes uma maior precisão e confiabilidade. Para a obtenção experimental dos parâmetros encontram-se na literatura dois métodos de obtenção que são: método da impedância elétrica espectroscópica e método da interrupção de corrente.

O método da impedância elétrica espectroscópica define-se pela passagem de uma corrente alternada pela célula em uma frequência pré-estabelecida, a tensão é medida e a impedância calculada. Porém, como a capacitância da CaC é alta, na ordem de Farads, e a impedância é pequena, se faz necessário medidores e geradores de sinais especiais, colocados em série no circuito da célula com ela em funcionamento. As frequências que

deverão ser usadas experimentalmente para obter-se uma capacitância desta magnitude são muito baixas, da ordem de 10mHz (Larminie e Dicks, 2003).

Pela sua simplicidade, o método usado nesta dissertação é a interrupção de corrente e consiste no chaveamento de uma carga ligada a CaC que deverá estar em pleno funcionamento. Através de um osciloscópio obteve-se a curva da tensão, e assim aplicou-se uma técnica de cálculo numérico para obtenção dos parâmetros, detalhada por Farret e Simões (2006). A Figura 3.4 demonstra os parâmetros de uma pilha genérica e sua relação com a resposta dinâmica.

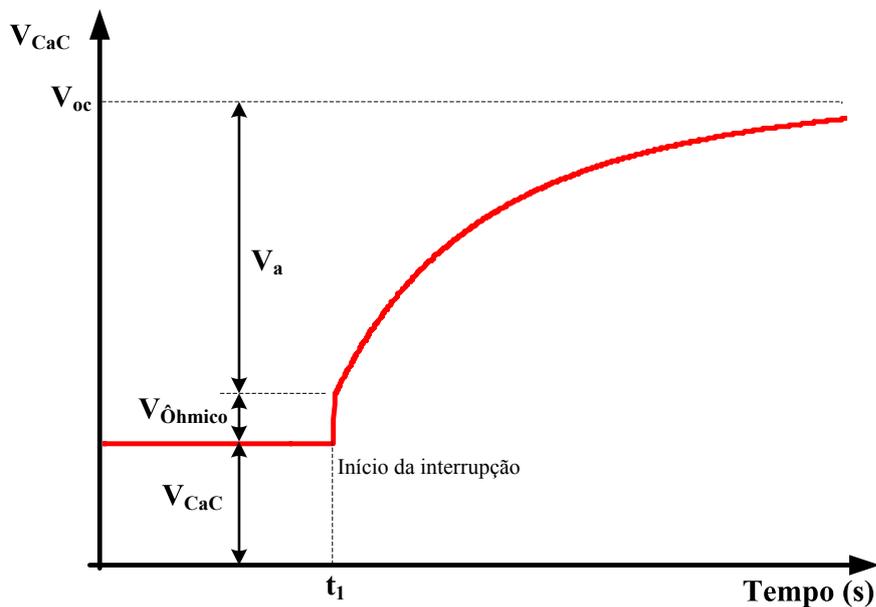


Figura 3.4 - Curva teórica dinâmica para obtenção de parâmetros da CaC.

Como se vê na figura 3.4, para variações súbitas de corrente a tensão de operação mostra uma mudança imediata, devido à queda ôhmica, seguida de uma resposta exponencial que aumenta até seu valor de equilíbrio final de estado permanente. Assim, através deste método é possível separar a queda de tensão ôhmica, e encontrar a resistência ôhmica  $R_{ohm}$ , da queda  $V_a$ . Todo detalhamento das equações e do método para obtenção dos parâmetros a partir do gráfico acima é exposto em Farret e Simões (2006).

### 3.3. Análise do modelo eletrônico de CaC

Geralmente, os modelos propostos para CaCs consistem em equações eletroquímicas não lineares o que os tornam bastantes complexos. Esses modelos são implementados,

normalmente, no programa Matlab-Simulink. O modelo usado nesta dissertação diferencia-se dos outros por tratar de uma modelagem eletrônica utilizando semicondutores, enquanto que os demais se baseiam em equações eletroquímicas que predizem o comportamento de uma pilha. As equações que governam os diferentes efeitos da curva característica de polarização são relacionadas às equações dos elementos presentes no circuito eletrônico que compõem o modelo.

### 3.3.1. Características do modelo eletrônico

A Figura 3.5 mostra o modelo no programa Pspice-Orcad do circuito eletrônico de uma célula a combustível proposto por (Yuvarajan, 2005; Yuvarajan, 2004 e Yu et al., 2004). A seguir é descrita de forma resumida a operação do modelo e a influência de cada um dos componentes. Nas referências acima citadas encontra-se a descrição detalhada deste equacionamento e o projeto dos componentes do circuito.

Na análise deste trabalho é incluída a partida ou *start-up* da CaC no modelo eletrônico. No modelo original esse fenômeno não é considerado e prevê apenas uma análise da pilha no seu funcionamento nominal após este transitório inicial.

Para modelar a polarização de ativação deve-se usar um diodo, pois a dinâmica interna deste assemelha-se ao fenômeno de ativação em uma célula a combustível. A semelhança pode ser vista comparando-se a Equação (3.12) com a Equação (3.20) característica de um diodo.

$$V_D = n_a \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right); V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (3.20)$$

onde:

$V_T$  : é a tensão térmica no diodo ( $V$ );

$V_D$  : é a tensão no diodo ( $V$ );

$I_D$  : é a corrente pelo diodo ( $A$ );

$n_a$  : é uma constante empírica entre 1 e 2;

$I_S$  : é a corrente de saturação reversa ( $A$ );

$k$  : é a constante de Boltzmann ( $1,3806 \cdot 10^{-23} (J \cdot K^{-1})$ );

$T$  : é a temperatura absoluta ( $K$ );

$q$  : é o carregamento eletrônico ( $C$ ).

Para se obter uma resposta adequada para o modelo devem-se editar alguns parâmetros internos do diodo. A melhor resposta da modelagem eletrônica é feita escolhendo-se valores satisfatórios para os seguintes parâmetros:  $I_S$  (corrente de saturação),  $N$  (coeficiente de emissão) e  $I_{SR}$  (recombinação da corrente). Esses valores devem ser recalculados para cada pilha, pois são específicos e dependem da dinâmica de cada CaC.

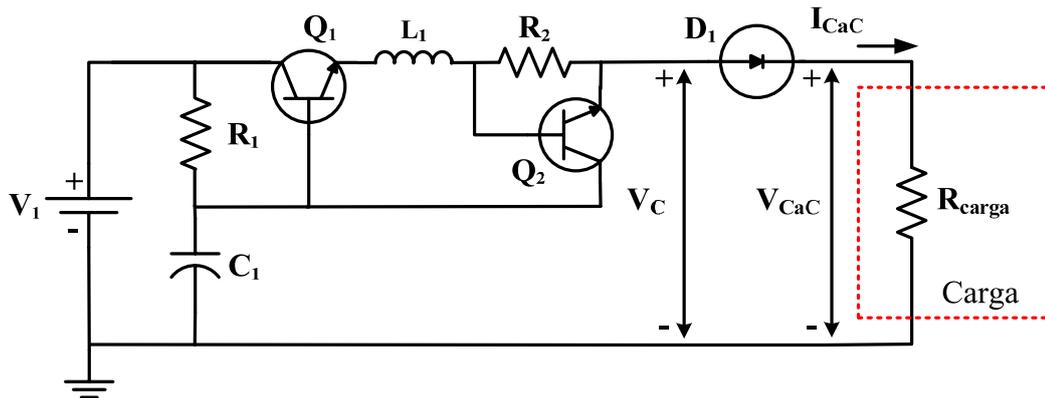


Figura 3.5 - Modelo eletrônico de CaC.

Para a polarização ôhmica usa-se a resistência parasita  $R_s$  presente no modelo interno do diodo. Assim, não é necessário um resistor extra para esse fim.

Para modelar a polarização do transporte de massa ou polarização de concentração é usado um circuito limitador da corrente. Na Figura 3.5, o circuito limitador da corrente é composto por dois transistores ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) e o resistor  $R_2$ . Quando a corrente por  $R_2$  ( $I_{CaC}$ ) excede certo limite estabelecido pelo valor da resistência e projetado com uso da curva de polarização fornecido pelo fabricante,  $Q_2$  começa a conduzir, reduzindo a tensão de base de  $Q_1$ . Como resultado, a tensão do emissor de  $Q_1$  (tensão de saída, mostrada na Equação (3.21)) diminui a uma taxa exponencial semelhante à Equação (3.18). Neste circuito,  $R_1$  e  $R_2$  referem-se à forma da característica estática na região de polarização de concentração da CaC. Para obter-se o funcionamento do circuito equivalente deve-se editar o arquivo de saída (*Netlist*) do Pspice, fazendo ficticiamente a área dos transistores 300 vezes maior, a fim de suportarem correntes elevadas.

$$V_c = V_1 - I_{CaC} \cdot R_2 - V_{BE} - R_1 \cdot I_{CS} \cdot e^{\frac{I_{CaC} \cdot R_2}{V_T}} \quad (3.21)$$

onde:

$I_{CS}$  : é a corrente entre coletor e base do transistor  $Q_2$  (A);

$V_{BE}$  : é a tensão entre base e emissor do transistor  $Q_2$  (V)

A equação final da saída de tensão do modelo é definida pela Equação (3.22).

$$V_{CaC} = \left( n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_D}{I_S} \right) \right) - \left( V_1 - I_{CaC} \cdot R_2 - V_{BE} - R_1 \cdot I_{CS} \cdot e^{\frac{I_{CaC} \cdot R_2}{V_T}} \right) - R_S \quad (3.22)$$

Em relação à resposta dinâmica, a camada dupla de carga se comporta como um capacitor. Assim, se a corrente varia subitamente, a tensão de operação leva algum tempo para chegar a seu valor de equilíbrio. Esta é a razão para o uso do capacitor  $C_1$  para modelar a capacitância da camada dupla de carga.

### 3.3.2. Proposta de aprimoramento do modelo eletrônico

Como o modelo proposto por Yuvarajan (2004, 2005) em sua análise não prevê o fenômeno de partida do funcionamento, este trabalho o inclui como segue. Na Figura 3.6 tem-se um esquema teórico da partida de uma CaC, onde a tensão em  $t=0$  segundos é igual a tensão de Nernst. Esta tensão vai decrescendo até atingir o equilíbrio. As medições devem ser realizadas após o tempo necessário para o equilíbrio, de modo a evitar medições erradas.

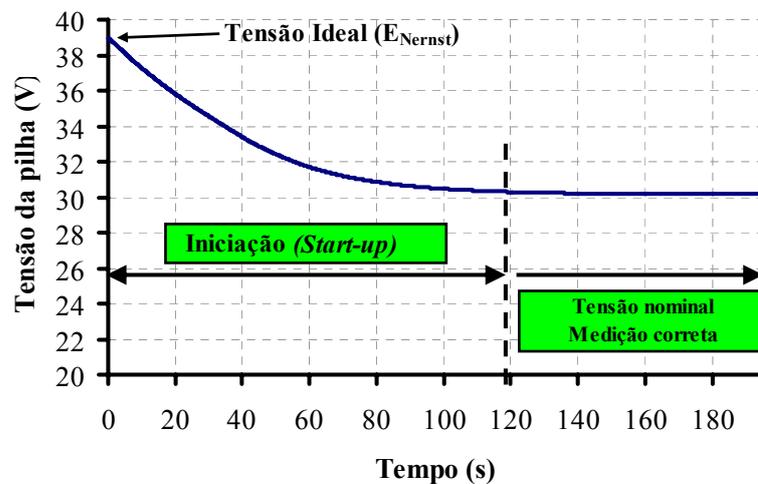


Figura 3.6 - Fenômeno de partida de uma CaC.

Para incluir a partida de uma pilha na análise desta modelagem, inclui-se o capacitor  $C_2$ , mostrado na Figura 3.7. Neste capacitor devem-se editar suas propriedades. A variável a ser modificada é IC (*Initial Conditions*), onde se edita o valor de tensão inicial ( $V_{inicial}$ ). O valor de  $V_{inicial}$  deve ser igual ao valor da tensão de Nernst obtido pela Equação (3.8). Assim tem-se a igualdade indicada pela Equação (3.23). Através de testes observou-se que o valor da capacitância  $C_2$  deve ter o mesmo valor da capacitância  $C_1$ , para cada pilha analisada. Assim o capacitor  $C_2$  não causará influência na resposta dos outros parâmetros simulados.

$$V_{inicial} = E_{Nernst} \quad (3.23)$$

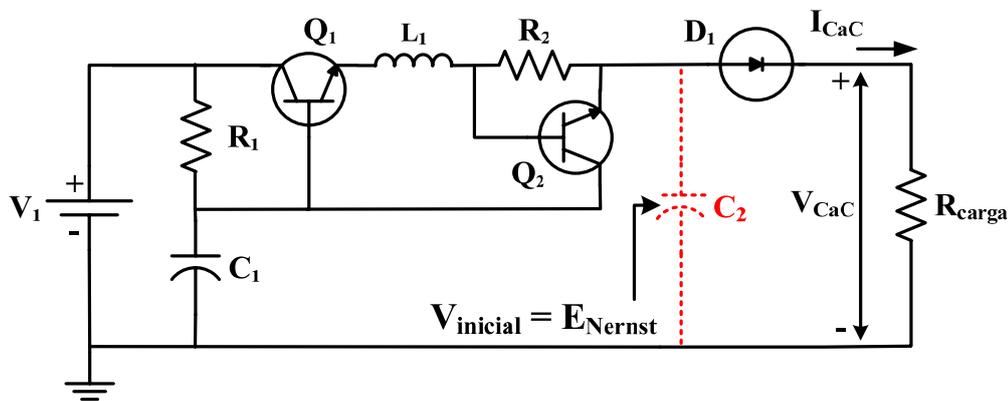


Figura 3.7 - Circuito elétrico completo com a introdução do efeito de partida.

### 3.4. Resultados das simulações com o modelo eletrônico

Os resultados usando o modelo eletrônico de CaC, a validação da modelagem e a modificação do modelo são comparados com dados experimentais. Para esta validação são modeladas duas pilhas comerciais: a pilha BCS de 500W da empresa BCS Technology e a SR-12 de 500W da empresa Avista. Avalia-se o comportamento destas pilhas frente a condições normalmente encontradas na prática, tais como variações de carga, transitórios de corrente e oscilações de potência nas condições de operação.

#### 3.4.1. Comparação com os dados experimentais da BCS de 500W

A curva de polarização da CaC representa sua tensão de saída em função da corrente de carga, em regime permanente. As figuras 3.8, 3.9 e 3.10 comparam os resultados usando o

modelo eletrônico modificado, com os resultados obtidos por Marquezini (2007) usando o modelo clássico de CaC e os dados experimentais fornecidos pela empresa BCS Technology (2002). O modelo clássico refere-se à modelagem através das equações eletroquímicas com o programa Matlab. Nota-se que o modelo eletrônico modificado possui uma melhor resposta comparando-se o modelo de Marquezini (2007) e os dados reais. Observa-se que para 30A a curva correspondente ao modelo clássico começa a cair um pouco antes do valor da curva experimental, tanto para a curva de polarização como para a curva da potência. Enquanto que a resposta do modelo eletrônico acompanha esses valores até os valores limites de operação da pilha. O rendimento médio está em torno de 45%. Logo, deve-se encontrar o ponto ótimo de operação da célula, levando-se em conta o rendimento, tensão de saída e potência máxima para alimentar a carga. Assim, não é indicado trabalhar com uma tensão muito elevada (rendimento elevado), pois a potência de saída seria muito reduzida. Também não é indicado trabalhar com uma corrente de saída muito elevada, pois neste caso a tensão de saída e o rendimento da célula seriam também muito reduzidos. Portanto, a melhor alternativa é estabelecer uma relação intermediária entre a demanda da carga e a potência fornecida pelo gerador.

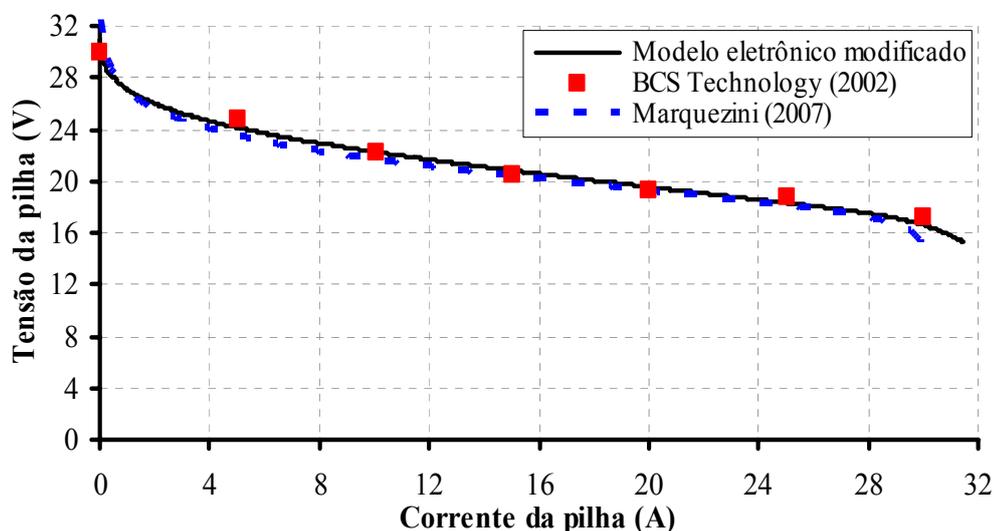


Figura 3.8 - Curva de polarização da pilha BCS de 500W.

A simulação dinâmica realizada neste trabalho consistiu na verificação da resposta da pilha para um chaveamento na carga. Um rápido transitório de corrente permite obter o comportamento dinâmico da pilha e assim avaliar as formas de onda de: tensão, rendimento e potência elétrica.

Na Figura 3.11, observa-se uma ótima concordância entre os resultados da simulação do modelo eletrônico modificado, e os resultados obtidos por Marquezini (2007), utilizando o modelo clássico. Também, comparam-se essas duas curvas com dados do modelo eletrônico proposto por Yuvarajan (2004), o qual não possui o efeito de partida das pilhas de células.

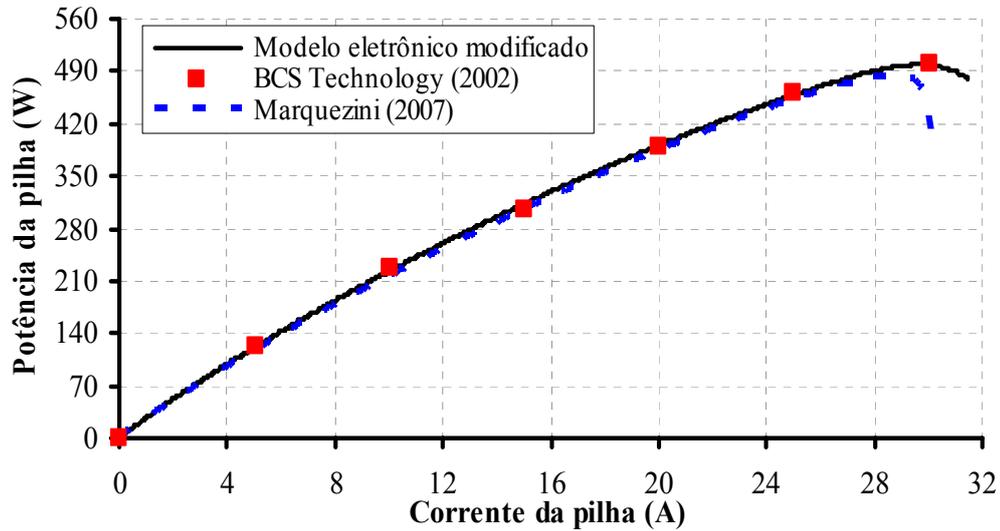


Figura 3.9 - Potência da pilha BCS de 500W.

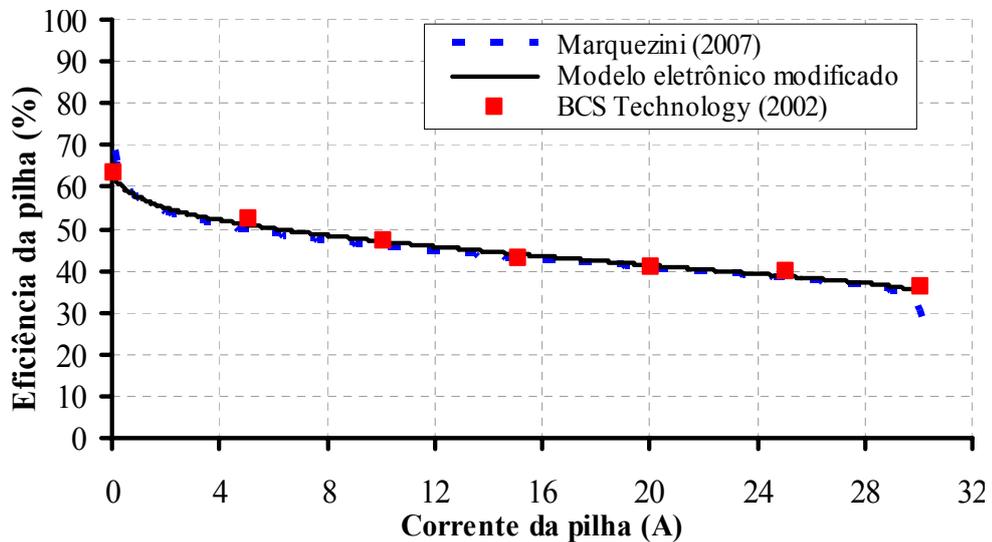


Figura 3.10 - Rendimento da pilha BCS de 500W.

Quando se insere carga com uma corrente fixa de 15A, Figura 3.12, observa-se uma diminuição rápida na tensão devido à polarização ôhmica, seguida de uma resposta rápida de primeira ordem atingindo o estado permanente (equilíbrio) em aproximadamente 20V. No instante de 325 segundos, onde a corrente é retirada, a tensão apresenta um comportamento de primeira ordem.

Na Figura 3.13 pode-se observar que a potência simulada para o instante de inserção de carga possui um pico de potência na pilha. Este pico chega a 98% superior do valor nominal de funcionamento. O rendimento pode ser observado na Figura 3.14. Existe uma boa relação entre os dados comparados, para o rendimento da ordem de 40,9 % se a célula está sob uma corrente de 15A (região linear de operação).

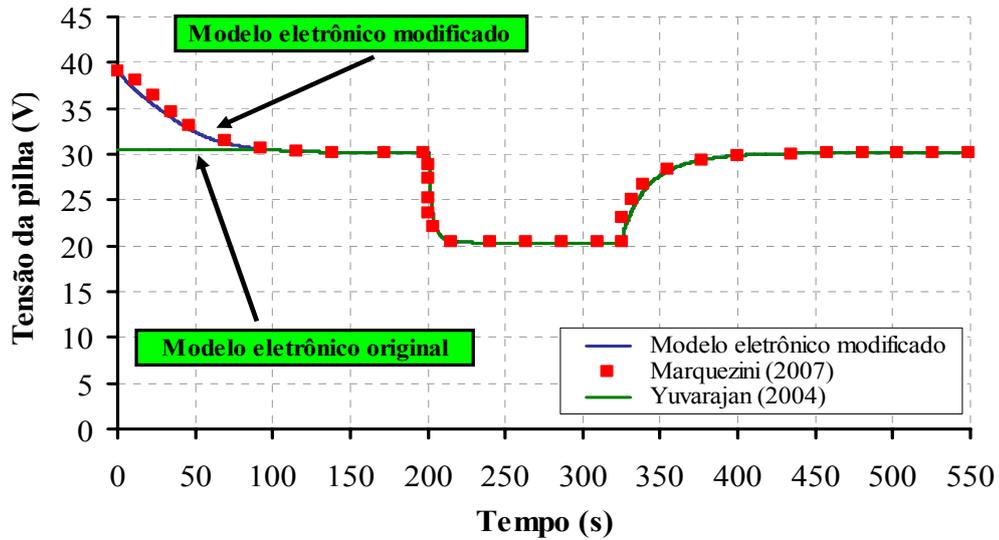


Figura 3.11 - Resposta de tensão da pilha para um degrau de corrente.

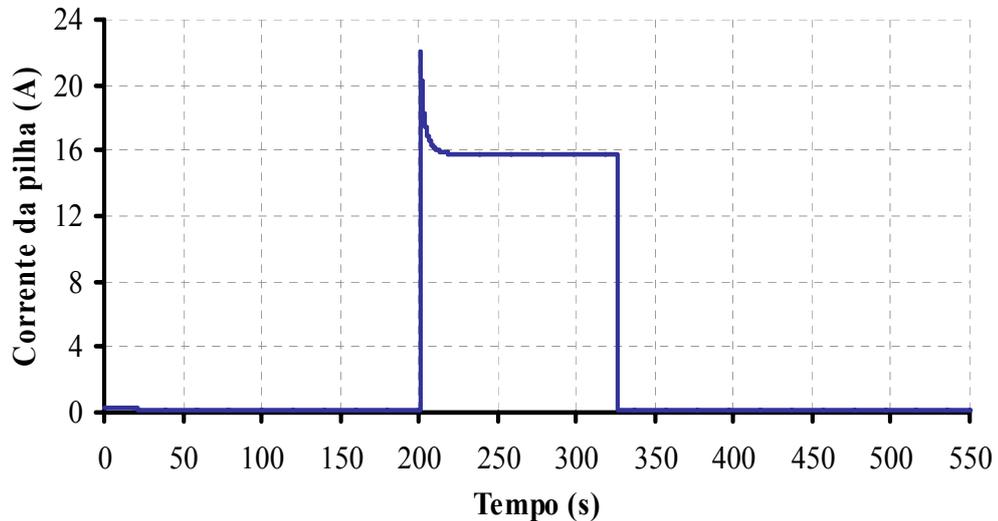


Figura 3.12 - Variação na corrente para simulação dinâmica.

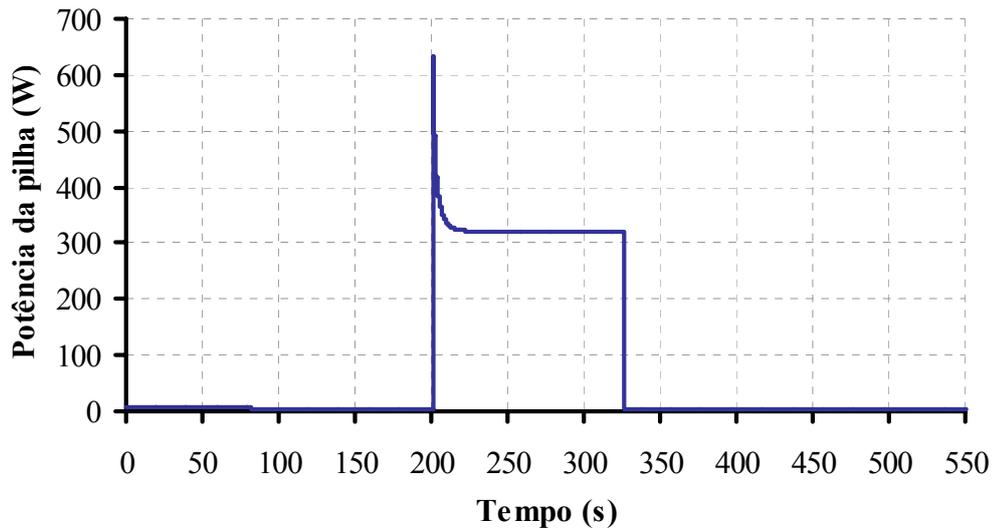


Figura 3.13 - Potência para um degrau de corrente.

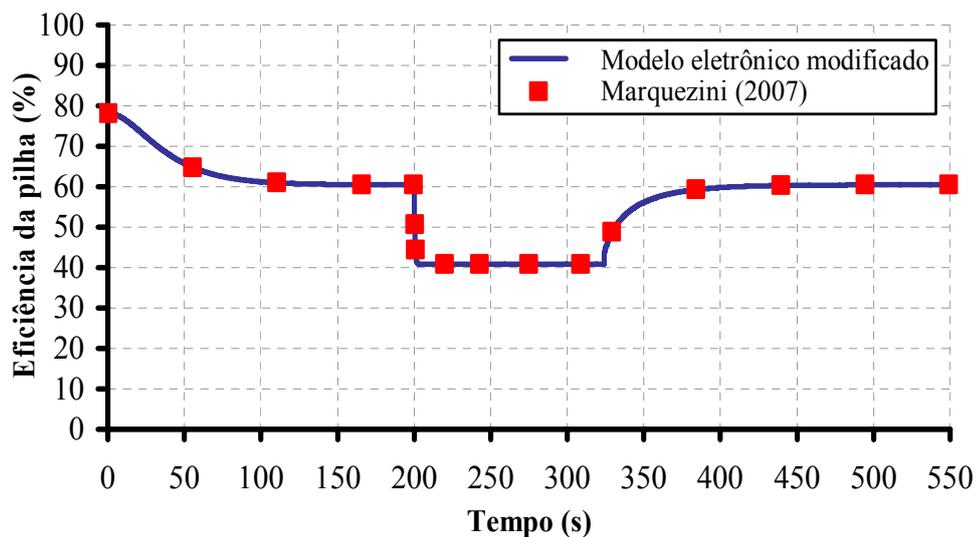


Figura 3.14 - Rendimento na pilha para um degrau de corrente.

### 3.4.2. Comparação com os dados experimentais da SR-12 de 500W

O módulo SR-12 é produzido pela empresa Avista (Avista Laboratories, 2000), a qual fornece dados experimentais e especificações técnicas que foram utilizados na modelagem feita neste trabalho. A Figura 3.15 representa a curva de polarização da SR-12, onde pode notar-se uma boa concordância entre a modelagem eletrônica e os dados reais fornecidos pelo fabricante. Um ponto importante a ser destacado é que no início da curva, a tensão não diminui, pois essa pilha possui uma baixa queda de ativação, detalhe característico da SR-12. A potência apresenta uma boa resposta entre os dados experimentais e o modelo eletrônico modificado, Figura 3.16. Na simulação dinâmica a corrente na pilha é variada subitamente,

notando-se que ela apresenta um pico no momento da inserção, que atinge 22A e logo após estabiliza num valor em torno de 14,4A. Observa-se uma boa concordância entre os valores simulados neste trabalho e os resultados experimentais de Yales (2006), mostrados na Figura 3.17. No instante em que há inserção de uma carga com corrente maior, há uma diminuição instantânea na tensão devido à polarização ôhmica, seguida de uma resposta rápida de primeira ordem que tende a atingir um ponto de equilíbrio, em torno de 26,4V. Após a carga ser retirada, a tensão também apresenta uma resposta de primeira ordem. Observa-se também uma boa concordância entre os valores simulados neste trabalho e os resultados experimentais de Yales (2006), mostrados na Figura 3.18, exceto para valores no final da curva onde o modelo apresenta um pequeno erro com relação aos valores desta tensão.

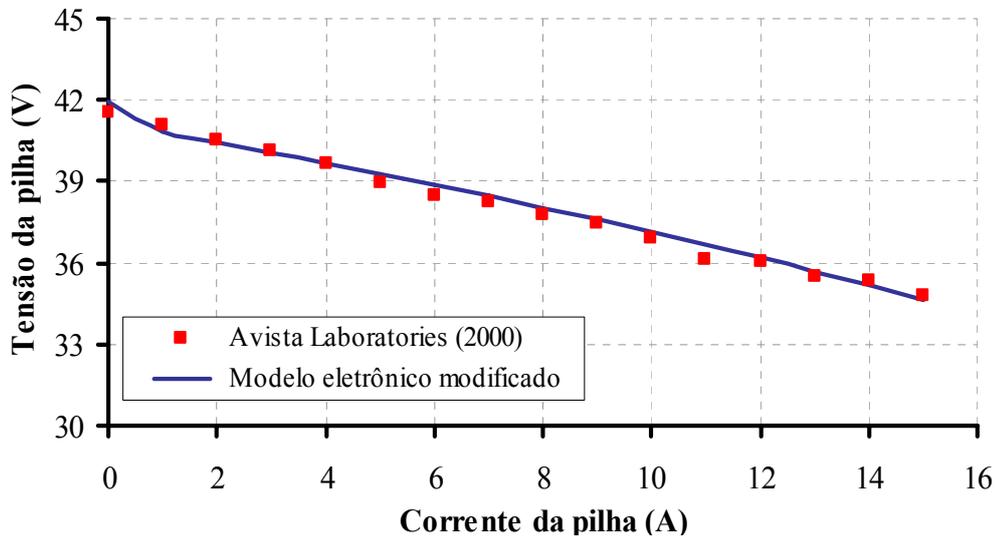


Figura 3.15 - Curva característica de polarização.

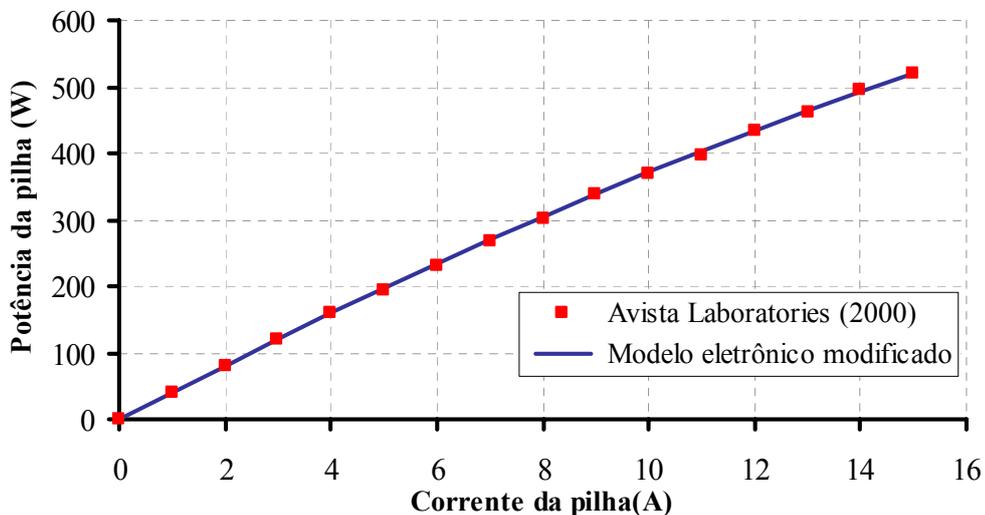


Figura 3.16 - Potência da pilha SR-12.

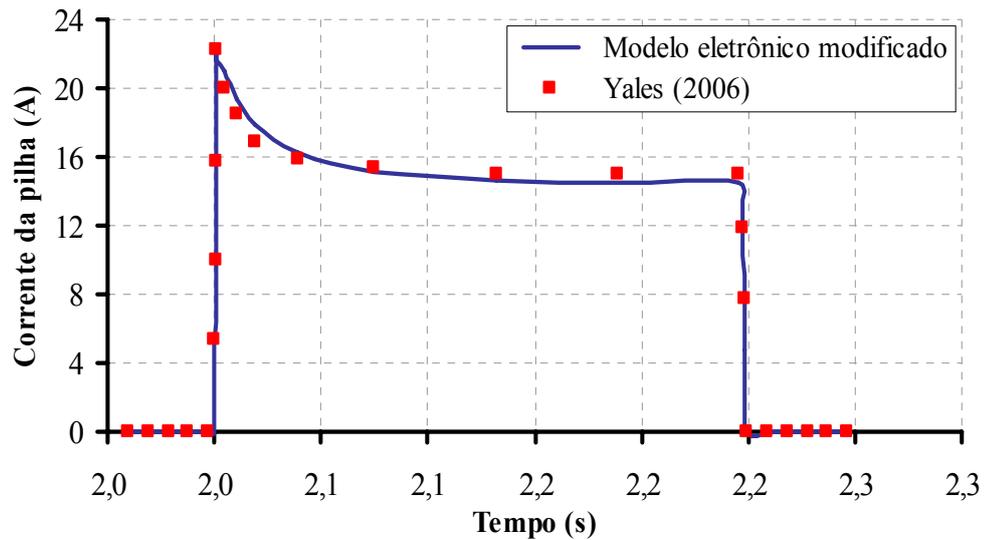


Figura 3.17 - Corrente em degrau para simulação dinâmica.

Uma importante informação é obtida na Figura 3.19 onde o pico de potência é de 836W, no instante da inserção de carga, sendo 148 % maior que o valor nominal. Mais uma vez, observa-se uma boa concordância entre os valores simulados neste trabalho e os resultados experimentais de Yales (2006). No entanto, nota-se que existe um pequeno erro de valores no modelo eletrônico, mas que não interfere nos tempos característicos de operação da pilha.

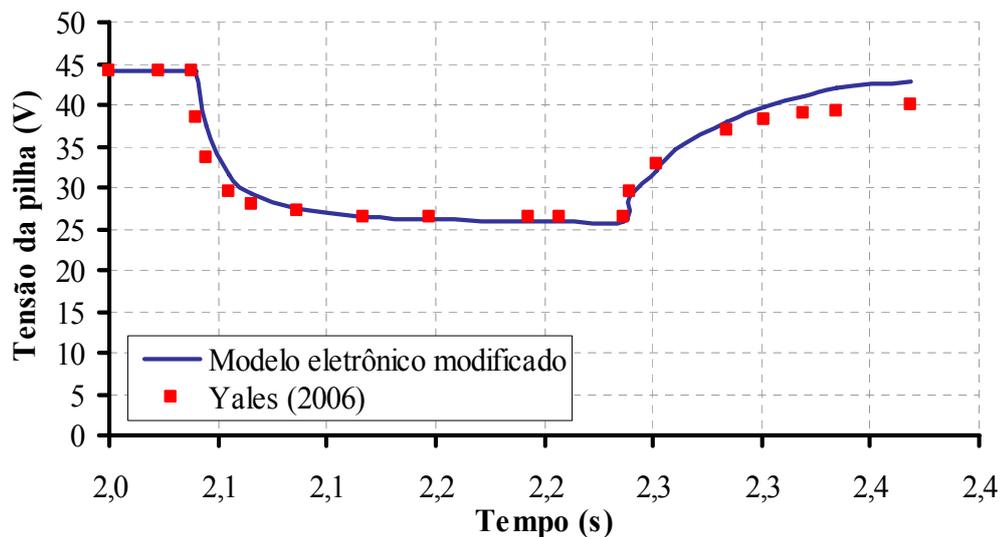


Figura 3.18 - Tensão para um degrau de corrente.

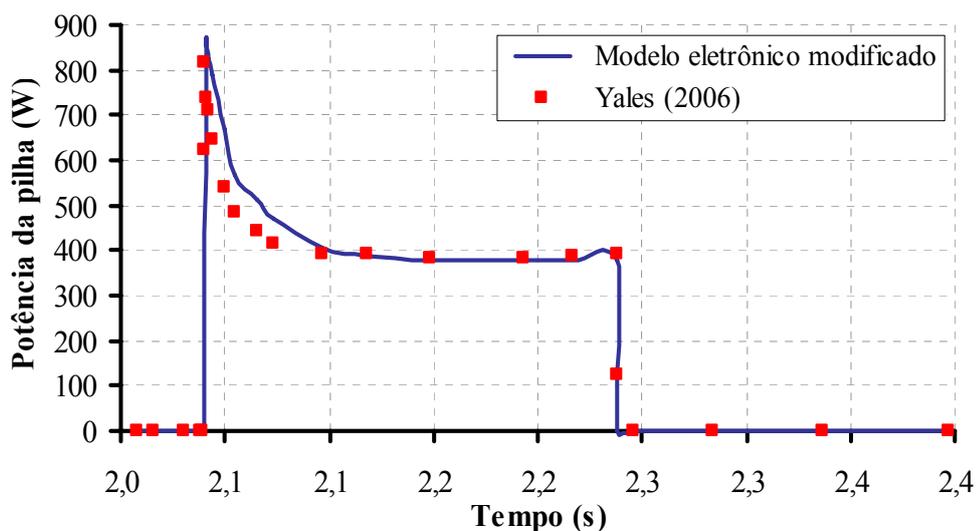


Figura 3.19 - Potência para um degrau de corrente.

### 3.5. Resumo do capítulo

Para a modelagem de pilhas de células a combustível do tipo PEM, descrito neste capítulo, foram considerados os principais fenômenos envolvidos na operação das células.

Conforme a teoria encontrada na literatura constatou-se que, muitos parâmetros usados na modelagem são obtidos de informações tanto analíticas quanto semi-empíricas. Frequentemente, verifica-se a existência de variáveis de difícil determinação experimental, sendo necessário o uso de técnicas estatísticas e empíricas para seu cálculo. Fazendo-se uma comparação, no modelo clássico, esses parâmetros semi-empíricos são os épsilons ( $\xi$ ), já explicados anteriormente, enquanto que no modelo eletrônico esses parâmetros são as variáveis do modelo do diodo e do transistor, presentes no arquivo do componente na biblioteca do Pspice.

Para a modelagem das pilhas BCS e SR-12 o circuito elétrico original proposto por Yuvarajan, no qual se baseou este trabalho, foi aprimorado introduzindo-se o fenômeno da partida ou *start-up* presente nos testes com pilhas reais. Os tempos de partida para a simulação eletrônica estão de acordo com os tempos de iniciação para o modelo clássico e também com os valores estipulados pelos fabricantes. Esse tempo de espera até a tensão de saída da pilha chegar ao seu ponto de equilíbrio é bastante importante em testes reais, de modo a não cometer-se erros em possíveis leituras dos valores de saída. Em pilhas reais esse tempo de iniciação pode levar de minutos até horas, dependendo das características construtivas de cada pilha.

## CAPÍTULO 4

### **INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA PILHA**

---

Para garantir que a pilha opere com uma boa eficiência, sem danos a sua estrutura interna, e que as reações eletroquímicas discutidas nos capítulos anteriores se processem de forma satisfatória, deve-se garantir algumas condições de operação. Para isso, é necessário monitorar algumas variáveis das células como:

- ⇒ Umidade da membrana;
- ⇒ Temperatura da pilha;
- ⇒ Fornecimento de hidrogênio;
- ⇒ Fornecimento de oxigênio;
- ⇒ Pressão do hidrogênio;
- ⇒ Tensão individual de cada célula;
- ⇒ Corrente da pilha;
- ⇒ Potência média;
- ⇒ Desempenho ou rendimento da pilha com a atuação do circuito *by-pass*.

Todas essas variáveis são monitoradas através de sensores colocados no sistema construído. Os sinais desses sensores são condicionados através de placas eletrônicas, que devem adequá-los para serem adquiridos por uma placa de aquisição ligada a um microcomputador. A forma como foi construído o protótipo e o sistema de monitoramento e acionamento é ilustrada na Figura 4.1.

A célula empregada neste trabalho é um cartucho de 10W que faz parte do módulo comercial SR-12 de 500W, fabricado pela empresa Avista Laboratories. A escolha do ponto ótimo de operação da pilha, de acordo com a curva característica de cada CaC, mostrada no Capítulo 3, é de grande importância na sua operação prática. Assim sendo, este assunto foi incluído no decorrer deste trabalho.

A seguir é apresentada de forma detalhada a instrumentação eletrônica utilizada para o monitoramento de cada variável da pilha, juntamente com os fluxogramas da lógica de acionamento e controle de cada componente.

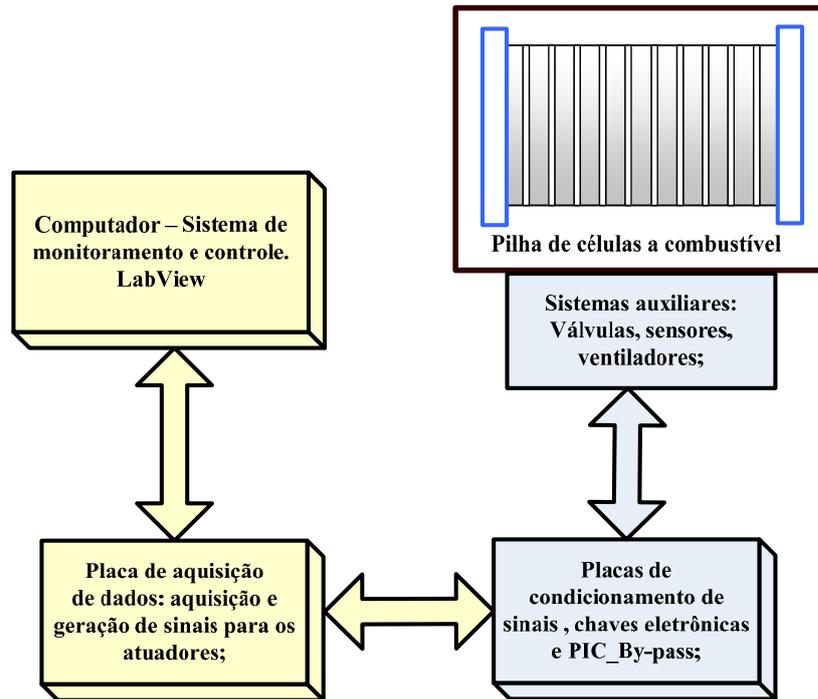


Figura 4.2 - Esquema de monitoramento da pilha.

## 4.1. Instalação e fornecimento de hidrogênio

### 4.1.1 Instalações da canalização de hidrogênio

O laboratório do Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente (CEEMA) possui duas salas dedicadas a trabalhos com  $H_2$ . Uma sala externa e isolada ao laboratório abriga o cilindro de hidrogênio, as válvulas de segurança, uma válvula solenóide, válvulas de redução de pressão e uma purga para o exterior da sala (ar livre), a qual serve para limpeza dos dutos, como ilustrado na Figura 4.2. Essa limpeza é realizada pela passagem do gás  $N_2$  nos dutos e é realizada periodicamente a fim de evitar que impurezas contaminem a membrana da CaC. Uma outra sala interna ao laboratório contém a pilha, os engates de saída do duto de hidrogênio e os dispositivos auxiliares, onde é realizado todo trabalho com a CaC. Um exaustor no teto da sala pressuriza-a negativamente, ou seja, não há acúmulo de  $H_2$  no seu interior pela força de saída do ar, facilitando a entrada de ar do ambiente externo, como se pode observar na Figura 4.3. Como o hidrogênio possui menor densidade que o ar, ele tende a se depositar nas partes superiores. Assim sendo, o sistema de evacuação do ar usado na sala garante, de forma satisfatória, o não acúmulo de níveis considerados perigosos e que potencialmente poderiam causar explosões.

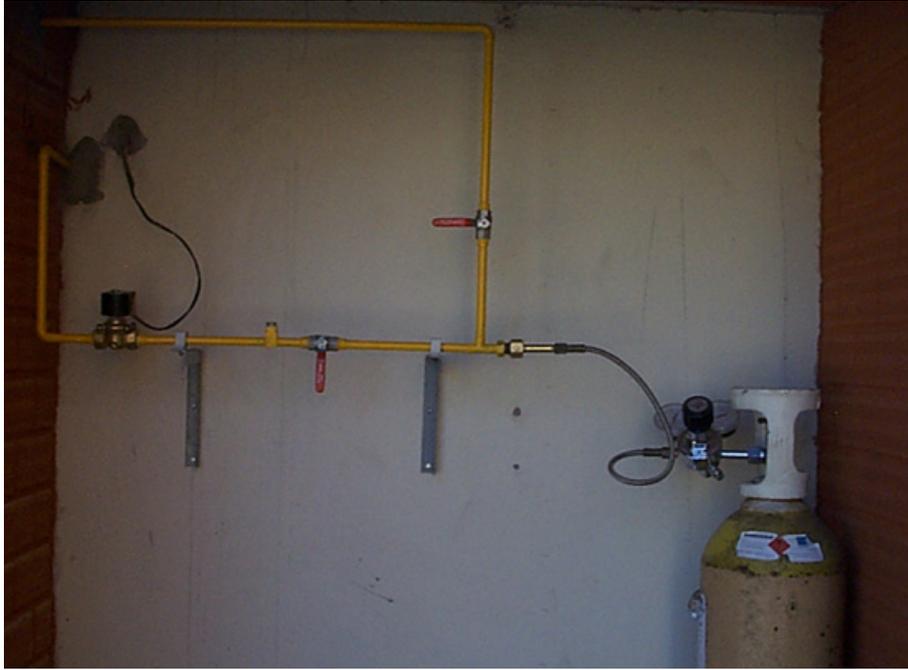


Figura 4.3 - Sala externa do hidrogênio.

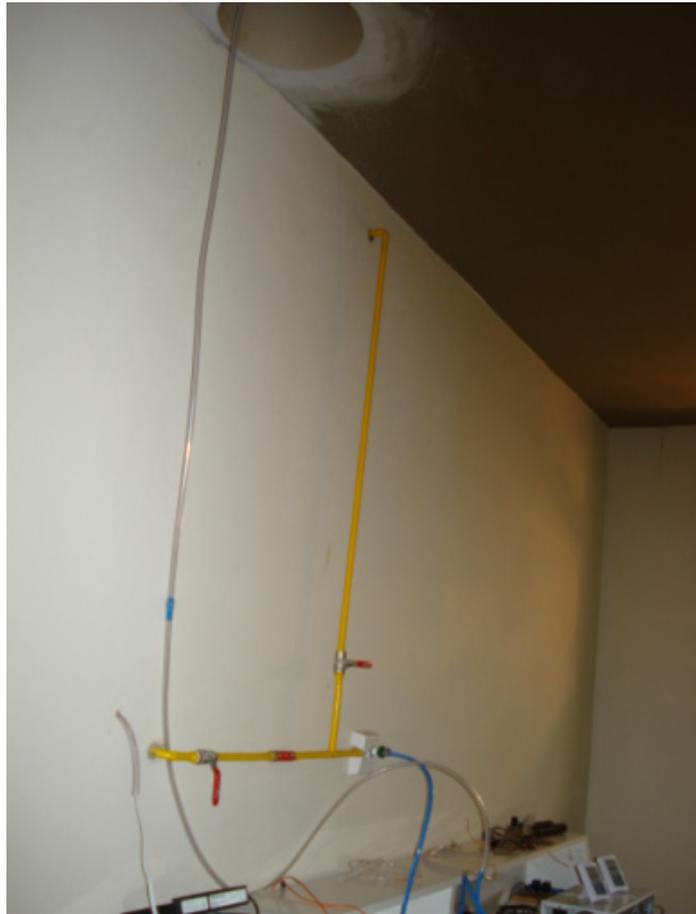


Figura 4.4 - Canalização interna.

A válvula redutora de pressão reduz a pressão de armazenagem de hidrogênio do cilindro, que é de  $125 \text{ kgf/cm}^2$  (igual a  $1778,85 \text{ psi}$ ) para uma escala de 0 a 20 psi. A pressão padrão de operação do cartucho em estudo é de 6,5 a 7,5 psi. Os dutos também possuem duas válvulas esfera para o fechamento rápido, estas válvulas permitem o fechamento da vazão para o interior da sala e o direcionamento do fluxo de hidrogênio para a purga externa. A sala interna contém duas válvulas esfera, uma para fechamento local do  $H_2$  e outra para abertura da purga externa e liberação da pressão interna dos dutos. Também possui uma válvula “corta fogo”, que evita o retorno de possíveis chamas para a sala externa e, por fim, os engates de saída da canalização para conexão da célula.

As mangueiras usadas entre a saída de hidrogênio e a pilha são do material tygon, cujas propriedades químicas não permitem a passagem de hidrogênio através de suas paredes, o que aconteceria com o uso de mangueiras convencionais. A tubulação é confeccionada com tubos de cobre soldados em prata para garantir a boa vedação ao gás.

#### 4.1.2. Controle eletrônico da entrada de hidrogênio

Para o controle eletrônico da abertura do gás foi instalada na sala externa uma válvula solenóide modelo Parker, duas vias e normalmente fechada. Para ligar e desligar a válvula solenóide usa-se um relé modelo MS12-10 com tensão de alimentação em 12V. A válvula solenóide é alimentada em 220V. A Figura 4.4 mostra o circuito eletrônico construído.

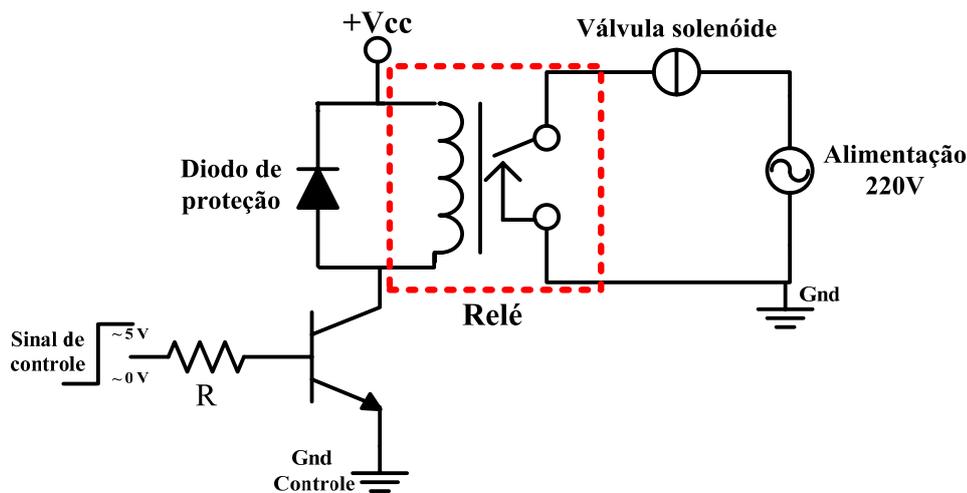


Figura 4.5 - Circuito de acionamento da válvula solenóide.

O sinal de controle da válvula é obtido através de uma das saídas digitais da placa de aquisição de dados. O programa de monitoramento e controle em Labview envia um sinal de

abertura da válvula para o relé sempre que o programa for acionado e envia um sinal de fechamento sempre que algum problema for detectado, ou o acionamento do programa for interrompido. Então, se o programa detectar a falha de algum dos principais sensores, e também, se a lógica de controle do funcionamento da CaC estiver fora de padrões pré-estabelecidos, o programa interromperá o fluxo de  $H_2$ . Isso evita danos à pilha e protege os usuários contra possíveis acidentes.

#### 4.1.3. Controle do fluxo de hidrogênio

Segundo Larminie e Dicks (2003), a taxa de entrada (fluxo) de combustível ( $H_2$ ) requerida por uma CaC é proporcional a corrente ou potência de operação da pilha, ou seja, ela consome mais ou menos gás de acordo com a variação da corrente. Portanto, não é recomendado o uso de uma válvula com controle ativo de fluxo para este fim, devido ao seu alto custo e também por contribuir pouco para a eficiência da pilha. Com isso, é suficiente o uso de um regulador simples de pressão, o qual deve mantê-la nos níveis fixos estabelecidos pelo fabricante. O regulador de pressão utilizado foi um regulador de duplo estágio, tipo diafragma com escala em psi.

#### 4.1.4. Medição da pressão do hidrogênio

De acordo com Avista Laboratories (2000), a pressão do cilindro deve ser ajustada entre 11 a 13 psi, e a pressão da linha (canalização) deve estar entre 6,5 a 7,5 psi. Assim, para haver uma precisão na medição, deve-se colocar um sensor de pressão no duto de  $H_2$  próximo a entrada da CaC. Os dados de pressão foram coletados por meio de um sensor do fabricante Freescale, modelo MPX2102G, com resolução de 0,0 a 14,5 psi. O sensor, o método de calibração, o circuito eletrônico de tratamento do sinal e as curvas de calibração são apresentados no Apêndice B.

#### 4.1.5. Hidrogênio usado por uma célula

A taxa de fornecimento/consumo de  $H_2$  é mostrada pela Equação (4.1). Essa equação é usada no programa Labview para estimar o consumo de hidrogênio e obter o consumo em cada região de operação da CaC.

$$H_2 \text{ usado} = 1,05 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_C} \text{ (kg/s)} \quad (4.1)$$

onde:

$P_{CaC}$  : é a potência da pilha (W);

$V_C$  : é a tensão de uma única célula, sendo igual a 0,65V.

## 4.2. Monitoramento e controle da temperatura da pilha

### 4.2.1. Temperatura da pilha

O monitoramento e controle da temperatura da pilha é um ponto muito importante em qualquer sistema envolvendo CaC, pois a temperatura da célula está diretamente relacionada com a tensão de saída, ou seja, a eficiência da pilha (Barbir, 2005). Além disso, está relacionada com a vida útil da membrana.

De acordo com Choi (2006), Wang (2005) e Avista Laboratories (2000), para o controle de temperatura do cartucho SR-12 deve-se manter a mesma na faixa de 5 a 35°C, de modo a obter-se a eficiência esperada.

Para manter a CaC operando dentro dos limites de temperatura é utilizado um ventilador (*cooler*) modelo Avante Garde 0,12A/12V. Este ventilador é controlado por um sinal modulado por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) gerado no programa Labview. Este sinal aciona uma chave eletrônica que varia a tensão no ventilador, com ganho proporcional à variação da temperatura. Assim, tem-se uma faixa de variação da tensão entre 0 a 12V sobre o ventilador. A chave eletrônica utilizada para o acionamento é um Mosfet (modelo IRFZ44), cujo sinal de controle advindo da placa de aquisição (Labview) é isolado por um opto-acoplador (modelo TLP – 521-2).

### 4.2.2. Medição da temperatura da membrana

O sistema de medição de temperatura consiste de quatro sensores do tipo termopar introduzido nas cavidades laterais do cartucho. Esses termopares realizam a medição do ar interno da pilha, aumentando assim, a confiabilidade dos valores medidos. Como a amplitude e a variação dos sinais dos termopares usados são bastante pequenas, na ordem de 0 a 5mV para uma variação de temperatura de 0 a 100°C, necessita-se de placas de amplificação dos sinais e também de filtragem destes sinais. Devido à dificuldade de encontrarem-se

termopares industriais que se adequassem aos propósitos deste trabalho, esses termopares foram construídos no CEEMA. No Apêndice A encontra-se todo o procedimento de construção dos termopares, do projeto e confecção das placas eletrônicas de condicionamento dos sinais e as curvas de calibração. Também são apresentadas equações de ajuste das curvas reais que foram usadas no programa Labview.

Um outro sensor usado foi colocado na entrada do ar de reação, tratando-se de um sensor duplo que mede umidade e temperatura. O sensor é o RHT-DM da Novus Eletrônicos LTDA. Este sensor tem a saída em corrente, ou seja, fornece uma corrente de 0 a 20mA correspondente a uma temperatura entre 0 e 100°C e uma umidade relativa de 0 a 100%. Como a placa de aquisição tem suas entradas dadas em tensão converteu-se o sinal de corrente para tensão com uso de um circuito resistivo. Pode-se observar no Apêndice C o esquema de ligação do sensor, a calibração, juntamente com as equações de ajuste.

#### 4.2.3. Fluxograma de controle da temperatura

O monitoramento e controle da temperatura da pilha são explicados com a ajuda do fluxograma mostrado na Figura 4.5. Para acionamento do programa, primeiramente é ligado o ventilador a uma largura de pulso (PWM) intermediária (*duty cycle* em torno de 50%). Após a leitura dos sensores de temperatura ocorre uma avaliação de falhas desses sensores. Esta avaliação consiste em verificar se a leitura de cada sensor está de acordo com a faixa de operação previamente projetada para cada um deles. A partir dessas leituras o programa varia a velocidade do ventilador, controlando a largura de pulso do sinal (PWM). O controle tentará manter a temperatura entre os limites de 5 a 35°C. Assim, se a temperatura estiver abaixo de 10°C o ventilador estará praticamente inoperante, e se a temperatura estiver em níveis acima de 30°C o ventilador estará próximo de sua velocidade máxima. Contudo, acima de 40°C é acusado erro e todo o sistema é desligado.

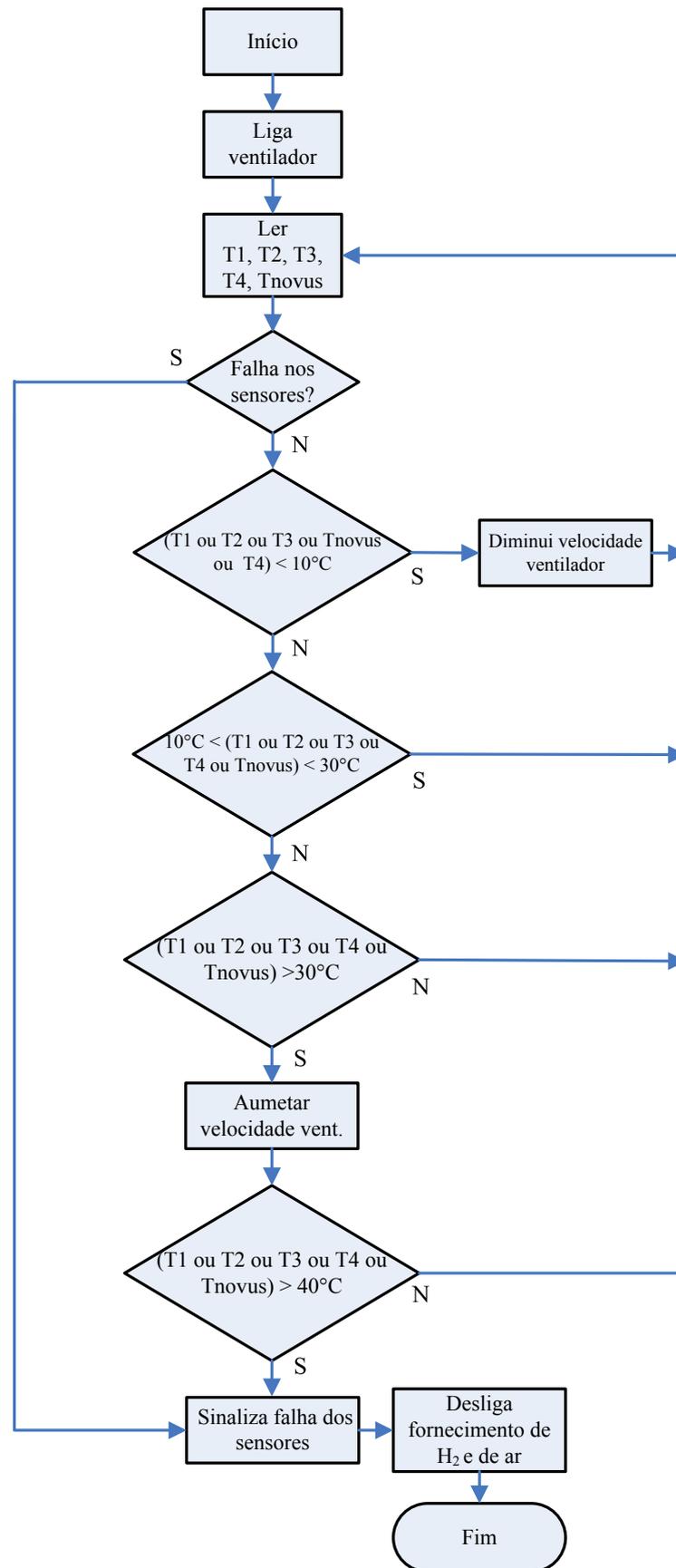


Figura 4.6 - Fluxograma de controle da temperatura.

#### 4.2.4. Produção de água e calor

Em uma CaC, a taxa de produção de água é dada por um mol para cada dois elétrons. A Equação (4.2) mostra como calcular a produção de água.

$$\text{Produção de água} = 9,34 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_{CaC}}{V_C} \text{ (kg/s)} \quad (4.2)$$

Porém, deve-se destacar que as equações, anteriormente citadas, são válidas tanto para a produção de água como para a quantidade de hidrogênio consumido se este for hidrogênio puro. Caso for usado hidrogênio de reformador é necessário levar em consideração a quantidade de monóxido de carbono presente no combustível. Com a presença de CO as equações sofrerão algumas modificações apresentadas em (Larminie e Dicks, 2003). A taxa de produção de calor da pilha, dada em watts, está indicada na Equação (4.3). Essas equações são usadas no programa em Labview para estimar o consumo de  $H_2$  e obter o consumo em cada região de operação da CaC dentro de um período de funcionamento.

$$\text{Produção de calor} = P_{CaC} \cdot \left( \frac{1,25}{V_C} - 1 \right) \text{ (W)} \quad (4.3)$$

### 4.3. Monitoramento e controle do ar de reação

#### 4.3.1. Umidade relativa da membrana

Quando os íons positivos passam através da membrana eles carregam moléculas de água e, deste modo a umidade relativa da membrana diminui. Porém, para obter-se uma boa condução de íons através da membrana esta deve estar hidratada, o que significa uma pequena queda de tensão ôhmica. A faixa ótima de operação da CaC é entre 85 e 100%. Porém, excessos de água são prejudiciais à célula, pois se houver acúmulo de água sobre a membrana menos íons passam através dela e, conseqüentemente, menor a eficiência da pilha.

A implementação de um sistema de umidificação eletrônica de uma CaC envolve um processo bastante complexo e equipamentos de alto custo. O cartucho utilizado neste trabalho é do tipo auto-umidificada, ou seja, ela mesma umidifica a membrana através da própria reação química. Porém, deve ser realizado o monitoramento e controle desta umidade, a fim

de evitar os problemas descritos acima. Observa-se que em temperaturas ambientes próximas ou maiores de 65°C ocorre desidratação da membrana, pois a produção de água da reação não consegue suprir a desidratação ocorrente. Assim, a umidade da membrana é controlada pela quantidade de ar injetada na pilha.

#### 4.3.2. Quantidade de ar injetado

Como citado na seção anterior, o controle da umidade da membrana foi realizado controlando a entrada de ar, ou seja, controlando a velocidade de um ventilador. Porém, a pilha necessita de quantidades mínimas de ar de reação proporcional a corrente drenada, para que a reação eletroquímica ocorra. A quantidade de ar requerida por uma CaC é detalhada a seguir. A Equação (4.4) mostra o uso de oxigênio de uma célula a combustível.

$$O_2 \text{ usado} = 8,29 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_{CaC}}{V_C} \text{ (kg/s)} \quad (4.4)$$

O ar de reação que é utilizado neste trabalho é proveniente de um ventilador, portanto, trata-se do ar atmosférico. Assim sendo, é preciso adequar a Equação (4.4) em relação à quantidade de oxigênio presente no ar atmosférico. A dedução completa dessa adequação é mostrada por Larminie e Dicks (2003). O resultado é apresentado na Equação (4.5).

$$\text{Ar atmosférico usado} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{P_{CaC}}{V_C} \text{ (kg/s)} \quad (4.5)$$

Porém, na prática é impossível fornecer exatamente a quantidade de ar que a CaC necessita, assim, se faz necessário incluir um termo extra na Equação (4.5) chamado de razão estequiométrica ou estequiometria, representado pela letra  $\lambda$ . A Equação (4.6) mostra a razão estequiométrica. Na prática a estequiometria é maior ou igual a dois, ou seja, a quantidade de ar fornecida deve ser o dobro do ar teoricamente consumido para a corrente drenada.

$$\lambda = \frac{Ar_{fornecido}}{Ar_{usado}} \quad (4.6)$$

Assim sendo, a equação da vazão de ar necessária é mostrada na Equação (4.7).

$$Ar \text{ atmosférico usado} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_{CaC}}{V_C} \text{ (kg/s)} \quad (4.7)$$

#### 4.3.3. Monitoramento e controle do fluxo de entrada do ar de reação

Para a injeção do ar de reação foi usado um ventilador, modelo Nidec/BetaSL 0,16A/12V. A quantidade de ar fornecida pelo ventilador é controlada pela variação da tensão de alimentação do mesmo. A curva mostrada na Figura 4.6 que fornece a vazão de ar do ventilador foi obtida por ensaios práticos, utilizando um anemômetro convencional. No ensaio o ar esta com uma pressão de 1 atm e à temperatura ambiente, em torno de 25°C.

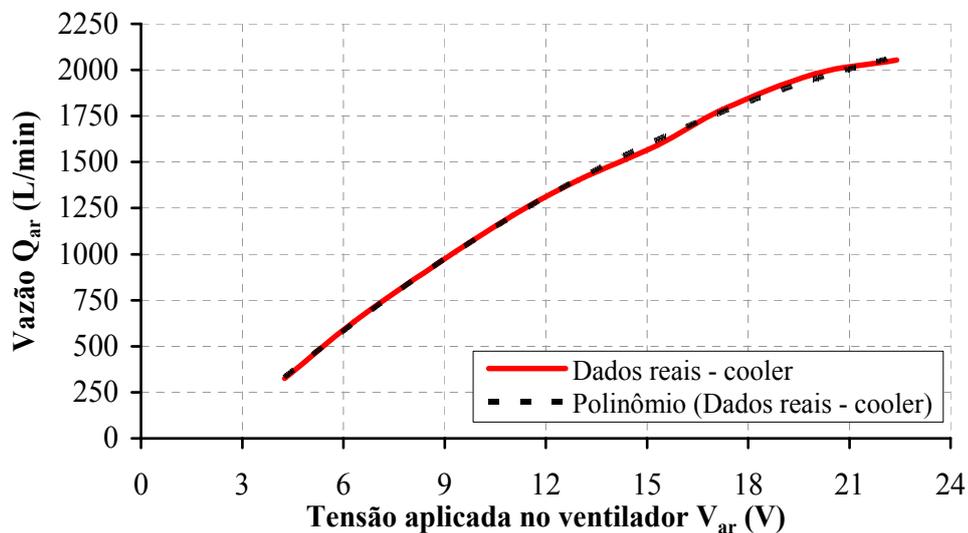


Figura 4.7 - Curva vazão x tensão de alimentação do ventilador.

Através de um polinômio de ajuste, de segunda ordem, obtem-se a equação de controle da vazão através do valor da tensão aplicada ao ventilador, mostrada na Equação 4.8.

$$Q_{ar} \text{ (L / min)} = -5 \cdot 10^{-5} \cdot V_{ar}^2 + 0,0029 \cdot V_{ar} - 0,0059 \quad (4.8)$$

O controle automático é realizado utilizando o programa Labview e a placa de aquisição de dados. O sinal PWM de acionamento, gerado do Labview, ajusta as rotações do ventilador com um ganho proporcional à carga requisitada (estequiometria) e à umidade relativa da membrana. Este sinal aciona uma chave eletrônica em uma frequência pré-estabelecida, com isso tem-se a variação da tensão média sobre o ventilador. Obtendo-se uma tensão de 0 a 12V sobre o ventilador. A chave eletrônica utilizada para o acionamento é um

Mosfet (modelo IRFZ44), onde o sinal de controle é isolado por um opto-acoplador (modelo TLP - 521-2). O circuito de acionamento dos ventiladores do ar de reação e de resfriamento é ilustrado pela Figura 4.7.

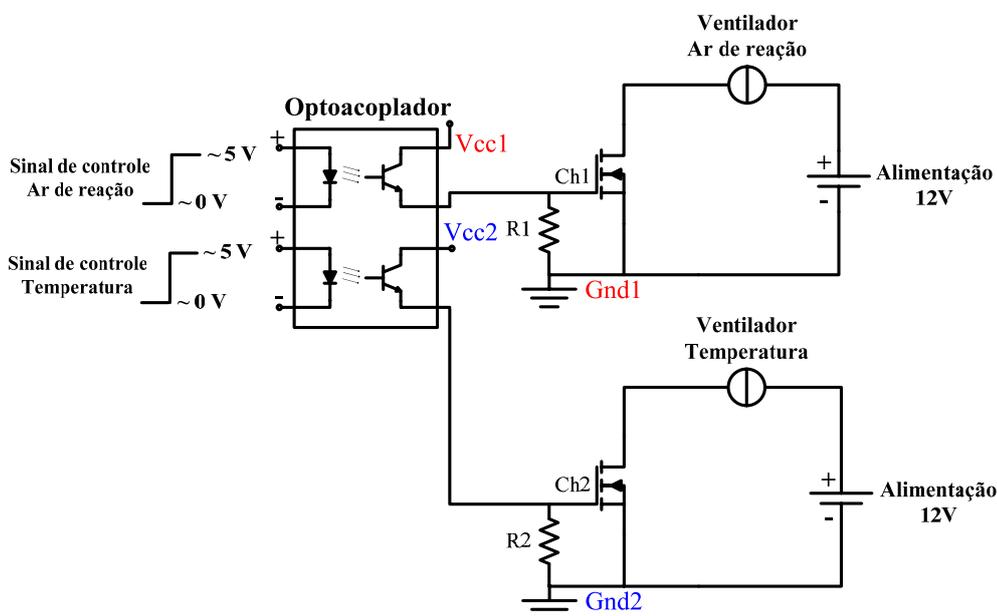


Figura 4.8 - Circuito de acionamento dos ventiladores.

#### 4.3.4. Fluxograma de controle do ar de reação

O monitoramento e controle da entrada do ar de reação da pilha estão representados na Figura 4.8. Com o acionamento do programa, primeiramente é ligado o ventilador a uma largura de pulso (PWM) intermediária (razão cíclica (*duty cycle (D)*) em torno de 50%, com um fluxo de aproximadamente 600 litros/minutos). O objetivo do monitoramento é tentar manter a estequiometria maior que dois e a umidade relativa nos limites de 85 a 95%. Como o fluxo de ar tem um efeito secante na membrana se a umidade aumentar ou diminuir é variada a quantidade de ar. Porém, como medida de segurança, se a umidade na membrana atingir 100% e a razão cíclica de acionamento já estiver em 100% é desligado os sistema e indicado falha. O mesmo acontece se a umidade relativa estiver muito baixa, em torno de 35% e a razão cíclica em 10%, será indicado falha e desligado o sistema. As outras combinações possíveis entre umidade e estequiometria são vistas no fluxograma. Em módulos comerciais este problema é resolvido com um umidificador controlado. Porém, devido à complexidade de sua implementação e os altos custos não foi incluído neste trabalho, mas a metodologia empregada, mesmo sem o uso do umidificador, garante a operação básica da pilha.

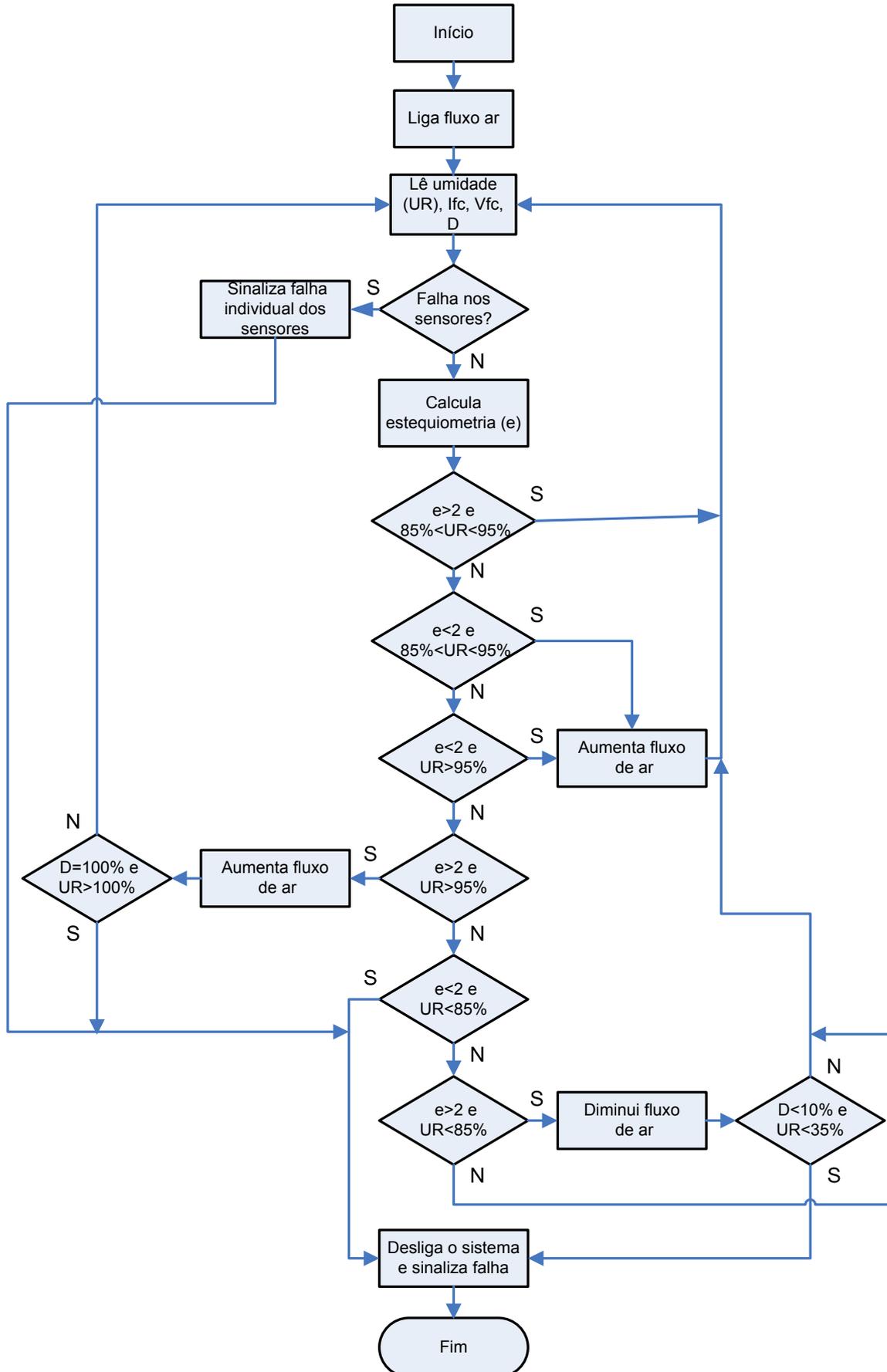


Figura 4.9 - Fluxograma de controle da umidade e estequiometria.

## 4.4. Desempenho de uma CaC

### 4.4.1. *By-pass*

A resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) aumenta com a desidratação da célula, aumentando a queda de tensão entre os eletrodos. Este processo aumenta o calor gerado pela pilha, acelerando a desidratação progressivamente.

Com isso, propôs-se avaliar o desempenho da célula usando-se a técnica de curtos-circuitos ou *by-pass*. Esta técnica consiste em estabelecer um curto-circuito entre o cátodo e o ânodo da célula através de uma chave eletrônica. Para o *by-pass* a chave eletrônica deverá ser acionada em uma frequência pré-estabelecida mantendo-se o fornecimento normal de  $H_2$  da pilha. Com esta técnica tenta-se reverter o mau funcionamento de células individuais dentro da pilha, gerando mais água na membrana o que acarreta uma melhor hidratação, diminui a resistência à passagem de íons e, conseqüentemente, aumenta a tensão e a eficiência.

De acordo com Fuglevand (2000, 2002), se o chaveamento for estabelecido de forma periódica, a pilha terá um rendimento aumentado de em torno 5%. O chaveamento também proporciona melhor umidificação da membrana, pois, poderá eliminar acúmulos de água que possam se formar na membrana, as quais dificultam a passagem dos íons positivos.

Avalia-se então a operação da CaC com a utilização dos *by-passes*, no entanto, o programa foi elaborado de forma que o operador possa iniciar os chaveamentos de forma isolada. Ou seja, como esta técnica está em fase de estudos deverá ser empregada com cuidado, pois poderá causar danos a pilha. Assim, este processo não será acionado todo o período de funcionamento do programa, mas apenas quando o operador iniciá-lo.

### 4.4.2. Implementação eletrônica

O processo de *by-pass* foi realizado de duas formas: através do chaveamento periódico e pelo monitoramento da tensão da pilha. Para o monitoramento da tensão e implementação da rotina foi usado o microcontrolador modelo PIC18F452 do fabricante Microchip, com tensão máxima de entrada de 5V. O acionamento da rotina de chaveamento é realizado pela placa de aquisição, ou seja, o Labview deve enviar um sinal para o PIC acionar /desligar a rotina de *by-pass*.

#### 4.4.3. Medição da tensão individual de cada célula

Para identificar a célula com problema deve ser realizada a medição individual de cada célula, porém o cartucho utilizado nos ensaios para esta dissertação é composto por quatro células associadas duas a duas em série. A ligação externa permitiu colocar as quatro células em série, portanto, pode-se fazer a medição apenas de duas a duas e não individual. O esquema de ligação, juntamente com pontos de medição são apresentados na Figura 4.9.

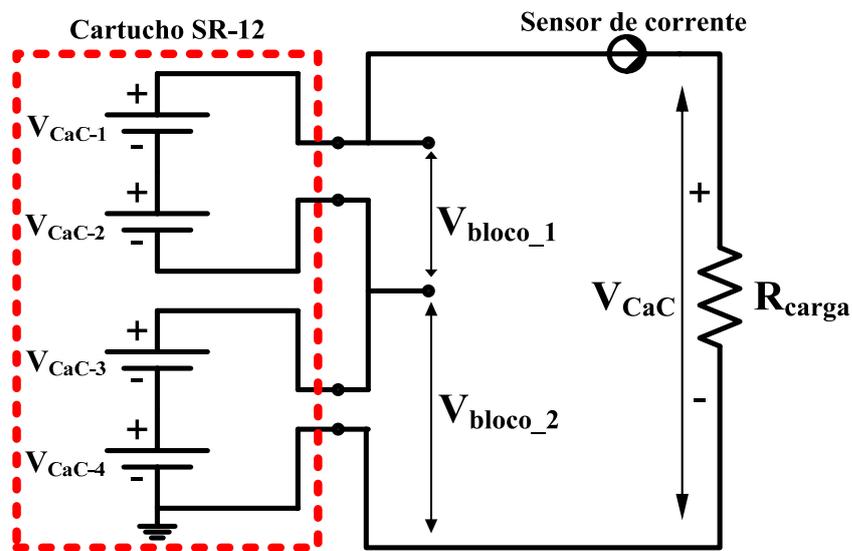


Figura 4.10 - Esquema de ligação e medição de tensão do cartucho SR-12.

Através de duas entradas analógicas do microcontrolador são realizadas as leituras de tensões. Na entrada 2 é lida a tensão  $V_{bloco\_2}$ , que corresponde a soma das tensões das células  $V_{CaC\_3}$  e  $V_{CaC\_4}$ . Na entrada 1 é lida a tensão total da pilha  $V_{CaC}$ , a qual é diminuída de  $V_{bloco\_2}$  para ter-se a tensão  $V_{bloco\_1}$ , como mostra-se na Equação 4.9. A tensão de  $V_{bloco\_1}$  corresponde a soma da tensão das células  $V_{CaC\_1}$  e  $V_{CaC\_2}$ . Para implementar este sistema em pilhas com mais de duas células em série, sugere-se o uso de multiplexadores para fazer a seleção individual da leitura de cada célula.

$$V_{bloco1} = V_{CaC} - V_{bloco2} \quad (4.9)$$

Como a tensão máxima do cartucho SR-12 é de aproximadamente 3,0V, não é necessária a redução desta tensão para leitura do microcontrolador, o qual suporta tensões de

até 5V. Baseando-se na proposta de Gonzatti (2005), a tensão lida é isolada do PIC, através de um amplificador isolado (modelo iso-122), fabricado pela empresa Burr-Brown. O circuito de ligação com o PIC é mostrado na Figura 4.10.

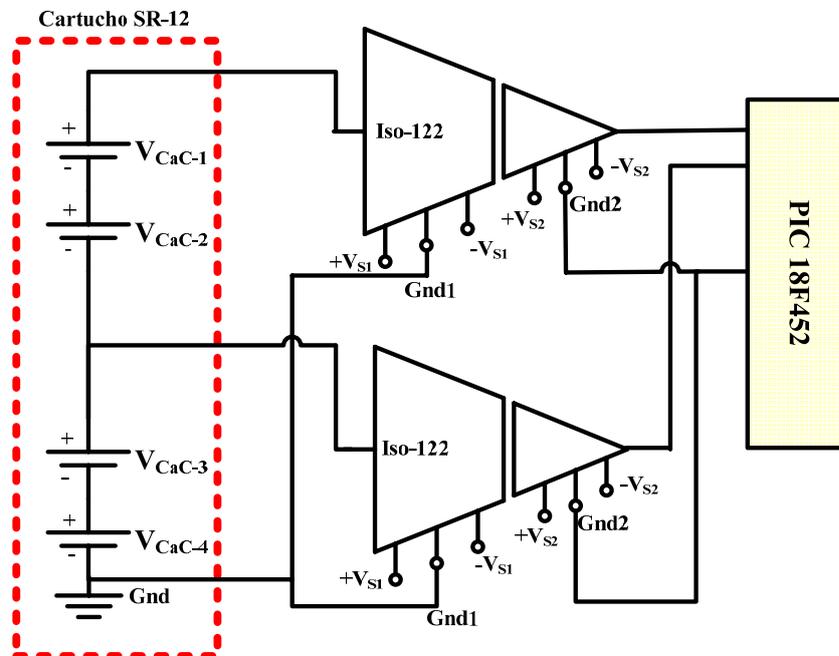


Figura 4.11 - Circuito de ligação do microcontrolador para leitura da tensão.

#### 4.4.4. Circuito eletrônico

Para estabelecer o curto-circuito entre anodo e o catodo de cada um dos blocos de células anteriormente citados, foi utilizado uma chave eletrônica (Mosfet, modelo IRFZ44), cujo gatilho é acionado por um sinal de controle advindo do microcontrolador. O optoacoplador (modelo TLP - 521-2) é utilizado para conferir o isolamento entre o sinal de controle e a chave, e também estabelece a tensão gate-source para acionamento da chave (Serpa, 2004; Gonzatti, 2005; Fluglevand, 2000). Em paralelo com o Mosfet existe um diodo que assume a corrente da pilha caso a tensão da célula atingir valores próximos de zero ou mesmo negativos, de acordo com a patente americana Fluglevand (2002). Na Figura 4.11 pode-se observar o esquema elétrico do circuito de chaveamento.

Percebe-se na Figura 4.11 que, para o acionamento das chaves serem independentes uma da outra, se faz necessário o uso de fontes independentes.

A operação normal, ou seja, sem acionamento do *by-pass* consiste no bloqueio dos Mosfets e os diodos estão reversamente polarizados, fazendo com que a corrente circule pelo caminho mostrado na Figura 4.12.

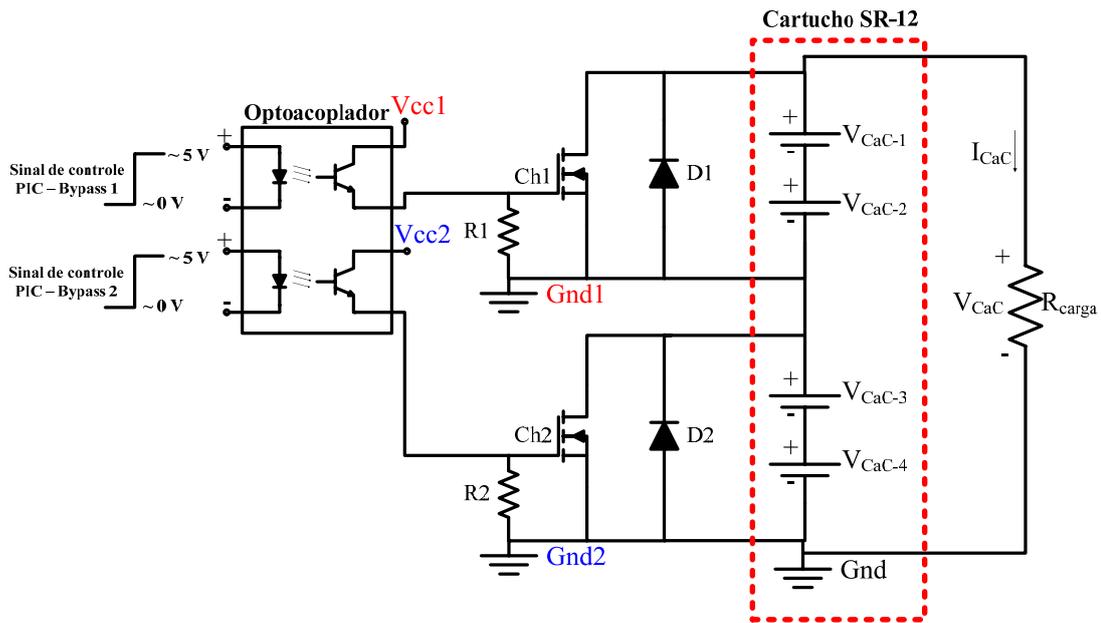


Figura 4.12 - Circuito para aplicação do *by-pass*.

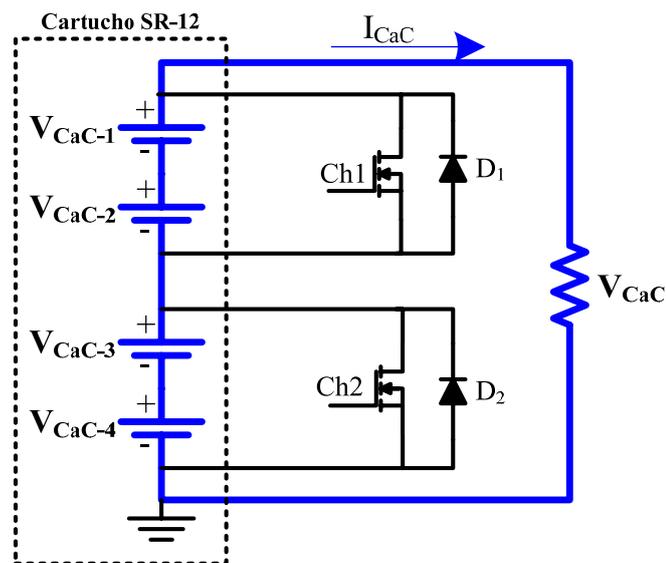


Figura 4.13 - Caminho percorrido pela corrente sem o *by-pass*.

No instante em que a tensão de algum dos blocos estiver abaixo do valor estipulado, o PIC envia um sinal de controle solicitando o desbloqueio da chave, fazendo com que o Mosfet assumira a corrente total do bloco, como exposto nas Figuras 4.13a e 4.13b. Como se pode observar no desenho, os diodos continuam reversamente polarizados em todo este processo.

Os  $D_1$  e  $D_2$  diodos só entrarão em condução quando o bloco atingir valores negativos de tensão, havendo uma inversão de polarização da CaC (Fluglevand, 2002). Assim sendo, os diodos polarizam-se diretamente. A inclusão dos diodos é uma questão de segurança para a

pilha. Eles poderão nunca ser acionados na prática, mas devem estar presentes. Como explicado nas Figuras 4.14a e 4.14b.

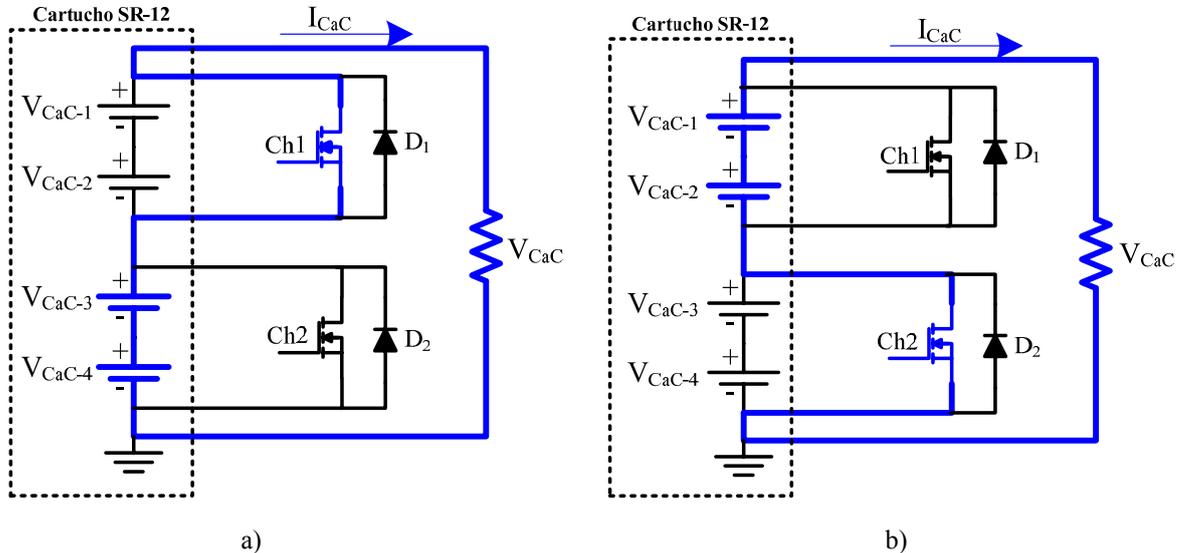


Figura 4.14 - a) caminho da corrente no Bloco\_1 e b) Caminho da corrente no Bloco\_2.

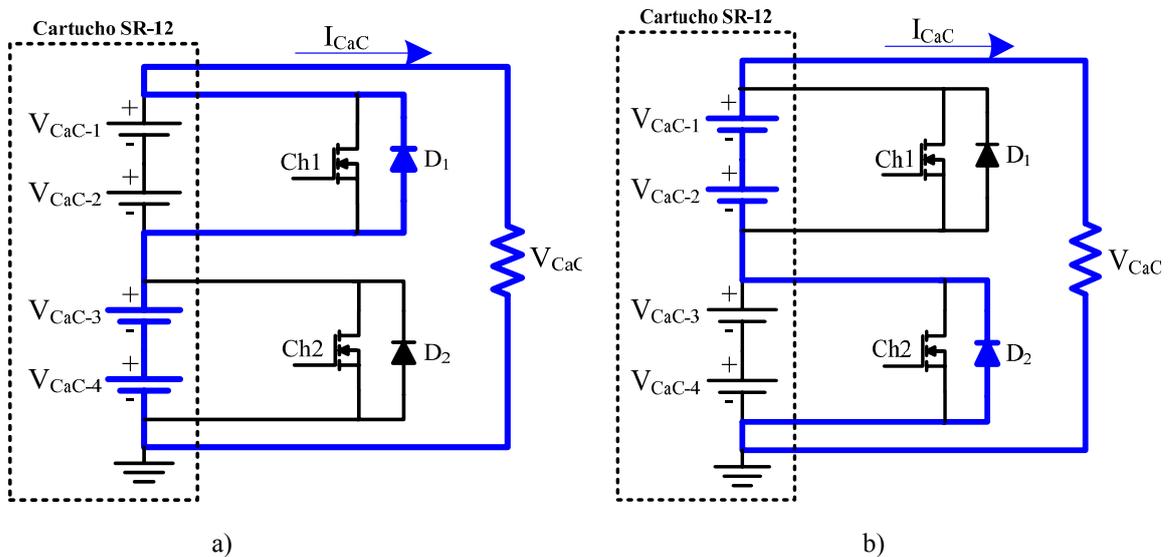


Figura 4.15 - a) caminho da corrente no Bloco\_1 e b) Caminho da corrente no Bloco\_2.

#### 4.4.5. Fluxograma da rotina do curto-circuito

Optou-se neste trabalho por efetuar o chaveamento periódico sempre em blocos opostos a fim de que a tensão na carga não caia a zero. O esquema de chaveamento entre os blocos de células é indicado na Figura 4.15 e o fluxograma do programa para o ensaio 1 é ilustrado na Figura 4.16. Para os outros ensaios variam-se apenas os valores dos tempos do chaveamento dentro do mesmo programa.

Realizando-se o chaveamento, como sugerido acima, a tensão mínima sobre a carga será igual à tensão de pelo menos um dos blocos, consecutivamente. Inspirando-se na metodologia aplicada por Yap (2005), a chave fica acionada durante 50ms e fica desligada durante 20s. Assumem-se esses tempos de condução e bloqueio da chave como referências. Outros ensaios (ensaios 2 e 3) foram realizados com valores diferentes de modo a avaliar a variação do tempo de desbloqueio das chaves na eficiência da CaC.

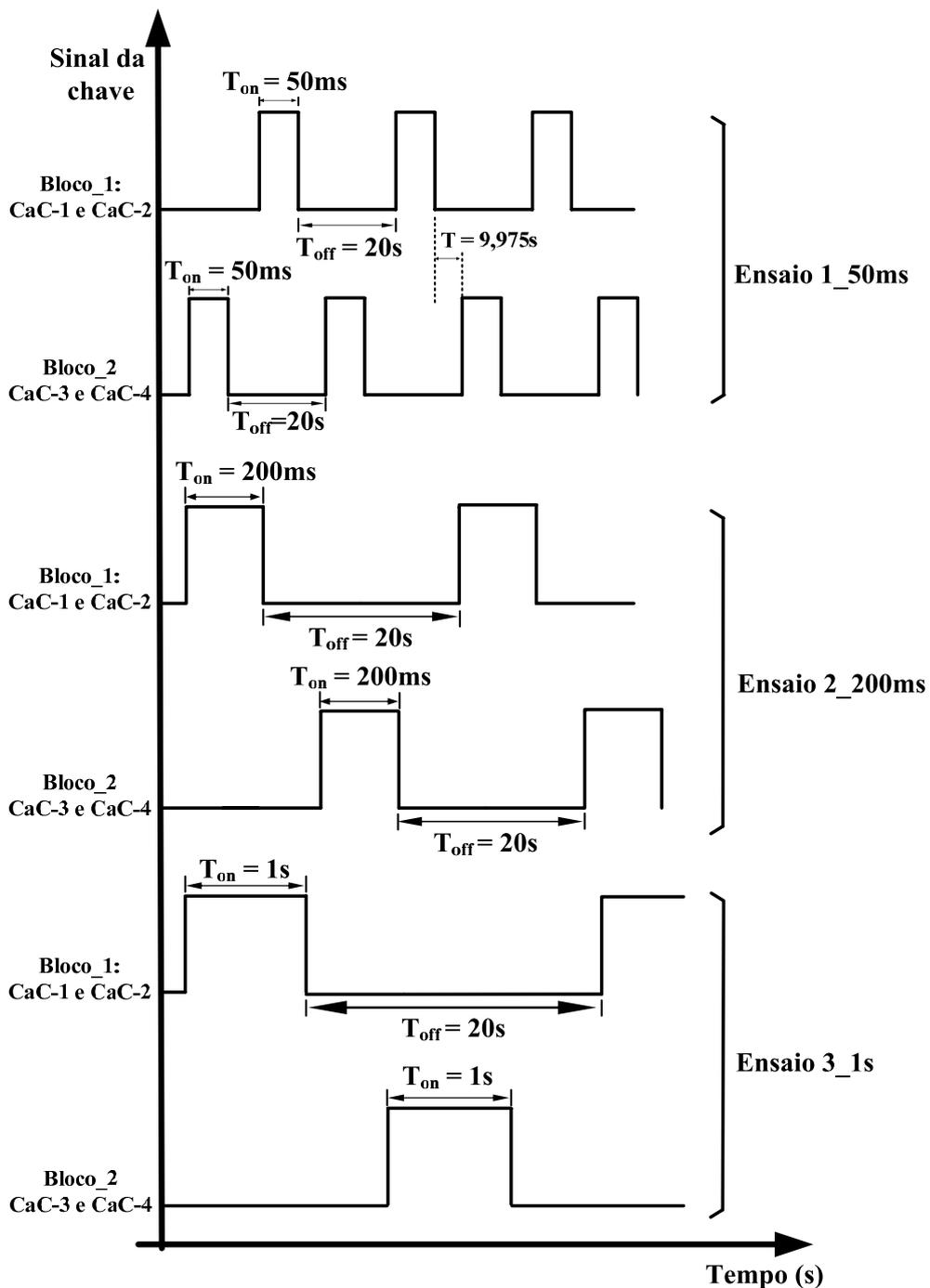


Figura 4.16 - Sinal dos pulsos nas chaves.

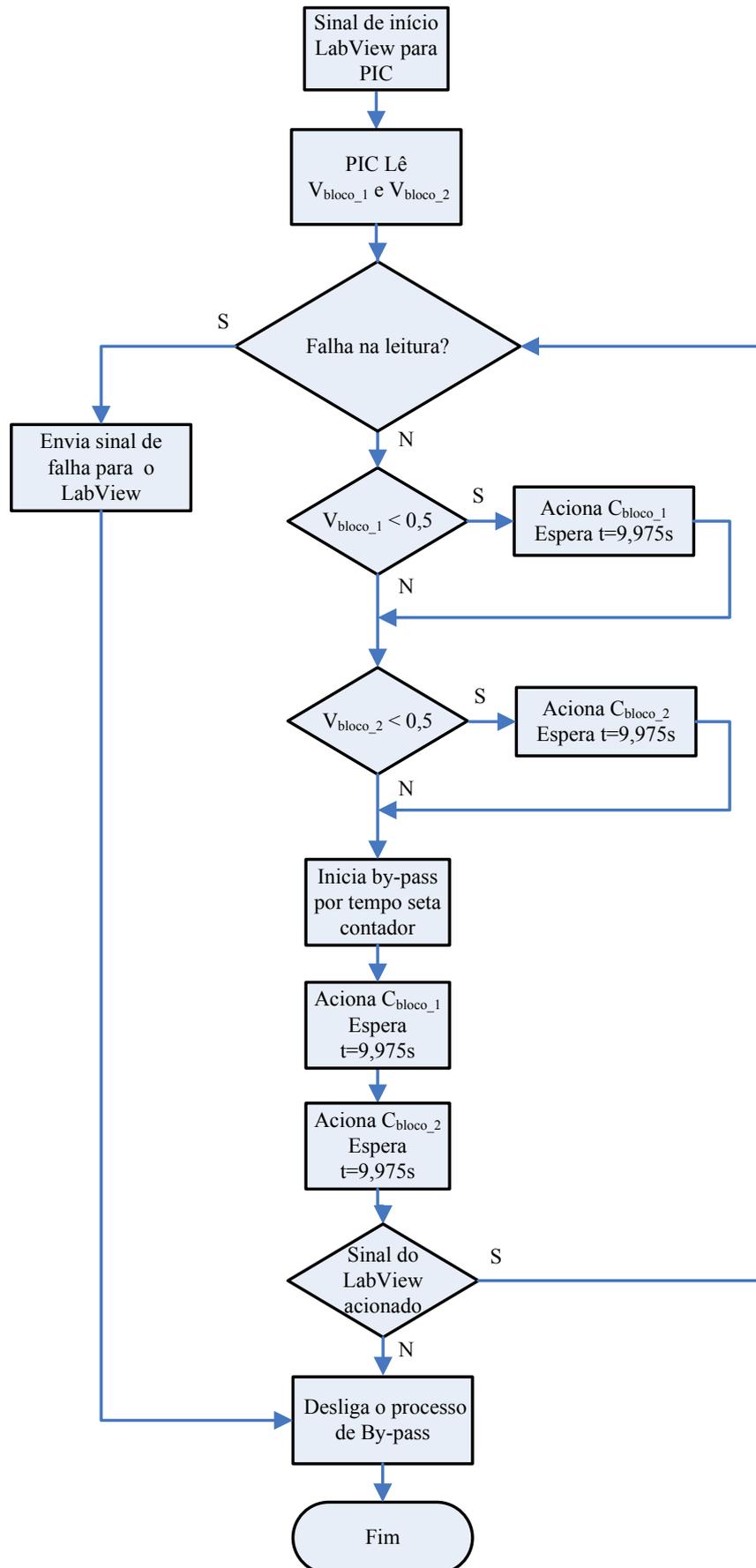


Figura 4.17 - Fluxograma da rotina do *by-pass* para o ensaio 1.

Além do chaveamento por tempo, também foi realizado um monitoramento da tensão em relação a padrões pré-estabelecidos para CaCs. Ou seja, se a célula apresentar problemas e sua tensão começar cair, também é aplicado os *by-passes* como forma de tentar revertê-la. A tensão padrão de uma única célula é de 0,65V. Como se tem duas em série, essa tensão vai ser de 1,3V. Assume-se como tensão limite mínima 0,5V para o bloco, abaixo deste valor é acionado o *by-pass* para o bloco respectivo.

#### **4.5. Medição de corrente e tensão**

Os circuitos para medições de tensão, que são adquiridas através da placa de aquisição, fazem uso de um transdutor LEM (LV 25-NP). O qual proporciona isolamento do sinal medido e apresenta um sinal de tensão de saída proporcional ao sinal de entrada. O sensor de corrente utilizado foi o modelo SECOHR (50CI-15) da marca Secon. Esse é um sensor de corrente elétrica por efeito hall realimentado que pode ser usado para medir corrente contínua e alternada com isolamento galvânica e sinal de saída em corrente (alta imunidade ao ruído). O circuito da placa de medição de tensão e corrente é mostrado no Anexo III.

#### **4.6. Carga eletrônica variável**

Durante os testes com a CaC percebeu-se que para levantamento da curva característica de polarização de CaCs deve-se usar uma carga que permita o aumento linear da corrente, ou seja, entre uma medição e outra não pode haver retirada total da carga. Pois, se abrir o circuito entre um valor de corrente e outro a célula sofre uma recuperação instantânea de tensão e, com isso, um longo tempo será preciso para uma nova medição. Assim, foi utilizada uma carga eletrônica variável para os ensaios. Esta carga é chaveada com Mosfets, controlada por um potenciômetro, com capacidade para até 200W e foi construída no próprio laboratório do CEEMA. No Anexo IV ilustra-se o circuito simplificado da carga eletrônica.

#### **4.7. Umidificador do ar de reação**

Para avaliar o impacto da variação da umidade na eficiência da CaC construiu-se o umidificador de ar ilustrado na Figura 4.17. A umidade do ar é lida através do sensor de umidade instalado no interior do cone metálico indicado na mesma figura.

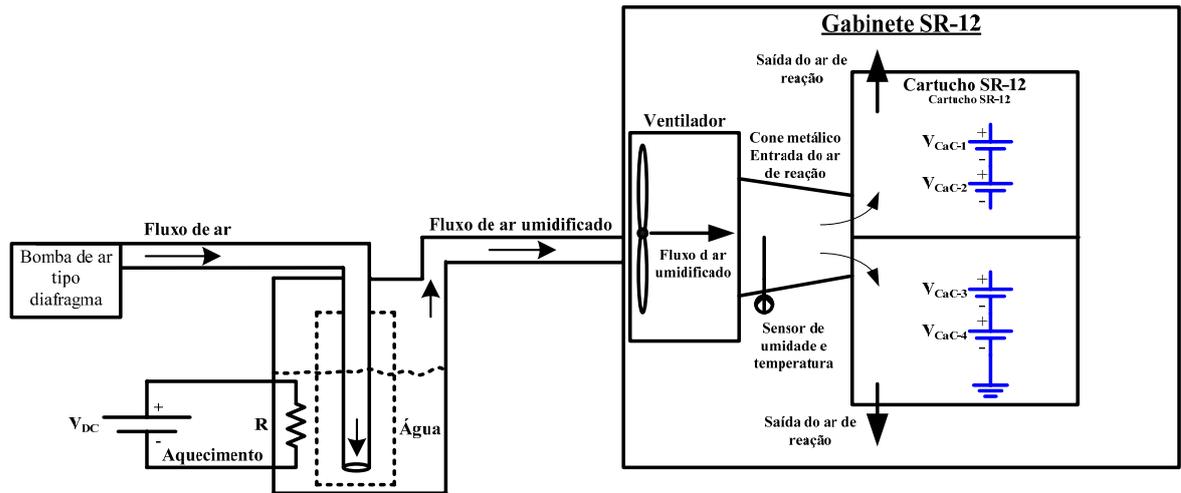


Figura 4.18 - Esquema do método de aumento da umidade do ar de reação.

#### 4.8. Sistema de geração com a SR-12

A Figura 4.18 ilustra o sistema completo implementado em laboratório, no desenho estão indicadas as partes do módulo relacionando-as às explicações teóricas deste capítulo.

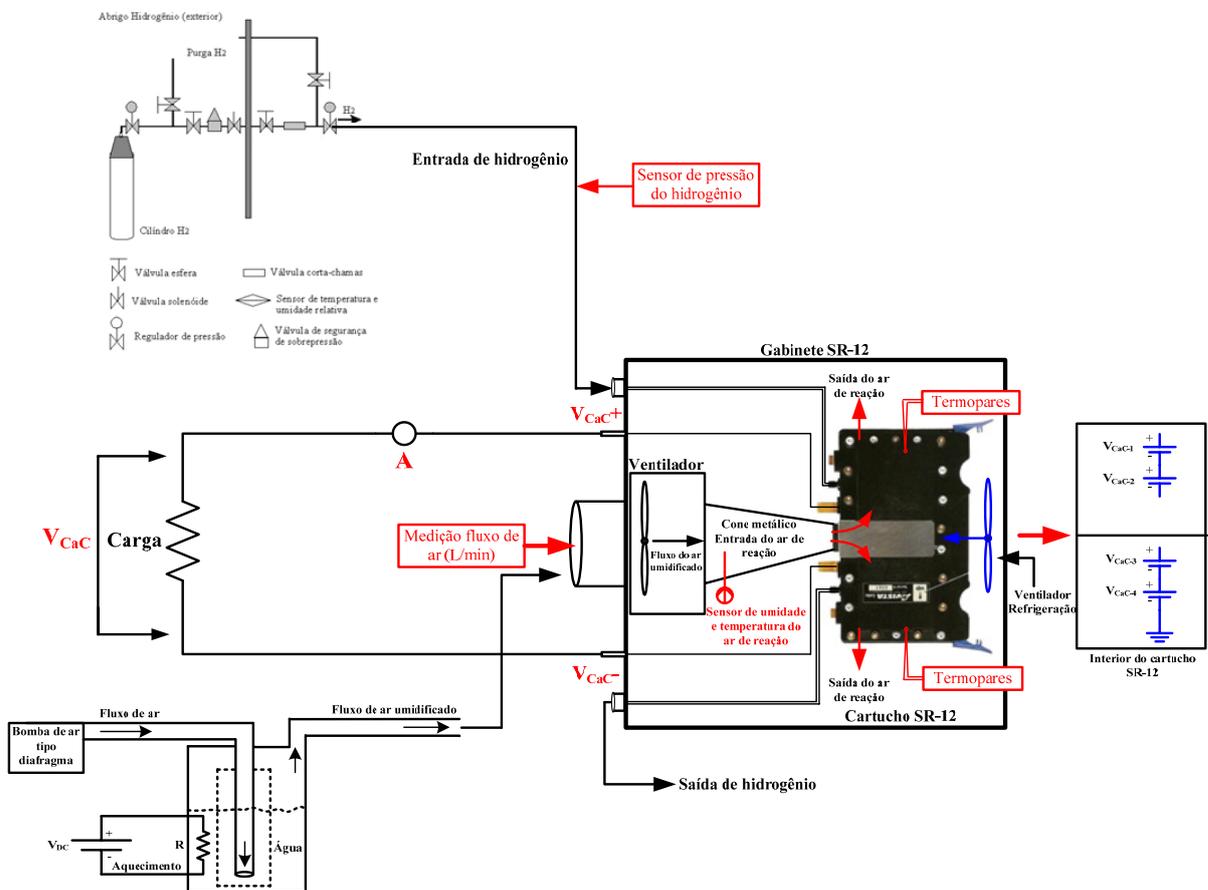


Figura 4.19 - Esquema de montagem do sistema completo.

#### **4.9. Resumo do capítulo**

Neste capítulo foi apresentada toda metodologia para monitoramento das grandezas de controle da pilha SR-12. Também é descrita de forma detalhada a instrumentação eletrônica necessária para implementação prática do protótipo.

## CAPÍTULO 5

### PROGRAMA DE MONITORAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO MECÂNICA DO PROTÓTIPO

---

#### 5.1. Programa de monitoramento

A rotina principal de monitoramento da CaC foi desenvolvida no programa Labview, o que confere um alto grau de interatividade com as grandezas de operação da pilha. Assim sendo, pode-se acompanhar e monitorar essas grandezas com uso de um computador. Para realizar a aquisição de dados e gerar os sinais para os atuadores utilizou-se uma placa de aquisição do fabricante National Instruments. O modelo da placa é USB-5221 a qual pertence à série M-DAQ. Algumas características desta placa relevante e utilizada para aplicação neste trabalho são: possui 16 entradas analógicas, que podem ser usadas como 8 entradas diferenciais ou 16 entradas em relação a um terra comum, 2 saídas analógicas, 16 bits de resolução para conversão analógico/digital (A/D), 24 entradas digitais (I/O) e programação compatível com o programa Labview.

O programa principal possui doze variáveis que são lidas através das entradas analógicas da placa de aquisição, que são:

- ⇒  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$  ( $^{\circ}C$ ): Termopares inseridos próximo à membrana das células CaC-1, CaC-2, CaC-3 e CaC-4, respectivamente;
- ⇒  $P_{H_2}$  (psi): Sensor de pressão do  $H_2$ , inserido na canalização;
- ⇒  $T_{novus}$  ( $^{\circ}C$ ): Sensor de temperatura, inserido no duto de entrada do ar de reação;
- ⇒  $UR_{novus}$  ( $^{\circ}C$ ): Sensor de umidade relativa, inserido no duto de entrada do ar de reação;
- ⇒  $Q_{ar}$  (L/min): Vazão de ar de reação, sensor de tensão no ventilador que fornece ar;
- ⇒  $V_{CaC}$  (V): Tensão total da CaC, sensor de tensão na célula;
- ⇒  $I_{CaC}$  (A): Corrente da CaC, sensor de corrente no circuito;
- ⇒  $PIC_{op}$  (TTL): Sinal indicando que o microcontrolador está operando corretamente;
- ⇒  $By-pass_{op}$  (TTL): Sinal que indica funcionamento correto da rotina de by-pass.

Para geração de sinais para os atuadores são usadas quatro saídas da placa de aquisição. Para os dois sinais PWM, temperatura e ar de reação, tem-se duas saídas analógicas, que podem ser configuradas em até  $\pm 10V$ . Para o sinal da válvula solenóide e acionamento do *by-pass* foram utilizados duas saídas digitais (TTL). Na Figura 5.1 mostra-se um esquema da implementação do protótipo.

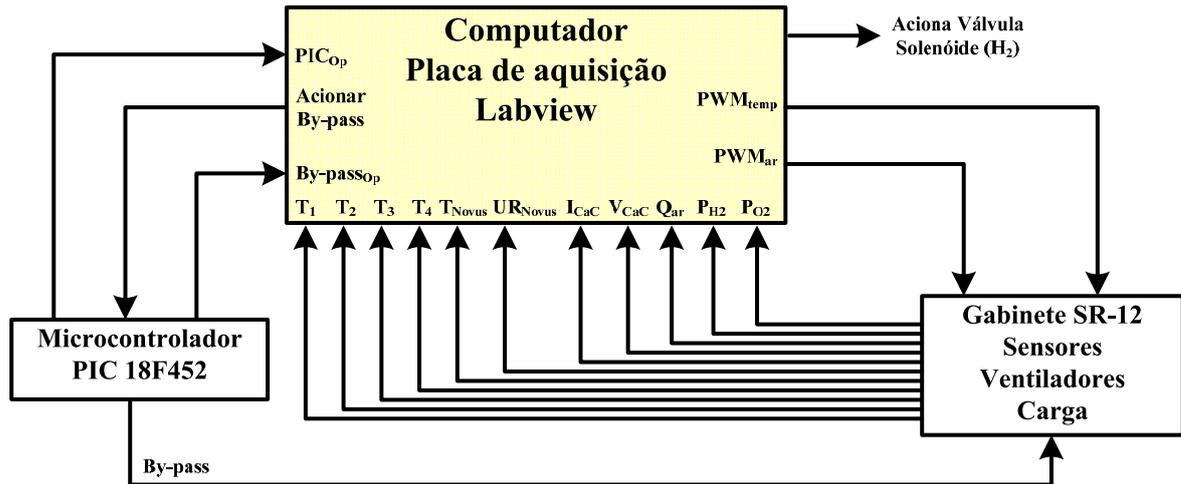


Figura 5.1 - Esquema principal de monitoramento e controle da SR-12.

Quando o programa for acionado é realizada uma varredura dos sinais de todos os sensores. Se for detectada alguma falha o programa fecha a entrada de hidrogênio e também interrompe o fornecimento do ar de reação. Os únicos sinais que não interrompem o funcionamento do protótipo são os sinais advindos do microcontrolador, pois o sistema de *by-pass* não é um ponto fundamental na operação da CaC. As falhas dos sensores significam que seus sinais estão fora dos limites pré-estabelecidos. Desse modo, previne-se algum dano à pilha pela falta de monitoramento das variáveis. Se os sensores estiverem operando corretamente, a válvula solenóide é aberta introduzindo combustível na pilha, e também é acionada a injeção de ar. Assim sendo, de acordo com os valores lidos, a lógica do programa atuará na largura de pulso do PWM, enviando um sinal de controle para os ventiladores. Simultaneamente quando for acionado o botão de *by-pass* no Labview um sinal é enviado para o microcontrolador o qual aplica o procedimento de chaveamento na pilha. Todos os valores são mostrados por indicadores nos painéis de monitoramento do Labview. O fluxograma do programa principal é apresentado na Figura 5.2.

A interface do programa com o usuário é composta de indicadores e controladores manuais, agrupados em cinco painéis de monitoramento, distribuídos em forma de abas

sobrepostas. O painel principal chamado de “Controle geral do programa” é mostrado na Figura 5.3. Este é composto pelos sinalizadores de falhas e de operação normal de todos os sensores, também são indicados: tempo de operação da pilha, estequiometria, região da curva característica em que a célula está operando, sinais PWM gerados e sinais do microcontrolador.

Além disso, deve-se entrar com alguns valores funcionais antes de iniciar o programa como: número de células que compõem a pilha, frequência da aquisição de dados e número de amostras. Também, pode-se optar por salvar os dados, acionar o *by-pass* ou mantê-la em operação padrão. Se o funcionamento do programa estiver correto o sinalizador “Sistema Ligado” estará acionado. Entretanto, se ocorrer um problema o sinalizador “Sistema Desligado” informará que o fornecimento de ar e de hidrogênio foi interrompido.

Dois painéis são usados para os ensaios de polarização da CaC, ou seja, para obtenção dos parâmetros em função da corrente. O segundo painel ilustrado na Figura 5.4, é chamado de “Estático Climatização” e permite o monitoramento das grandezas em função da corrente.

O terceiro painel ilustrado na Figura 5.5, é chamado de “Estático Elétrico” e permite o acompanhamento das variáveis: tensão, rendimento e potência em função da corrente. Este painel é utilizado nos ensaios para obtenção da curva característica de polarização da pilha.

Outros dois painéis foram projetados para monitoramento e controle em regime permanente da CaC. Ou seja, deve-se escolher um ponto de operação em relação à curva característica, na qual atenda as necessidades do projetista, levando-se em consideração, potência necessária e rendimento.

O painel “Dinâmico Climatização” consiste no monitoramento das variáveis: temperatura da membrana ( $^{\circ}\text{C}$ ), pressão dos gases reagentes (*psi*), fluxo de ar de reação (L/min), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa (%) do ar, mostrado na Figura 5.6. Este painel também permite estimar o consumo de ar (L/min), o consumo de hidrogênio (L/min), a produção de água (L/min) e a produção de calor ( $W=J/s$ ). No painel podem-se analisar de duas formas esses parâmetros. Primeiramente em relação à taxa instantânea desses consumos e também a quantidade de consumo e produção acumulados, ou seja, o acúmulo que se obteve no período de operação da pilha. Todos esses valores poderão ser salvos no computador para análises posteriores. Mostra-se na Figura 5.7 o painel que faz o monitoramento de tensão, corrente, potência e rendimento da CaC em regime permanente.

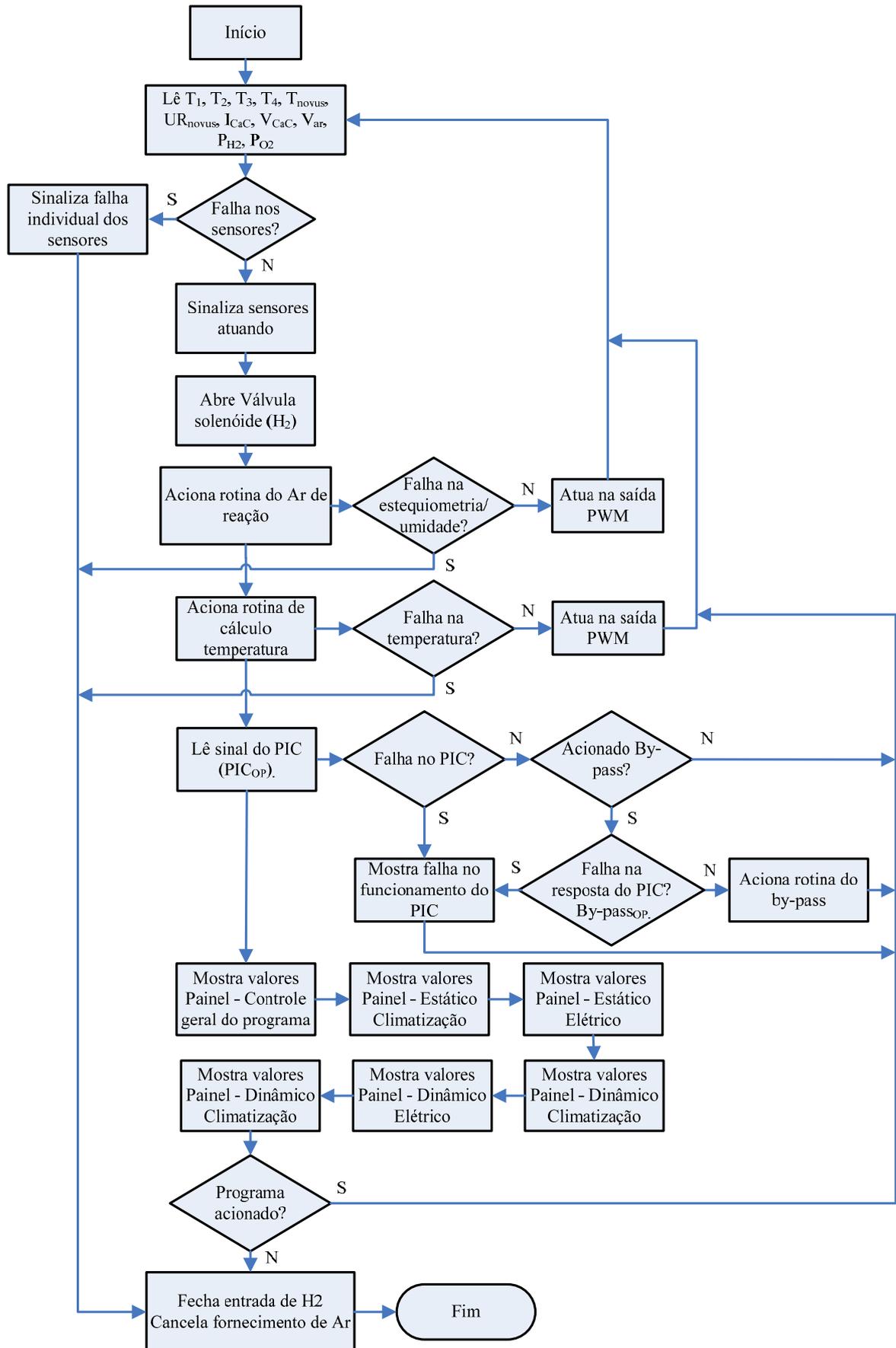
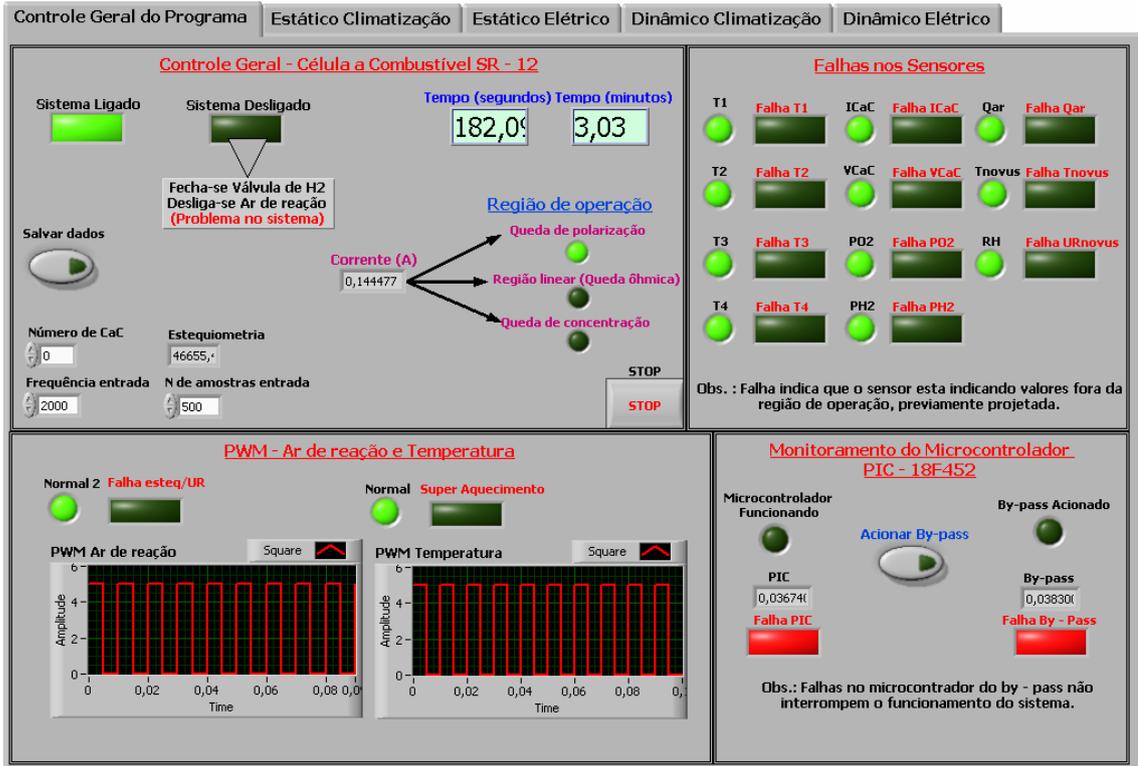
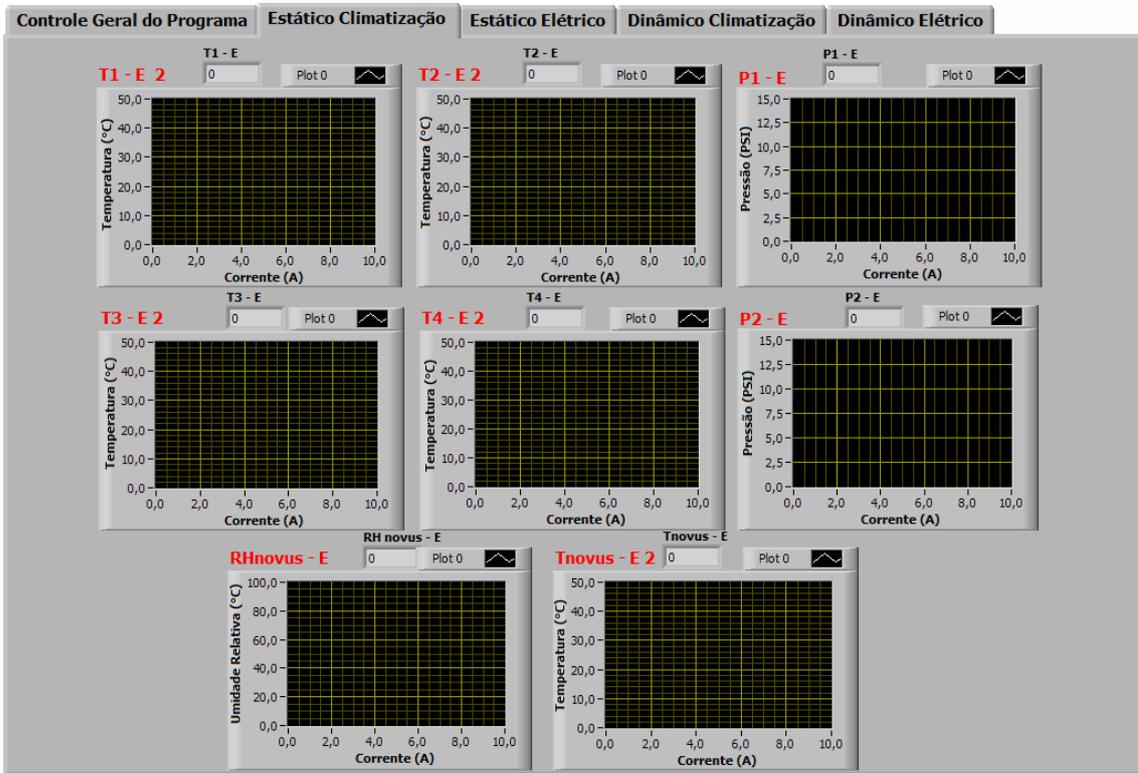


Figura 5.2 - Fluxograma principal do programa.



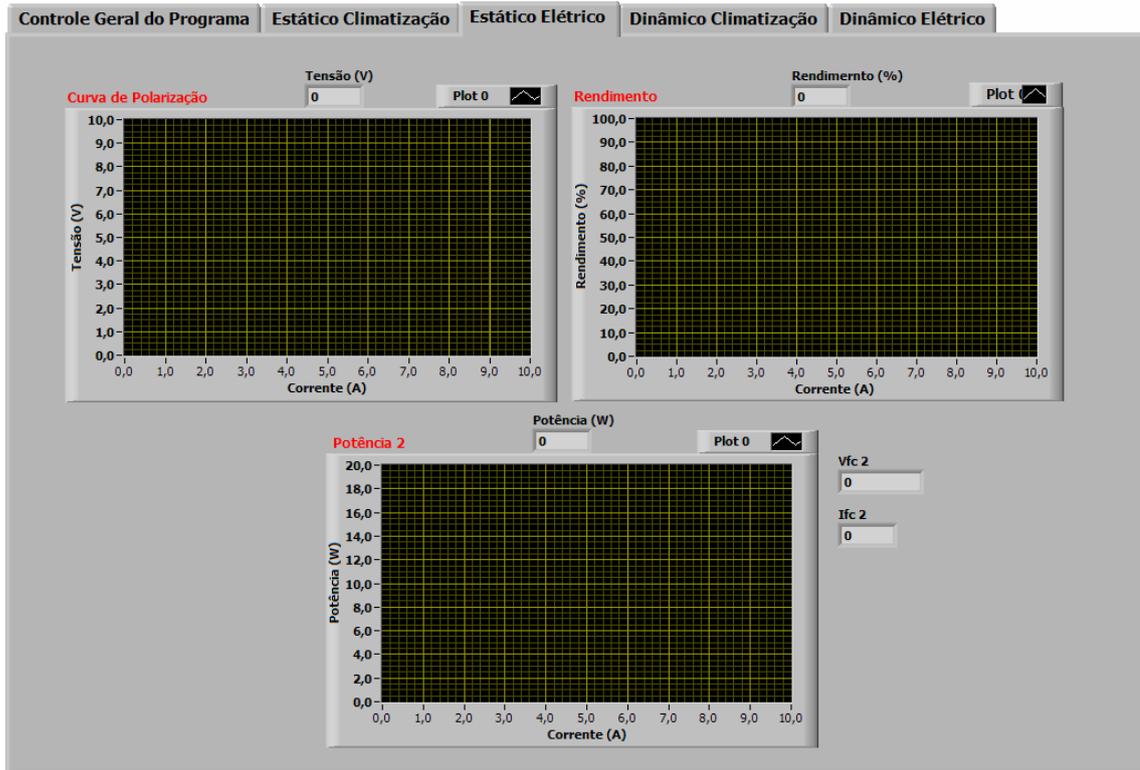
Painel de Monitoramento e Controle

Figura 5.3 - Painel principal de monitoramento.



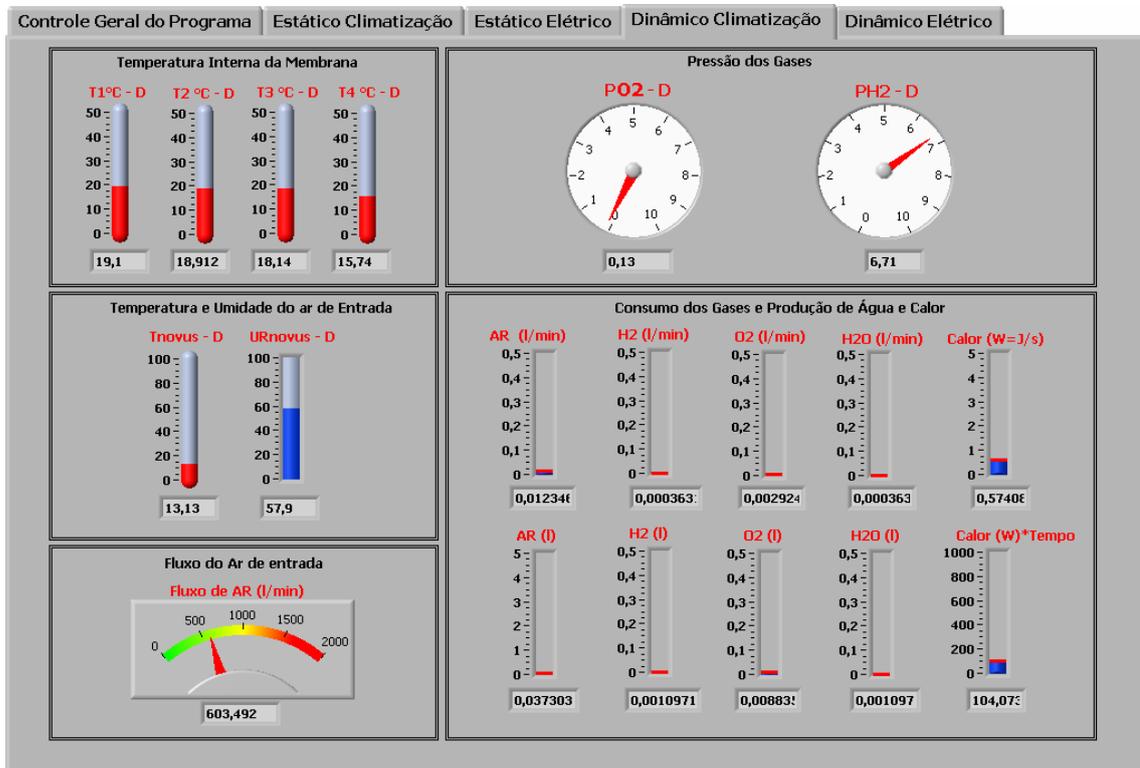
Painel de Monitoramento e Controle

Figura 5.4 - Painel para monitoramento durante ensaios de polarização .



Painel de Monitoramento e Controle

Figura 5.5 - Painel para monitoramento da tensão, corrente e rendimento.



Painel de Monitoramento e Controle

Figura 5.6 - Painel de monitoramento da climatização para operação em regime permanente.

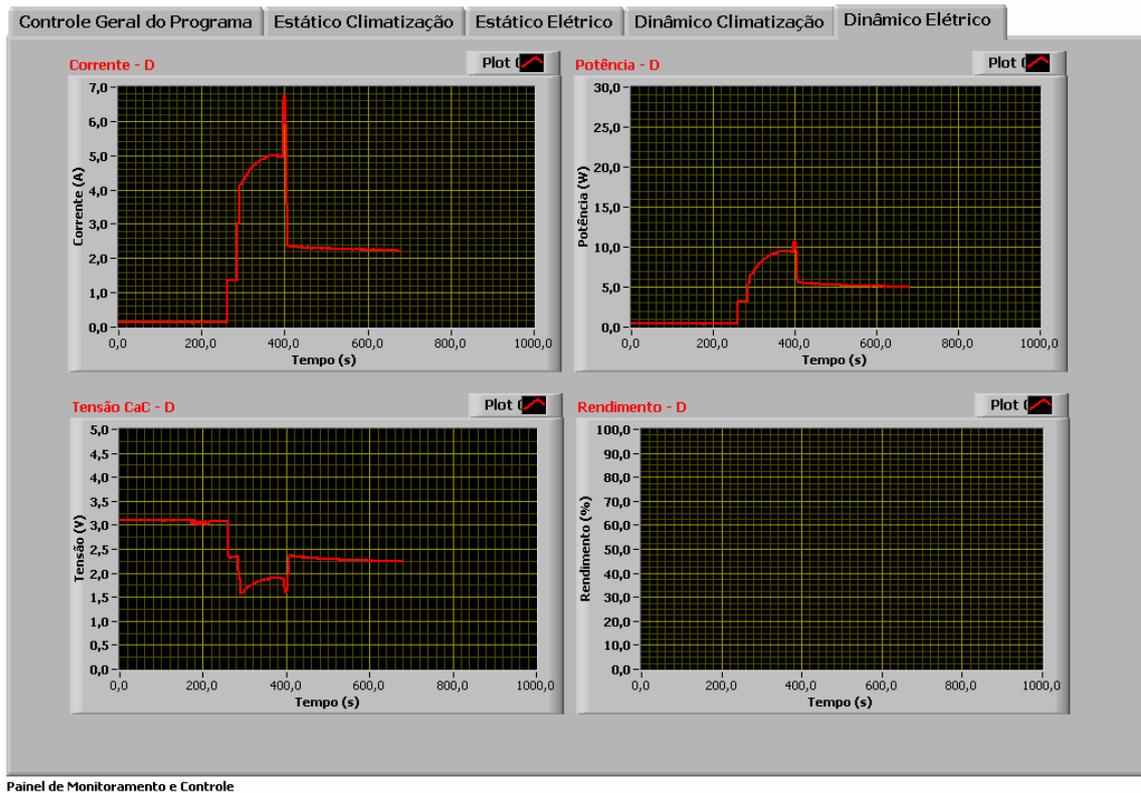


Figura 5.7 - Painel das variáveis elétricas para operação em regime permanente.

## 5.2. Construção mecânica do protótipo

Em Avista laboratories (2002) tem-se informações importantes para o projeto desse sistema. A pilha completa consiste de 12 cartuchos, contendo 4 células cada, totalizando 48 células em série. Porém, como o laboratório não possui o equipamento completo, para este trabalho utilizou-se um cartucho somente, ou seja, 4 células em série. Como o princípio de funcionamento é o mesmo para todos os cartuchos, toda conclusão obtida é válida para pilhas maiores. Além disso, a análise desta pilha com tecnologia própria permite um maior entendimento do funcionamento e das características de operação das CaCs. Pois muitos módulos comerciais são de difícil acesso a informações de sua construção interna.

Na Figura 5.8 visualiza-se o cartucho utilizado, onde se ilustra os pontos de entrada e saída dos combustíveis bem como os terminais de corrente.

A construção mecânica consistiu na adaptação do cartucho no interior de um gabinete metálico, nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 ilustra-se o gabinete e cada parte construída. A numeração mostra cada componente da instalação e será detalhada a seguir. O número 1, indicado na Figura 5.9, corresponde a fonte de alimentação para as placas de condicionamento de sinais. O 2 indica o duto metálico para passagem do ar de reação onde no seu interior foi

instalado o ventilador (cooler 80x80mm), também consta um filtro simples de ar para impedir a passagem de substâncias e resíduos que possam causar prejuízo a CaC.

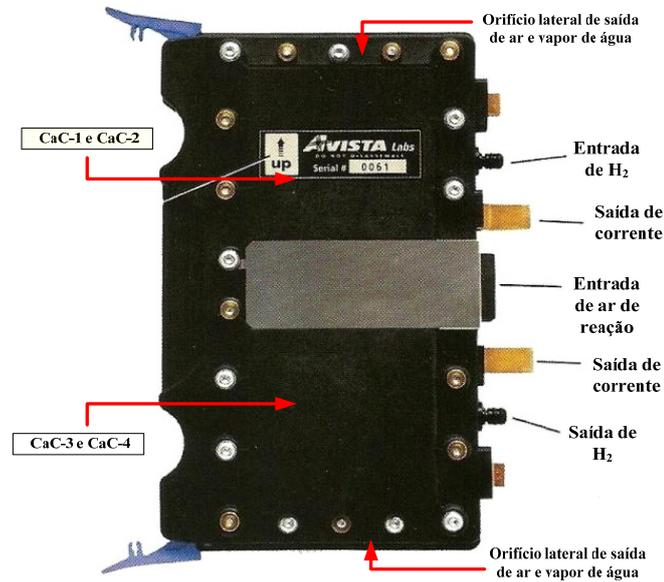


Figura 5.8 - Cartucho da SR-12 utilizado.

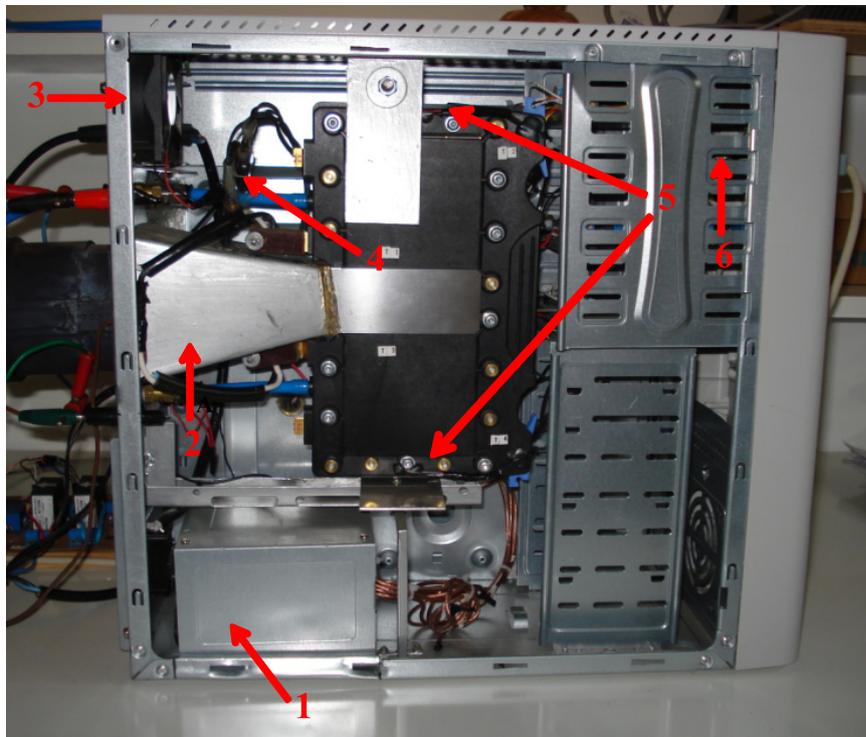


Figura 5.9 - Vista lateral do gabinete e indicação dos componentes.

O sensor de temperatura e umidade do ar de reação também está instalado no interior deste duto metálico, permitindo assim, a aquisição desses valores instantes antes do ar de

reação atingir a membrana da pilha. O número 3 indica o ventilador para controle da temperatura da pilha e 4 corresponde ao sensor de pressão instalado na canalização de hidrogênio. A instalação dos quatro termopares são representados por 5, estes sensores foram introduzidos através do canal de saída de ar e vapor de água. As placas de condicionamento dos sinais dos sensores são indicadas por 6.

Na Figura 5.10, no local indicado por 7 foi realizada a instalação das placas de condicionamento dos sinais dos sensores de pressão, temperatura (termopares) e sensor de umidade e temperatura do ar de reação.

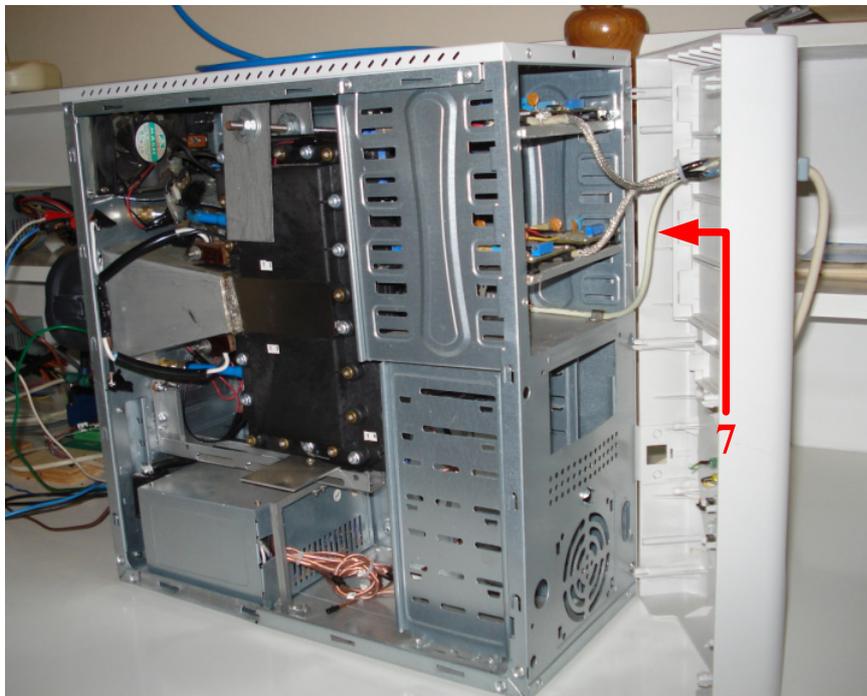


Figura 5.10 - Vista frontal do gabinete e indicação dos componentes.

Na Figura 5.11 a alimentação da fonte interna ao gabinete é indicada por 8, 9 mostra uma chave liga/desliga para acionamento externo do ar de reação. Deve-se manter essa chave desligada enquanto a alimentação for por uma fonte externa e o controle for automático, através do Labview, e mantê-la ligada quando a alimentação for pela fonte interna ao gabinete e o controle sobre o ar for manual, através de potenciômetro. A conexão de entrada de hidrogênio indica-se por 10, 11 representa a instalação do ventilador para controle da temperatura, 12 é o terminal de saída de tensão  $V_{CaC(+)}$  e 13 é o terminal de saída de tensão  $V_{CaC(-)}$ . A entrada do ar é indicada por 14, 15 representa a conexão de saída (purga) de hidrogênio.

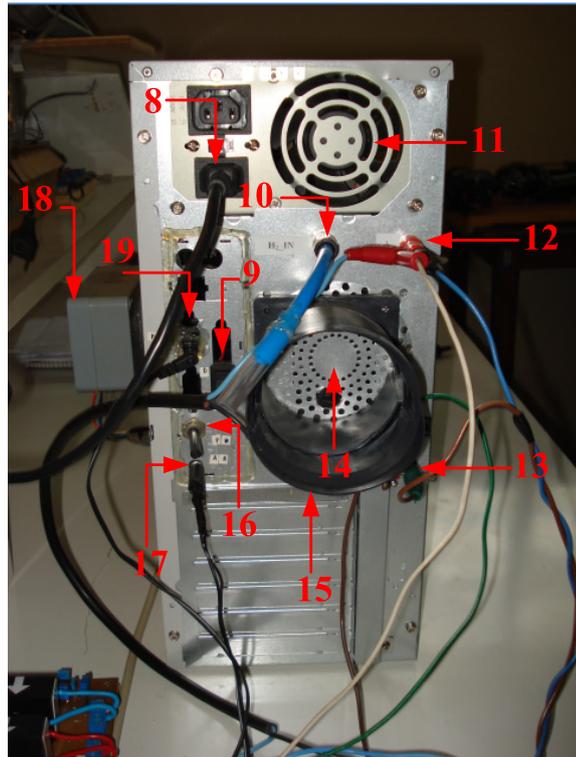


Figura 5.11 - Vista traseira do gabinete e indicação dos componentes.

Para controle manual do ar de entrada é usado um potenciômetro, este permite uma regulação manual da tensão do ventilador entre 0 e 12V, analogamente ao controle automático. Salienta-se que para a operação manual a chave indicada por 9 deve permanecer ligada, a qual isola o sistema de operação automática, indicado na figura por 16. O 17 trata do terminal de alimentação externa do ventilador do ar de reação, 18 representa o sensor de temperatura e umidade do ar e por fim, em 19 indica-se o terminal de alimentação do ventilador de refrigeração. A ilustração do protótipo completo é mostrada na Figura 5.12.

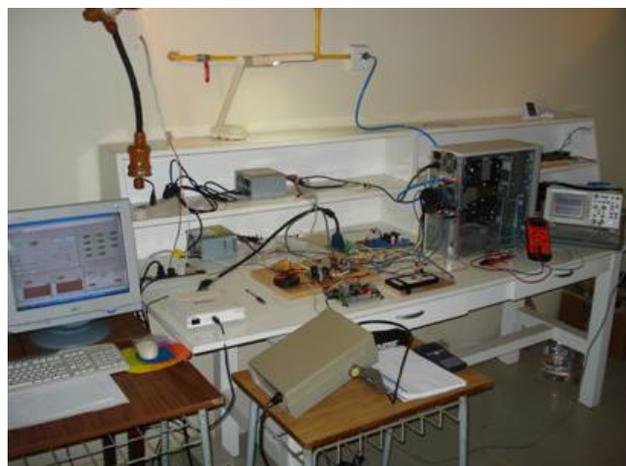


Figura 5.12 - Ilustração do protótipo.

### **5.3. Resumo do capítulo**

Este capítulo apresentou uma descrição detalhada do programa em Labview para supervisionar e controlar a pilha SR-12. Através da interface gráfica do programa é possível o acompanhamento on-line das principais grandezas. Além de realizar o acompanhamento o programa gera os sinais PWM de controle dos ventiladores e dos componentes auxiliares do protótipo. O capítulo também apresentou a construção mecânica dos equipamentos auxiliares. A instalação mecânica do cartucho, como exposto acima, é de grande importância, pois cria as condições mínimas necessárias ao seu funcionamento e estabelece as condições de segurança para os posteriores ensaios.

## CAPÍTULO 6

**RESULTADOS EXPERIMENTAIS****6.1. Análise estática do cartucho SR-12**

Os ensaios estáticos possuem o objetivo de avaliar a influência das grandezas de controle sobre a eficiência da pilha para qualquer variação de corrente. Assim sendo, serão avaliadas a variação da pressão do combustível, temperatura do ar, umidade e fluxo do ar sobre a curva de polarização. Foram observados durante os ensaios os seguintes detalhes: a redução da pressão de  $H_2$ , a produção de calor com o aumento da corrente, o consumo do combustível e as relações entre a eficiência e potência.

Os ensaios foram realizados com variações de 0,50A na carga, em intervalos de 20 segundos entre cada medição, como indicado no manual deste gerador. Para realizar o aumento linear da corrente foi utilizada uma carga eletrônica variada chaveadamente, detalhada no Capítulo 4. Como nesse teste visou-se a avaliação da pilha fora dos limites de operação, não é utilizado o controle completo em Labview, ou seja, o levantamento desses dados foi feito manualmente.

**6.1.1. Variação da pressão do hidrogênio**

Os valores indicados na Tabela 6.1 foram usados para realizar o teste de variação de pressão. Este teste verifica a influência da variação da pressão do hidrogênio na tensão de saída e, conseqüentemente, na eficiência da pilha. Observa-se que a temperatura do ar de reação ( $T_{ent}$ ), a umidade relativa do ar ( $UR_{ent}$ ) e a quantidade (vazão) de ar ( $Q_{ar}$ ) mantiveram-se aproximadamente constante, conforme dados da Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores usados para a variação de pressão do hidrogênio.

	<i>Ensaio 1</i> $P_{H_2} = 3,09(psi)$	<i>Ensaio 2</i> $P_{H_2} = 6,36(psi)$	<i>Ensaio 3</i> $P_{H_2} = 8,36(psi)$
$T_{ent} (°C)$	19,80	19,70	19,70
$UR_{ent} (\%)$	87,0	88,0	88,0
$Q_{ar} (L/min)$	1698	1698	1698

Três ensaios foram realizados usando como pressão padrão a indicada pelo fabricante que é de 6,36 psi. Uma variação de 31,4% para mais foi analisada e também um pressão de 48,58% para menos. No gráfico mostrado na Figura 6.1 observa-se que para a variação de 31,4% (8,36 psi) a tensão de saída teve uma diferença muito pequena, em torno de 0,5%. Para a variação de 48,58% (3,09 psi) obteve-se uma diferença de tensão de 1% nas regiões de concentração e ôhmica e uma variação média um pouco maior, de 3%, na região da polarização de ativação.

Com isso, conclui-se que a variação de pressão tanto para mais como para menos não tem uma influência muito significativa na eficiência da pilha. Como explicado no Capítulo 4, a taxa de consumo de hidrogênio é dada pela quantidade de íons positivos que atravessam a membrana por unidade de tempo, dependendo da corrente requerida pela CaC. Ou seja, para uma mesma corrente, aproximadamente a mesma quantidade de íons estará passando, mesmo com uma variação significativa de pressão do gás.

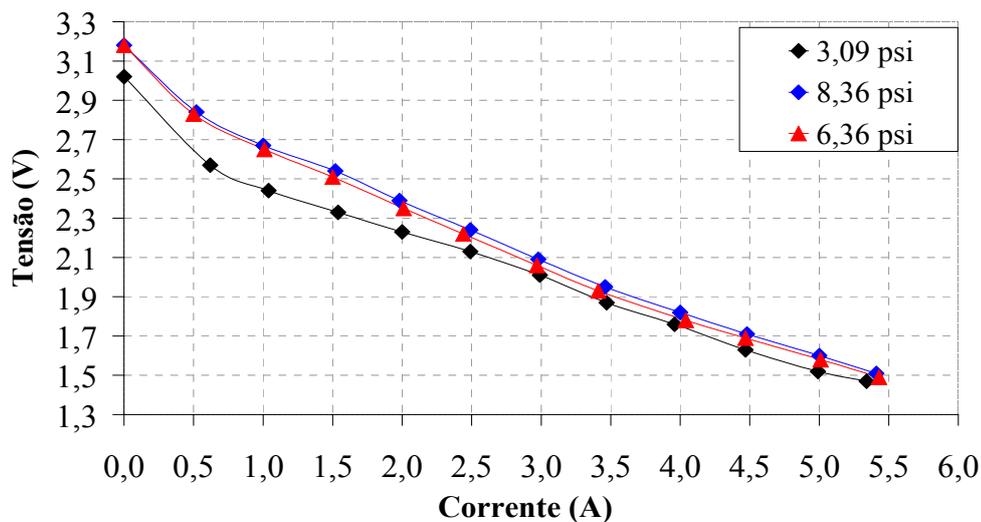


Figura 6.1 - Curva característica de polarização para variação da pressão do hidrogênio.

### 6.1.2. Variação da temperatura do ar de reação

Os três ensaios para avaliar a influência da temperatura do ar de reação na eficiência da pilha foram realizados mantendo-se constante a vazão do ar, a pressão do hidrogênio e a umidade relativa do ar. Apenas variou-se a temperatura do ar de reação, como se observa na Tabela 6.2 onde é mostrado também a temperatura inicial do ar injetado ( $T_{ent\_inicial}$ ), bem como a temperatura do ar na saída da CaC, no final do ensaio ( $T_{sai\_final}$ ). Observa-se também uma pequena variação da umidade devido ao efeito secante do aumento de temperatura.

Tabela 6.2 - Valores usados para o teste de variação da temperatura.

	<i>Ensaio 1</i> $T_{ent} = 19,70(^{\circ}C)$	<i>Ensaio 2</i> $T_{ent} = 51,60(^{\circ}C)$	<i>Ensaio 3</i> $T_{ent} = 56,20(^{\circ}C)$
$T_{ent\_inicial} (^{\circ}C)$	19,00	30,04	28,40
$T_{sai\_final} (^{\circ}C)$	23,9	33,1	31,18
$UR_{ent}(\%)$	88,0	81,0	82,0
$P_{H_2} (psi)$	6,0	6,0	6,0
$Q_{ar} (L/min)$	1698	1698	1698

A faixa padrão de operação do cartucho SR-12, segundo o fabricante é de 5 a 35°C. Portanto, considera-se como padrão o valor intermediário de 19,7°C. Dois ensaios foram realizados com acréscimo de temperatura de 51,6°C e 56,20°C como forma de avaliar o impacto sobre a tensão de saída.

Observa-se na Figura 6.2 que para os dois ensaios com temperaturas maiores ocorre um aumento significativo da queda de tensão ao longo de toda região de ativação e no início da região ôhmica, quando comparadas com a temperatura padrão (variação máxima de 16%). No final da região ôhmica e em toda a região de concentração observa-se que a temperatura não possui influência significativa na tensão. Essa informação é muito importante para projetistas de sistemas com células a combustível, pois permite a escolha do ponto de operação que sofrerá menor queda de tensão e, conseqüentemente, maior rendimento, devido às variações externas de temperatura.

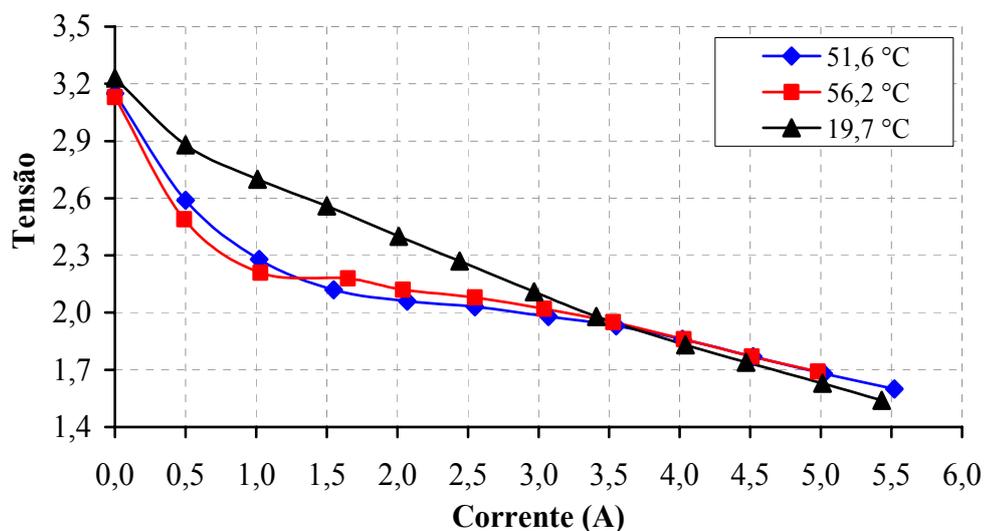


Figura 6.2 - Curva característica de polarização para variação da temperatura.

### 6.1.3. Variação da umidade relativa do ar de reação

Este ensaio trata da variação da umidade do ar de reação sobre a tensão da pilha. Realizaram-se dois ensaios com umidade de 88,0% e 72,0%, como se pode observar na Tabela 6.3. Neste ensaio, manteve-se constante a pressão do hidrogênio, o fluxo de ar e a temperatura do ar de reação.

Tabela 6.3 - Valores usados para os testes de variação da umidade.

	<b>Ensaio 1</b> $UR_{ent} = 88,0(\%)$	<b>Ensaio 2</b> $UR_{ent} = 72,0(\%)$
$T_{ent} (^{\circ}C)$	19,70	18,40
$T_{sai\_final} (^{\circ}C)$	23,90	22,20
$P_{H_2} (psi)$	6,0	6,0
$Q_{ar} (L/min)$	1698	1698

No gráfico da Figura 6.3 pode-se notar o impacto da variação da umidade sobre a tensão da pilha. Na região de ativação a curva em que a umidade é menor (72%) possui uma queda maior em relação à curva com maior umidade (variação máxima da tensão de 4%). No entanto, na região central (região ôhmica) ocorre uma inversão de sinal. A curva com maior rendimento passa a ser a que possui menor umidade. Isso acontece, pois segundo Larminie e Dicks (2003) a queda por ativação é diretamente proporcional ao conteúdo de água na membrana. Assim sendo, ocorre uma elevação na tensão de ativação e uma queda na eficiência da pilha. Entretanto, com o aumento da corrente a queda por ativação tende a desaparecer substituída pela queda ôhmica e pela queda de concentração. Na região de concentração, o acúmulo de umidade na membrana afeta o transporte de cargas. De acordo com Larminie e Dicks (2003) a queda por concentração diminui com esse acúmulo de água aumentando a eficiência da CaC. Porém deve-se evitar que a umidade encontre-se a níveis elevados (100%), pois isso afetaria o transporte de íons e conseqüentemente a eficiência.

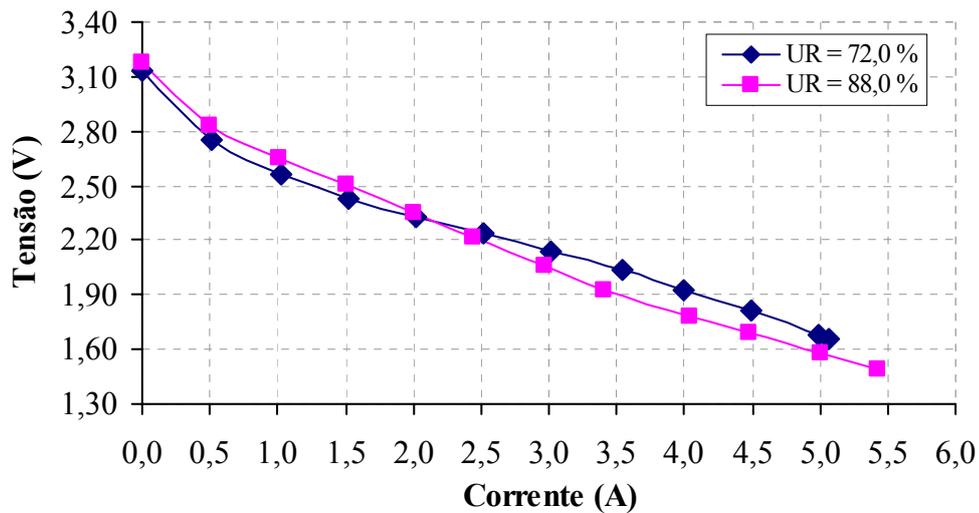


Figura 6.3 - Curva característica de polarização para a variação da umidade.

#### 6.1.4. Variação do fluxo do ar de reação

Para avaliar o impacto da variação do fluxo de ar sobre a tensão da pilha realizaram-se três ensaios onde se manteve constante a pressão do hidrogênio, a temperatura da membrana e a umidade relativa, como se pode observar na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Valores usados para os testes de variação do fluxo do ar.

	<b>Ensaio 1</b> $Q_{ar} = 501(L/min)$	<b>Ensaio 2</b> $Q_{ar} = 1698(L/min)$	<b>Ensaio 3</b> $Q_{ar} = 3066(L/min)$
$T_{ent} (^{\circ}C)$	18,50	18,50	18,50
$T_{sai\_inicial} (^{\circ}C)$	21,30	19,90	21,40
$T_{sai\_final} (^{\circ}C)$	22,90	22,20	22,50
$UR_{ent} (\%)$	72,0	72,0	72,0
$P_{H_2} (psi)$	6,0	6,0	6,0

Na Figura 6.4 pode-se concluir que a taxa de ar para maior eficiência da pilha é a menor de todas, ou seja, com 501 L/min. A maior variação na eficiência ocorreu na região de ativação, com variações de até 10%. Este resultado está relacionado com a umidade da membrana, ou seja, como o ar (ou vento) possui efeito secante, com níveis mais altos de ar ocorrerá remoção de água das paredes do cátodo, como visto na Figura 6.3 e com isso, uma diminuição da eficiência. Entretanto, é necessário controlar a entrada de ar com o propósito de manter ar suficiente para a potência solicitada pela carga e para que a reação eletroquímica ocorra de forma satisfatória.

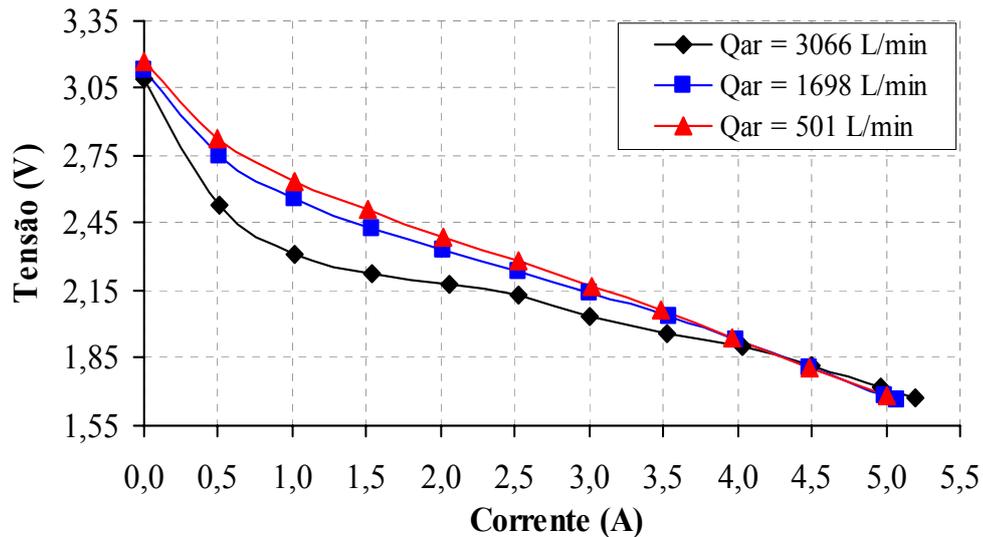


Figura 6.4 - Curva característica de polarização para a variação do fluxo de ar.

#### 6.1.5. Aumento da temperatura e diminuição da pressão do hidrogênio

Durante os ensaios observou-se que a variação da temperatura interna da CaC, com o aumento da corrente, se mantém inalterada, independentemente das condições das variáveis externas. Essa variação de temperatura com o aumento da corrente é mostrada na Figura 6.5.

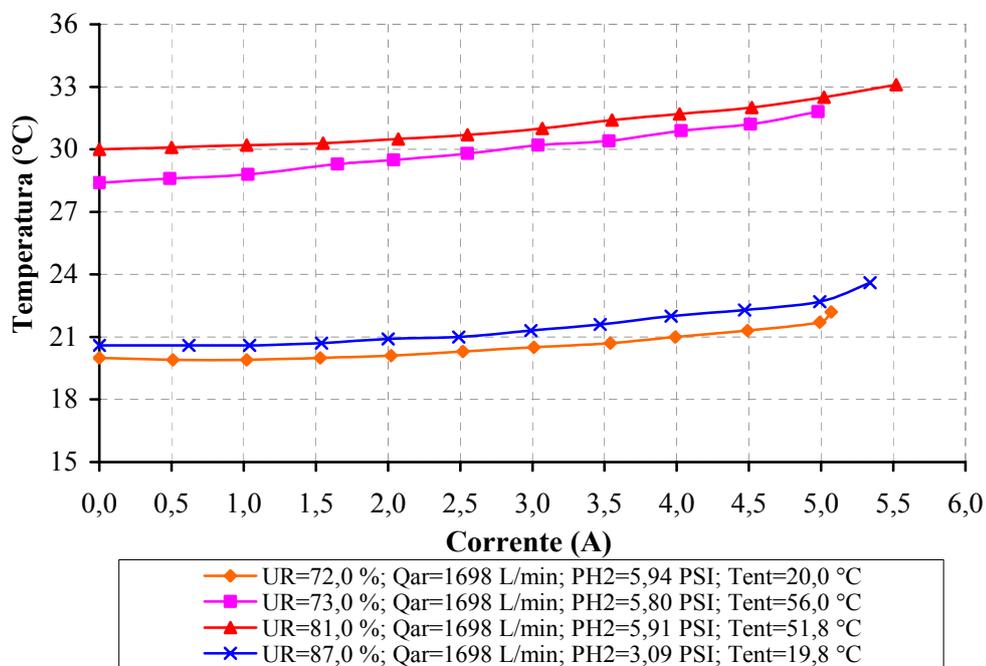


Figura 6.5 - Variação da temperatura com o aumento da corrente.

Observou-se também uma ligeira queda na pressão da canalização de hidrogênio com o aumento da potência, como se vê na Figura 6.6. Isso ocorre, pois o consumo de combustível

aumenta com o acréscimo de corrente. Como a pressão de hidrogênio é constante, há uma diminuição na sua densidade no interior da canalização, ocasionando queda de pressão na linha.

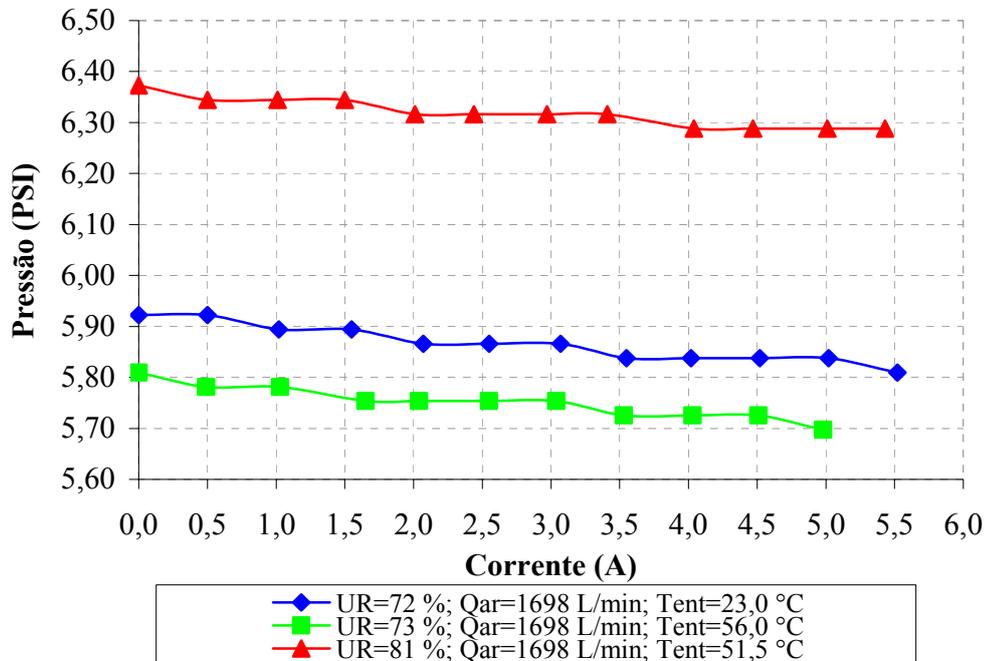


Figura 6.6 - Variação da pressão de hidrogênio com o aumento da corrente.

#### 6.1.6. Relação entre os ensaios de variações com o consumo de hidrogênio e a potência

A seguir é ilustrada a relação entre a variação dos parâmetros externos com o consumo de hidrogênio. Esta análise é importante, pois permite ao projetista de sistemas com CaC escolher qual o melhor ponto de operação com base na região que tenha uma menor influência externa aos parâmetros e também o ponto de menor consumo de combustível. A Figura 6.7 mostra a variação da tensão (ou eficiência) devido a mudanças de umidade, em função do consumo de hidrogênio e também em função da potência da pilha. Para o mesmo consumo de hidrogênio (consumo dado em Normal Metro Cúbico por Hora), podem-se obter valores diferenciados de potência e rendimento. Portanto, pode-se conseguir melhor desempenho da CaC do ponto de vista do consumo e da potência, apenas interferindo no valor da umidade.

A Figura 6.8 mostra a variação de tensão (ou eficiência) devido à variação na temperatura, em função do consumo de hidrogênio e da potência da pilha. Assim, para um mesmo consumo de hidrogênio, podem-se obter valores diferenciados de potência. Ou seja, o mesmo acontece com a temperatura, onde se pode conseguir um melhor desempenho da CaC

do ponto de vista do consumo, trabalhando-se na mesma corrente de projeto, apenas interferindo no valor da temperatura.

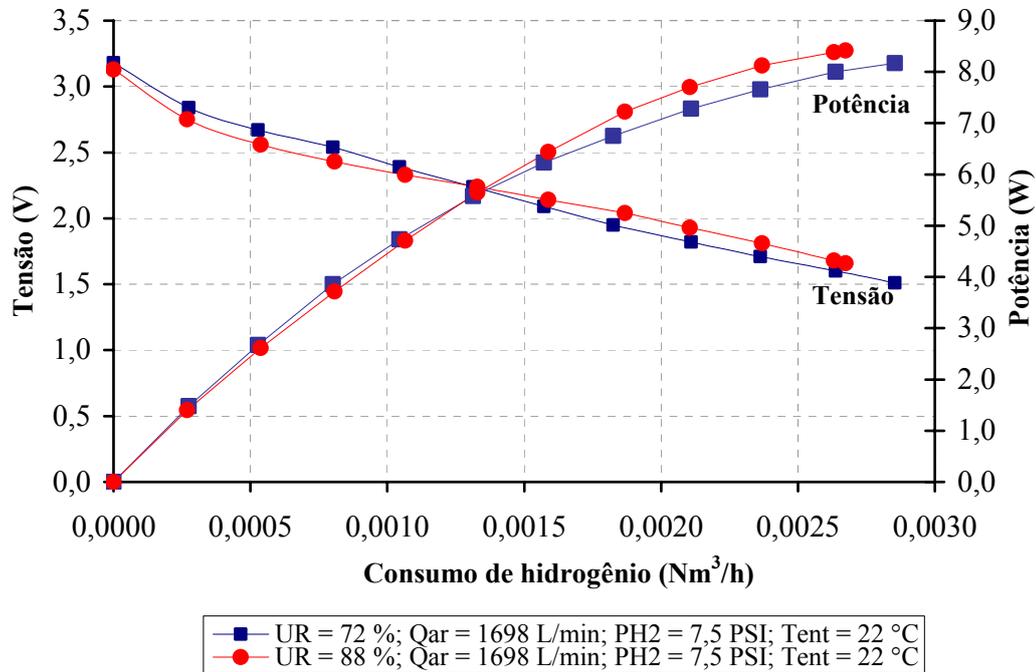


Figura 6.7 - Tensão em função do consumo com variação da umidade.

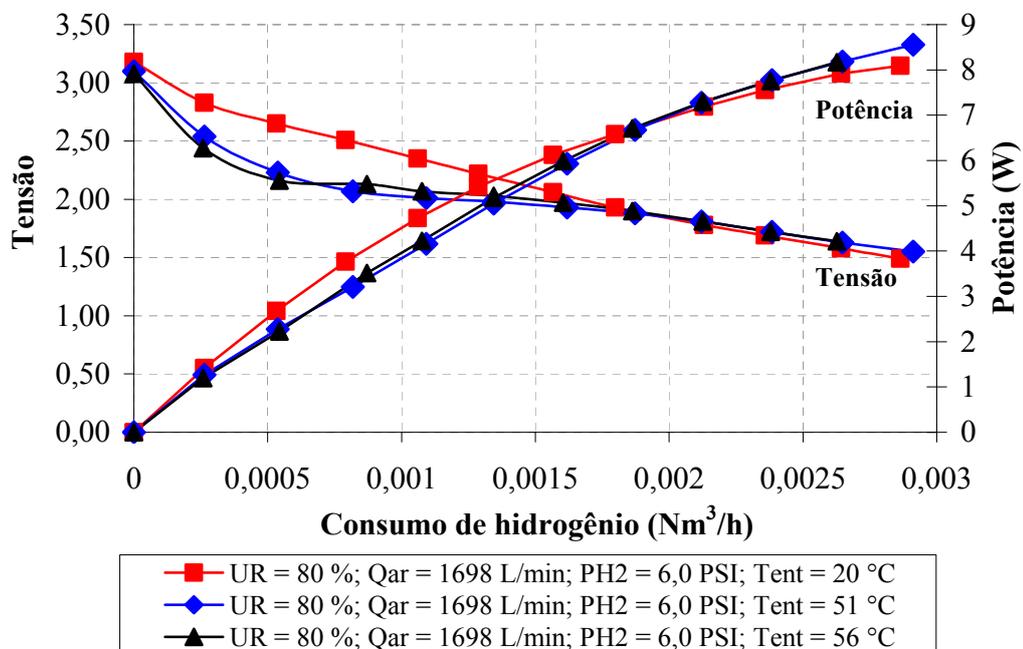


Figura 6.8 - Tensão em função do consumo com variação da temperatura.

A Figura 6.9 mostra a variação de tensão devido à variação do fluxo de ar para a CaC, em função do consumo de hidrogênio e da potência da pilha.

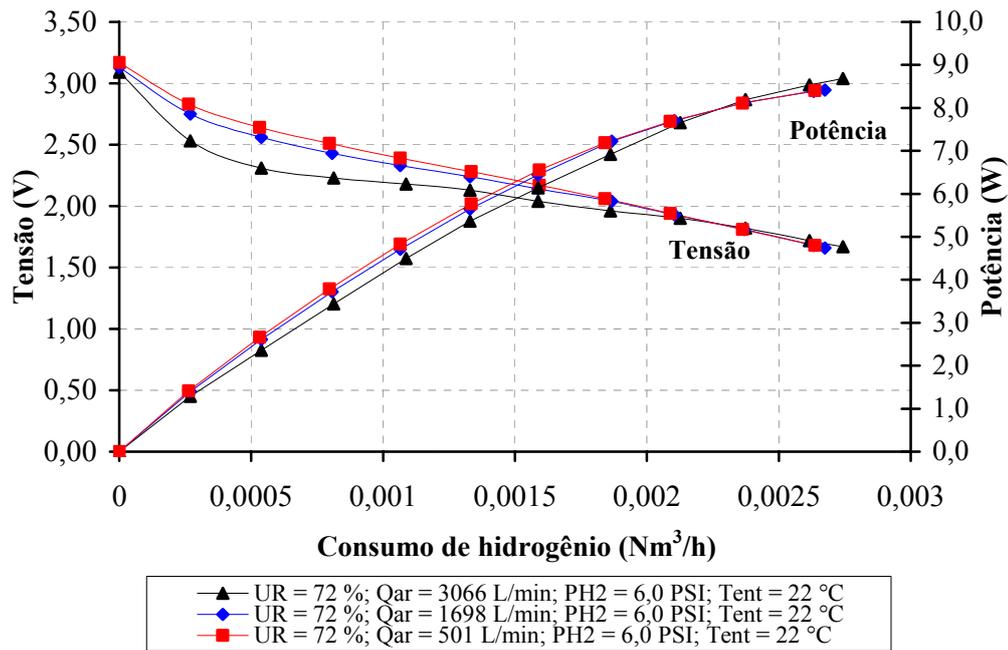


Figura 6.9 - Tensão em função do consumo com variação do fluxo de ar.

## 6.2. Análise dinâmica do cartucho SR-12

Um ponto importante na análise de células a combustível é a obtenção dos parâmetros construtivos das mesmas. Esses parâmetros ocasionam maior confiabilidade para os modelos matemáticos. De acordo com a seção 3.2 os principais parâmetros que se deve obter são: capacitância da pilha ( $C$ ), resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) e resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ). Esses valores foram obtidos a partir do cartucho SR-12 usando-se uma interrupção de corrente, também comentado no Capítulo 3. Na Tabela 6.5 tem-se os valores das variáveis da CaC

Tabela 6.5 - Variáveis da CaC para este ensaio.

<i>Variáveis</i>	$T_{ent} (^\circ\text{C})$	$UR_{ent} (\%)$	$P_{H_2} (\text{psi})$	$Q_{ar} (\text{L/min})$
<i>Valores</i>	19,8	87,0	7,0	576

Na Figura 6.10 mostra-se as formas de onda da tensão e da corrente obtidas no ensaio. No mesmo gráfico são mostrados os pontos relativos à tensão ôhmica e à tensão no capacitor. Utilizando-se a metodologia de cálculo apresentada por Farret e Simões (2006) obtem-se os parâmetros da CaC onde são mostrados na Tabela 6.6.

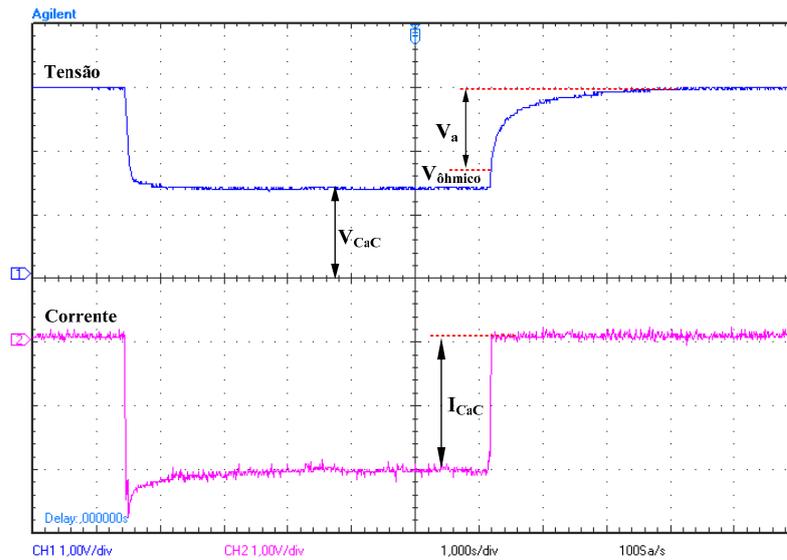


Figura 6.10 - Curva experimental para o teste dinâmico.

Tabela 6.6 - Valores dos parâmetros para a SR-12.

Variáveis	$C(F)$	$R_{eq}(\Omega)$	$R_{ohm}(\Omega)$
Valores	0,036	0,23	0,54

### 6.3. Análise em regime permanente da SR-12

Realizaram-se três ensaios com a pilha em regime permanente e utilizando-se o programa completo de monitoramento e controle. Para uma corrente constante durante aproximadamente 15 minutos de operação adquiriu-se dados de todas variáveis do circuito. Os ensaios foram realizados para três pontos da curva de polarização: um valor de corrente na região de ativação, um valor de corrente na região ôhmica e um valor de corrente na região de concentração. Mantiveram-se as variáveis de controle praticamente constantes para os três ensaios, e variou-se apenas o ponto de operação da pilha. Com isso, visou-se uma análise comparativa do consumo dos reagentes, da produção e do rendimento nas três regiões de operação durante esse intervalo de tempo. Avaliou-se o consumo de ar, oxigênio e hidrogênio e a produção de água e calor. Essa análise é realizada on-line através do programa Labview.

#### 6.3.1. Região da polarização de ativação

Para o teste de operação na região das quedas de ativação a corrente média foi estabelecida em torno de 0,61A. Na Figura 6.11 pode-se observar os dados dos termopares de

dentro da pilha ( $T_1$  a  $T_4$ ), do sensor de temperatura do ar de reação ( $T_{novus}$ ) e do sensor de umidade do ar de reação ( $UR_{novus}$ ). Percebe-se uma umidade relativa ambiente bastante baixa para os padrões das CaCs, o que ocasiona uma temperatura de operação também baixa.

Na Figura 6.12 tem-se os dados da pressão de hidrogênio e da vazão de ar. A pressão média é mantida, aproximadamente constante, em torno de 6,82 psi, e a vazão média de ar em torno de 576,53 L/min. Observa-se um pequeno decréscimo de pressão ao longo do tempo, o que é explicado pelo próprio consumo da CaC e conseqüente diminuição do  $H_2$  na canalização. Na Figura 6.13 tem-se os valores de corrente, tensão, potência e rendimento da pilha. Para a potência média de 1,57W ao longo dos 15 minutos dentro da região de ativação, o rendimento médio ficou em torno de 43,32%.

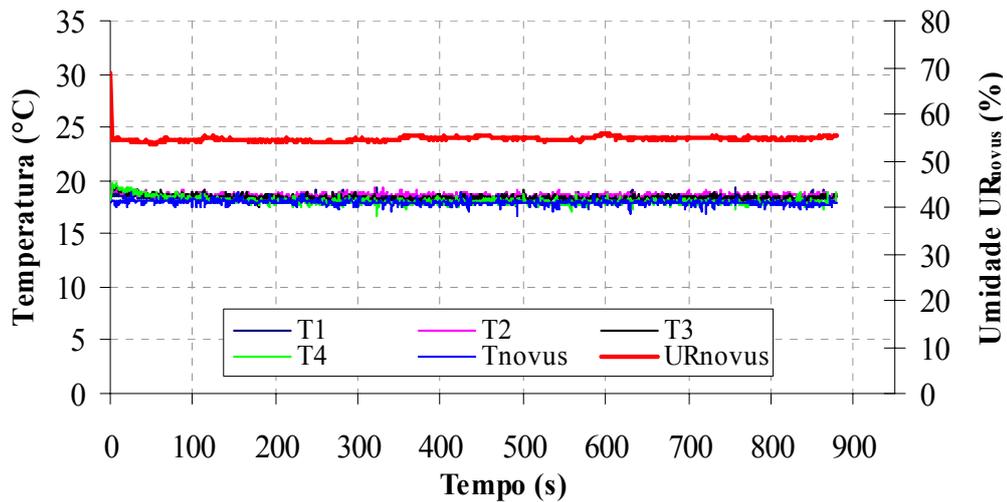


Figura 6.11 - Temperatura interna e umidade do ar de reação.

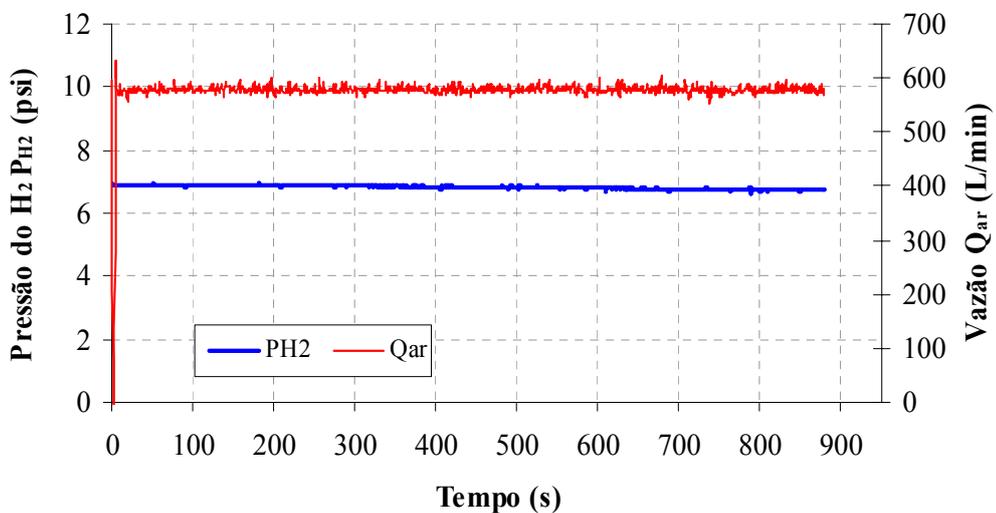


Figura 6.12 - Pressão do hidrogênio e quantidade de ar injetado.

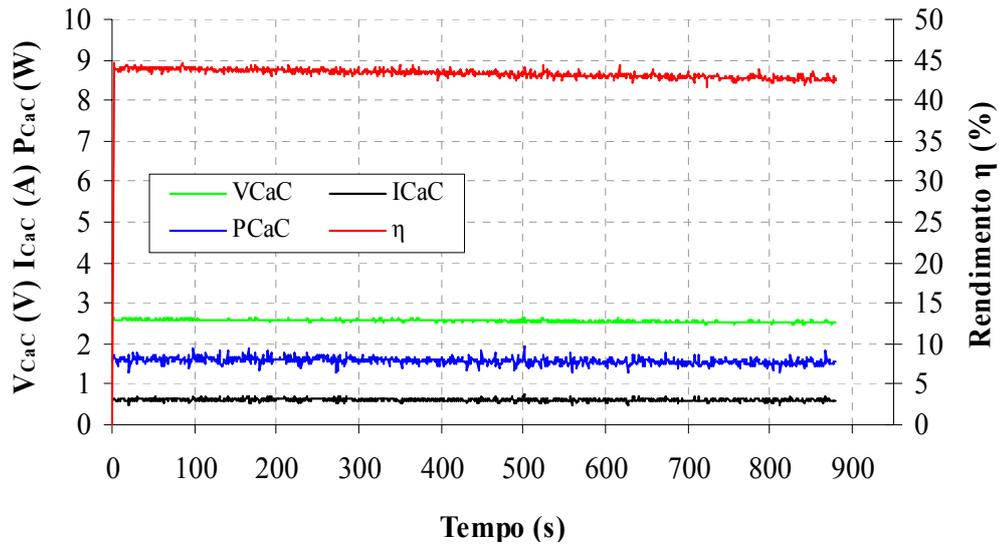


Figura 6.13 - Grandezas elétricas e rendimento na região de ativação.

O Quadro 6.1 indica os resultados da aquisição on-line do consumo e da produção da pilha. No mesmo quadro são fornecidos dados da taxa média instantânea de consumo e produção e também da produção e consumo acumulados neste período de operação da CaC.

Quadro 6.1 - Valores para 15 minutos de operação (ativação).

Consumo da SR-12 Região de ativação ( $I_{méd} = 0,61A$ )						Produção da SR-12 Região de ativação ( $I_{méd} = 0,61A$ )			
Ar de reação		Oxigênio		Hidrogênio		Água		Calor	
Taxa <sub>méd</sub> (NL/min)	(L)	Taxa <sub>méd</sub> (NL/min)	(L)	Taxa <sub>méd</sub> (NL/min)	(L)	Taxa <sub>méd</sub> (L/min)	(L)	Taxa <sub>méd</sub> (W = J / s)	(J)
0,044	0,646	0,010	0,150	0,001	0,019	0,011	0,169	1,455	1278,69

### 6.3.2. Região da polarização ôhmica

Para o teste de operação na região ôhmica a corrente média foi estabelecida em torno de 3,14A. Nas Figuras 6.14 e 6.15 pode-se verificar e confirmar que todas as grandezas de controle para o ensaio 2 mantiveram-se aproximadamente semelhantes ao ensaio 1.

Na Figura 6.16 tem-se os valores de corrente, tensão, potência e rendimento da pilha. Para a potência média de 5,63W ao longo desse período de operação, o rendimento médio ficou em torno de 30,23%.

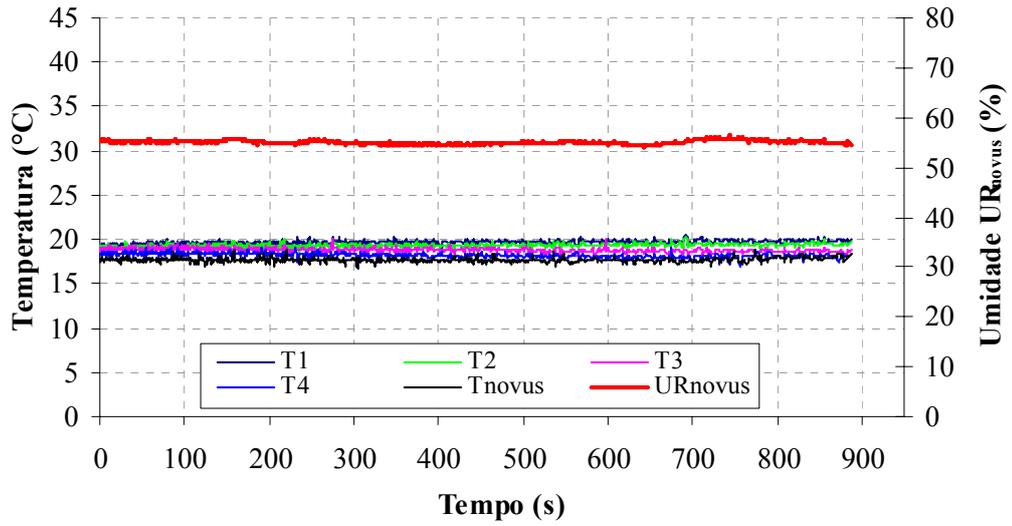


Figura 6.14 - Temperatura interna e umidade do ar de reação.

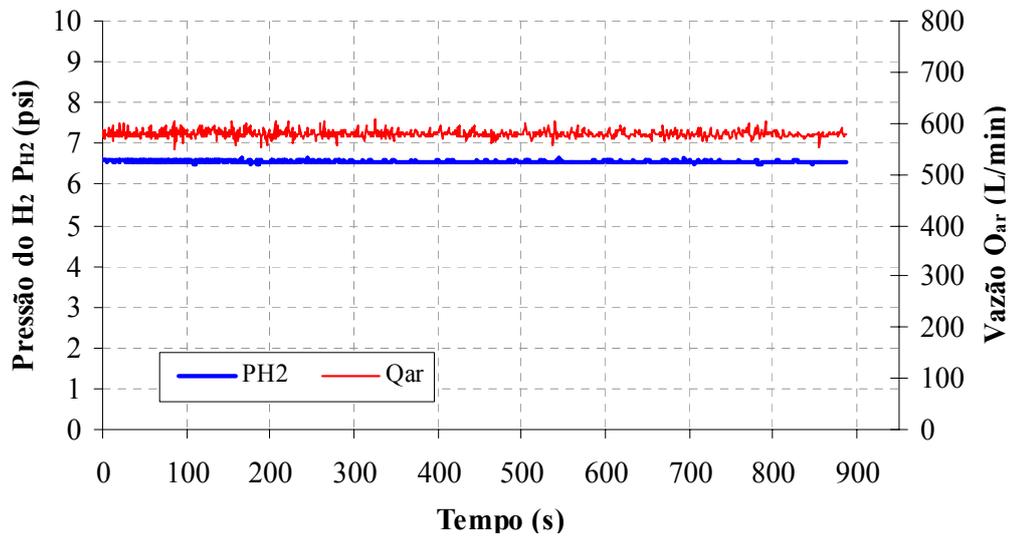


Figura 6.15 - Pressão do hidrogênio e quantidade de ar injetado.

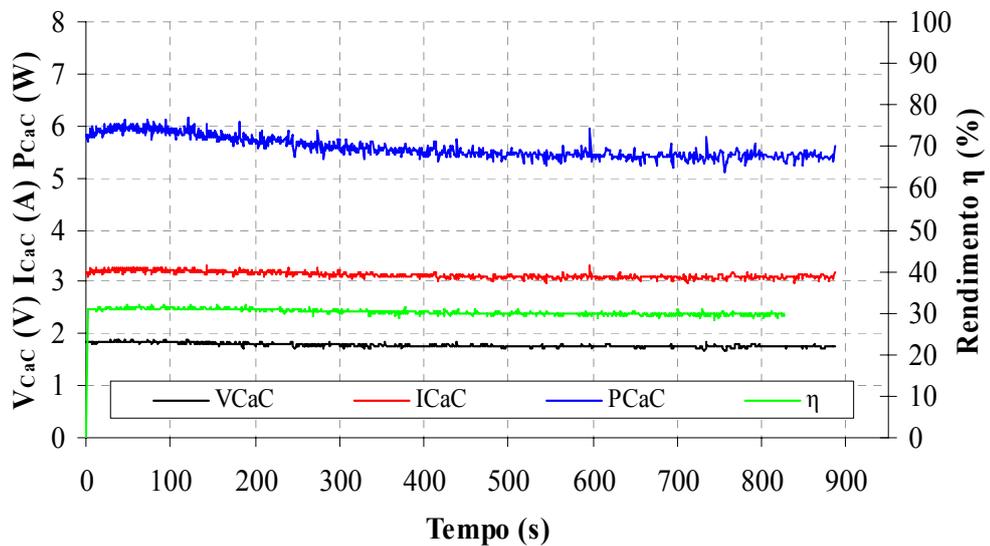


Figura 6.16 - Grandezas elétricas e rendimento para a região ôhmica.

No Quadro 6.2 são indicados os resultados da aquisição on-line de consumo e produção da SR-12 para a região da queda ôhmica.

Quadro 6.2 - Valores para 15 minutos de operação (ôhmica).

Consumo da SR-12 Região ôhmica ( $I_{méd} = 3,14A$ )						Produção da SR-12 Região ôhmica ( $I_{méd} = 3,14A$ )			
Ar de reação		Oxigênio		Hidrogênio		Água		Calor	
$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (L/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ ( $W = J/s$ )	(J)
0,157	2,323	0,036	0,539	0,004	0,068	0,041	0,607	5,197	4594,50

### 6.3.3. Região da polarização de concentração

Para o teste de operação na região de concentração a corrente média foi estabelecida em torno de 4,96A. Nas Figuras 6.17 e 6.18 pode-se verificar e confirmar que todas as grandezas de controle para o ensaio 3 mantiveram-se aproximadamente semelhantes aos ensaios 1 e 2.

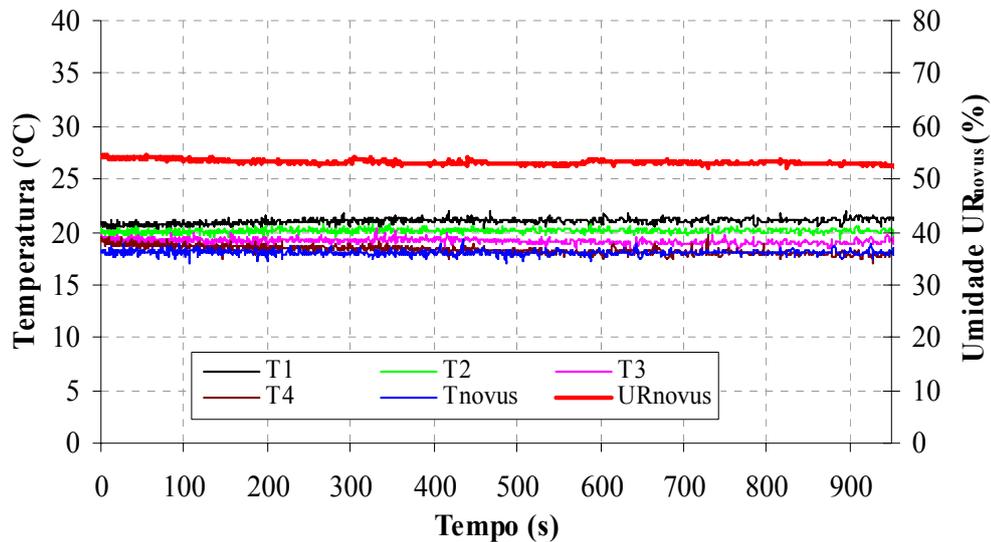


Figura 6.17 - Temperatura interna e umidade do ar de reação.

Salienta-se que nos Quadros 6.1, 6.2 e 6.3 as vazões dos gases são dadas em “Normal Litros por Minuto”. Trata-se de uma convenção em que os valores de vazão de um gás são acompanhados por valores padrão de sua pressão, temperatura e umidade, sendo estes 1 atm de pressão, 0°C de temperatura e 0% de umidade.

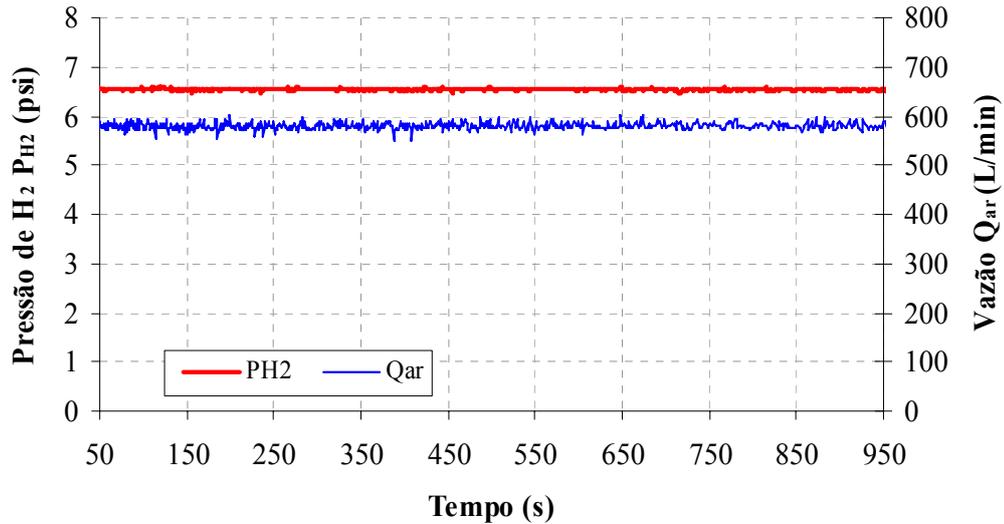


Figura 6.18 - Pressão da canalização de hidrogênio e vazão de ar.

Na Figura 6.19 mostra-se os valores de corrente, tensão, potência e rendimento da pilha. Para a potência média de 6,83W ao longo desse período de operação, o rendimento médio ficou em torno de 23,25%.

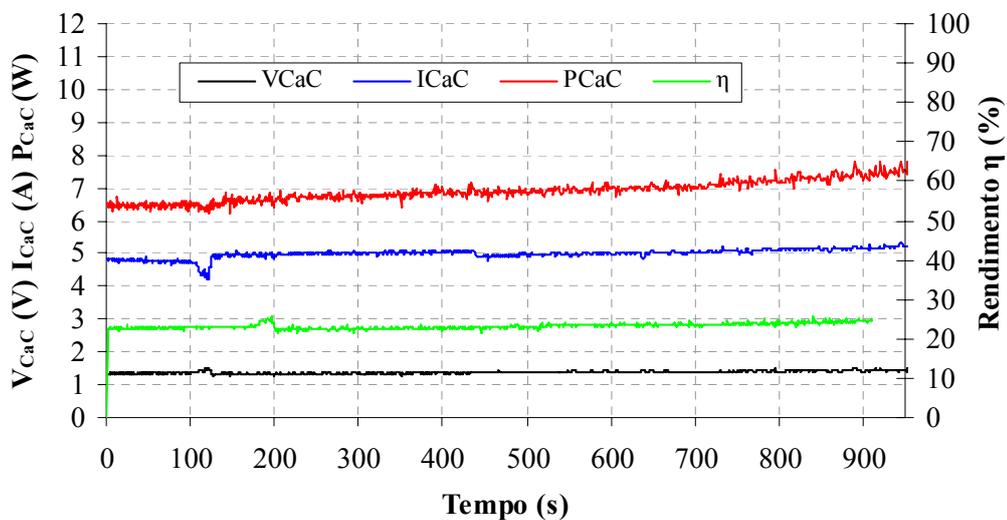


Figura 6.19 - Grandezas elétricas e rendimento da CaC.

No Quadro 6.3 estão os resultados da aquisição on-line de consumo e produção da SR-12 na região da queda de concentração.

Nas Figuras 6.20 e 6.21 são mostrados os sinais de tensão dos ventiladores, sinais estes modulados por largura de pulso. A tensão média de acionamento dos ventiladores pode ser variada de 0 a 12V, tanto para o ventilador de injeção do ar na pilha como para o de ventilação do gabinete.

Quadro 6.3 - Valores para 15 minutos de operação (concentração).

Consumo da SR-12 Região de concentração ( $I_{méd} = 4,96A$ )						Produção da SR-12 Região de concentração ( $I_{méd} = 4,96A$ )			
Ar de reação		Oxigênio		Hidrogênio		Água		Calor	
$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (NL/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ (L/min)	(L)	$Taxa_{méd}$ ( $W = J / s$ )	(J)
0,190	3,090	0,044	0,717	0,005	0,090	0,049	0,808	6,264	6110,67

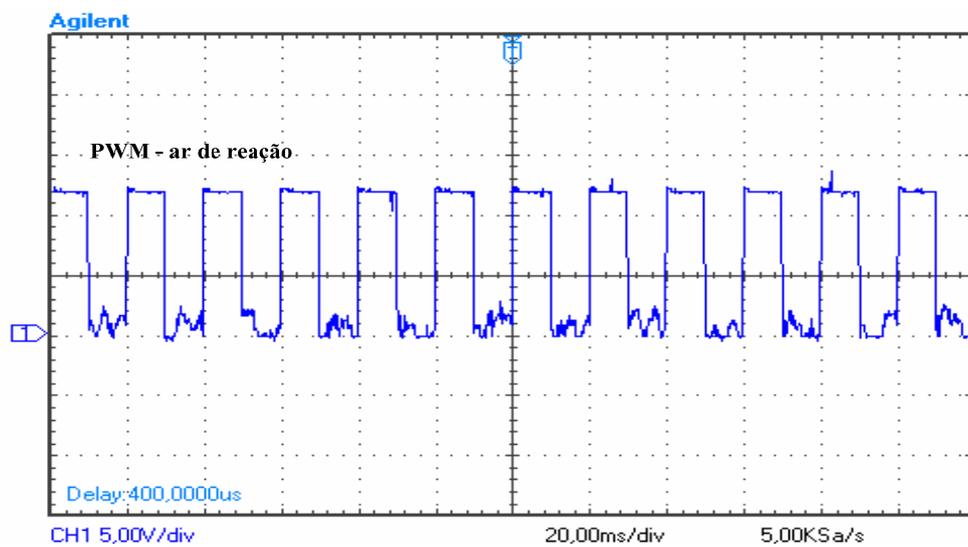


Figura 6.20 - Sinal de tensão no ventilador do ar de reação.

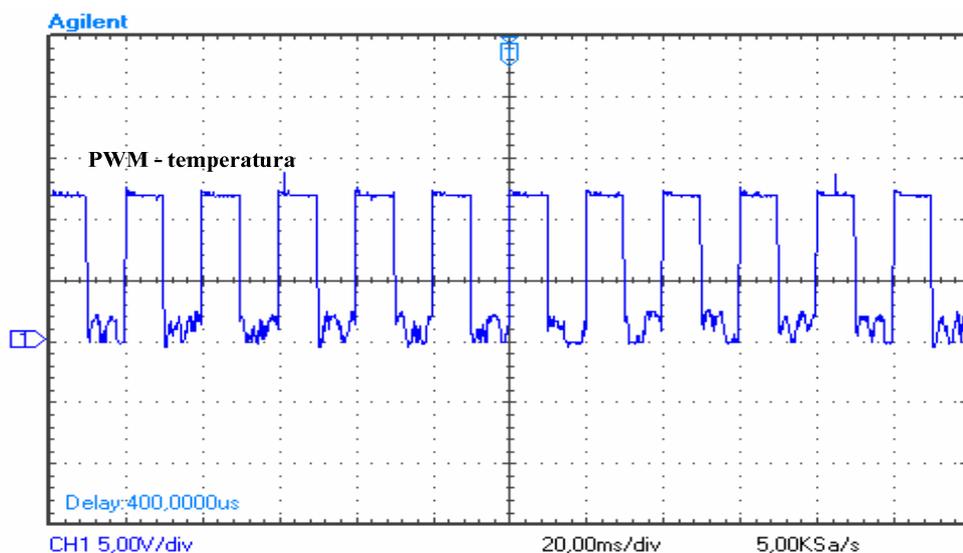


Figura 6.21 - Sinal de tensão no ventilador de refrigeração.

#### 6.4. Resultados da aplicação da técnica de curto-circuito nas membranas

Esse ensaio possui o objetivo de avaliar o impacto que a técnica de *by-pass* ou curtos-circuitos ocasiona na potência e na eficiência da pilha. As variáveis de controle da pilha foram mantidas aproximadamente constantes, de acordo com a Tabela 6.7. Assim sendo, isolou-se nesta análise da eficiência apenas a influência dos *by-passes*.

Tabela 6.7 - Grandezas de controle para o teste com *by-pass*.

<i>Variáveis</i>	$T_{1\_méd}$ (°C)	$T_{2\_méd}$ (°C)	$T_{3\_méd}$ (°C)	$T_{4\_méd}$ (°C)	$T_{novus\_méd}$ (°C)	$UR_{novus\_méd}$ (%)	$P_{H_2méd}$ (psi)	$Q_{ar\_méd}$ (L/min)
<i>Valores</i>	20,68	19,59	18,50	16,09	13,38	58,69	6,49	588,57

##### 6.4.1. Ensaio 1 - 50ms

Para o primeiro ensaio realizou-se a aplicação dos curtos com o ciclo de operação das chaves proposto por Yap et al. (2005), consistindo em manter-se a chave (Mosfets) conduzindo por 50ms e bloqueando-as por 20 segundos. Realizaram-se análises em regime permanente e obtenção da curva característica de polarização. Na Figura 6.22 ilustra-se o teste em regime permanente onde são mostradas corrente, tensão e potência da pilha. No instante de 900s aciona-se o *by-pass* e em 1200s a rotina dos curtos é desligada. Nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25 mostra-se a curva característica de polarização onde se compara a potência e a tensão com e sem o procedimento de *by-pass*. O teste de polarização consiste na análise da potência e da tensão em função do aumento de corrente. De acordo com os resultados obtidos observa-se que para esse primeiro ensaio, a aplicação do chaveamento não ocasionou uma variação significativa na potência da pilha, tanto na operação em regime permanente como na curva de polarização.

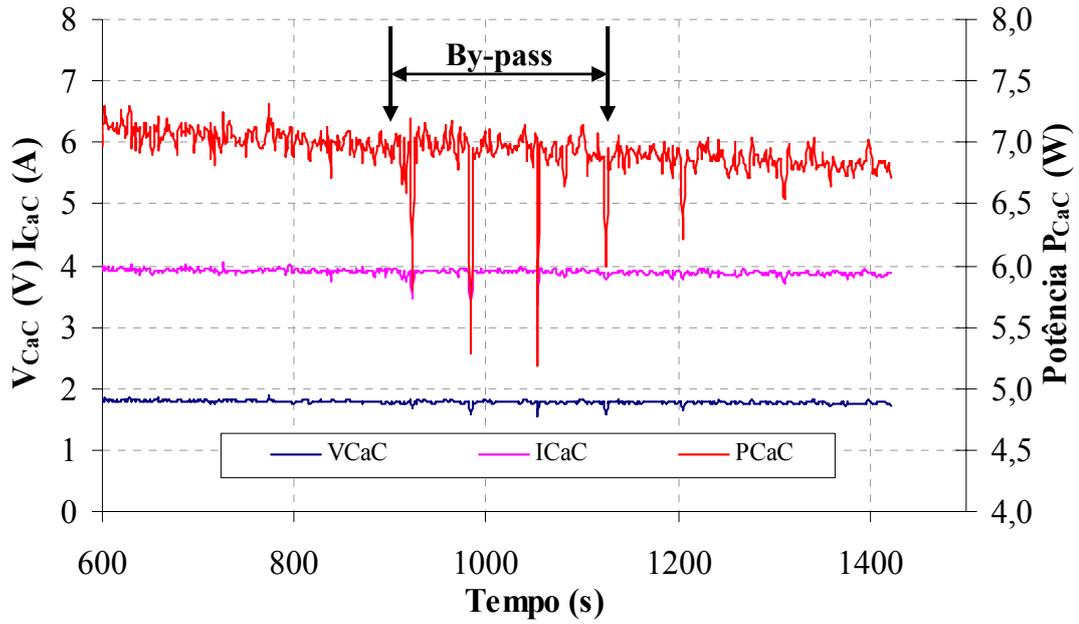


Figura 6.22 - Tensão, corrente e potência em regime permanente da CaC.

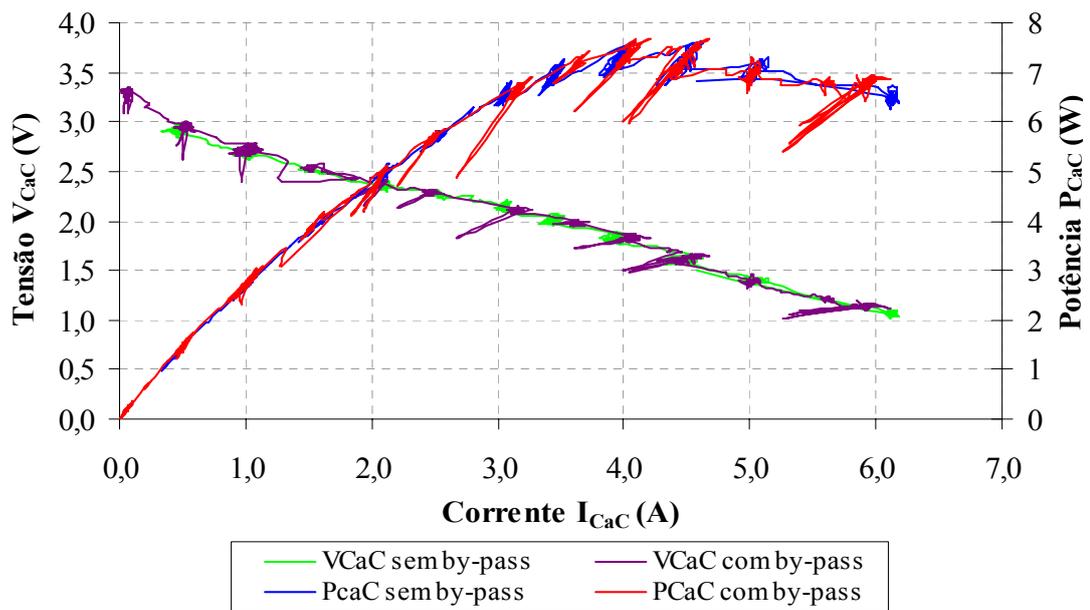


Figura 6.23 - Curva experimental de polarização.

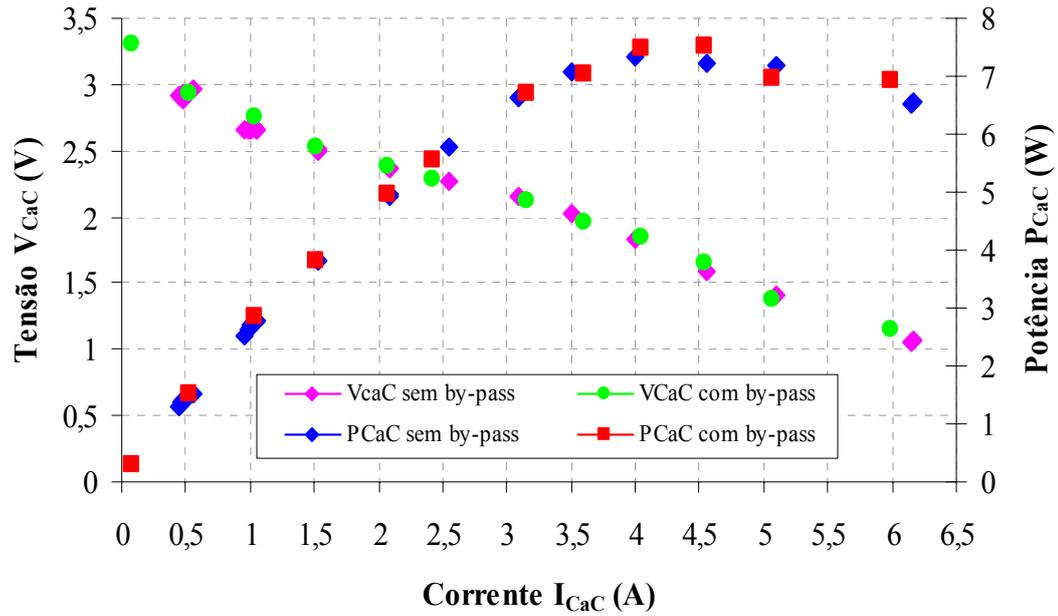


Figura 6.24 - Curva experimental de polarização.

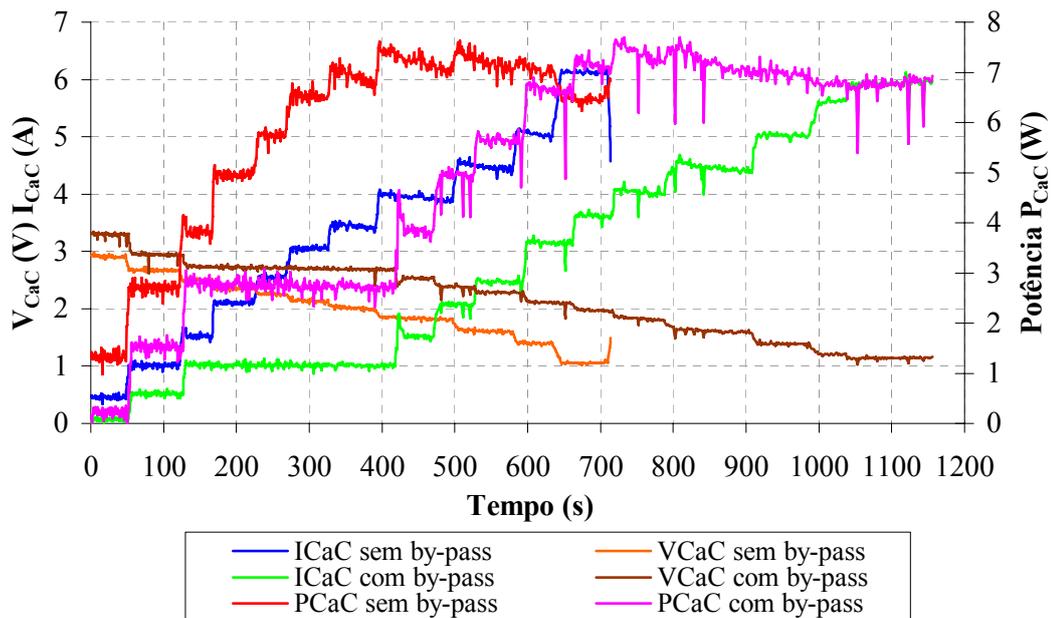


Figura 6.25 - Curva da polarização em função do tempo.

#### 6.4.2. Ensaio 2 - 200ms

O segundo ensaio consiste no ciclo de operação em que a chave conduz durante 200ms e fica bloqueada durante 20s. Na Figura 6.26 mostra-se a operação da pilha em regime permanente. Nos instantes iniciais manteve-se a CaC operando sem a aplicação do *by-pass* e entre os instantes de 390 a 600 segundos acionou-se a rotina de curtos, como ilustrado na mesma figura. Observa-se no gráfico um aumento significativo de potência durante a

aplicação do *by-pass* para as mesmas condições de operação e de corrente. Esse aumento ficou em aproximadamente 2,6% com a aplicação dos curtos.

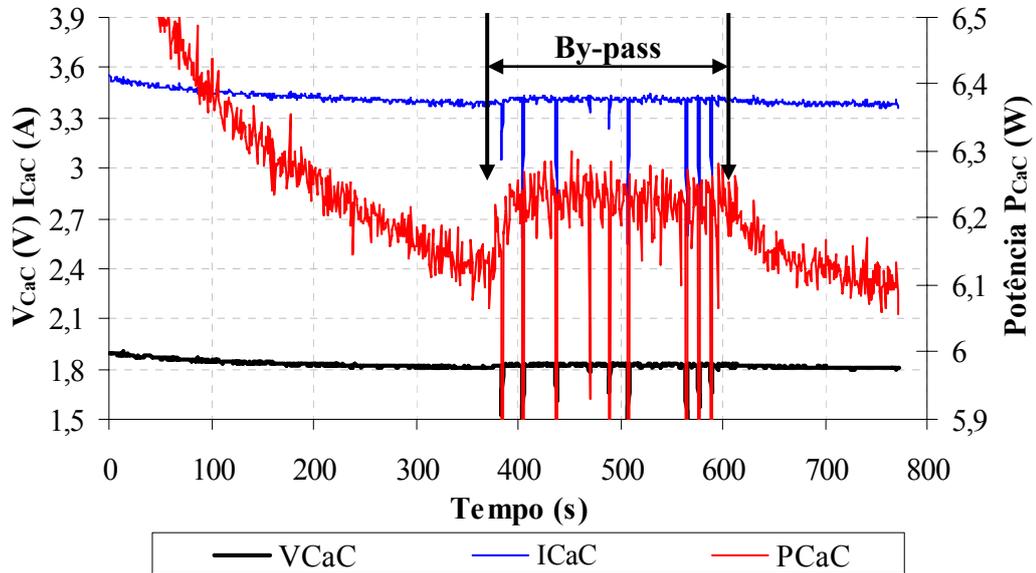


Figura 6.26 - Tensão, corrente e potência em regime permanente da CaC.

Nas Figuras 6.27, 6.28 e 6.29 mostra-se o teste estático ou de polarização. Verifica-se nos gráficos um aumento, ao longo de toda curva de polarização, tanto para a potência como para a tensão. Observa-se que para correntes elevadas tem-se a maior variação de potência com a aplicação dos curtos.

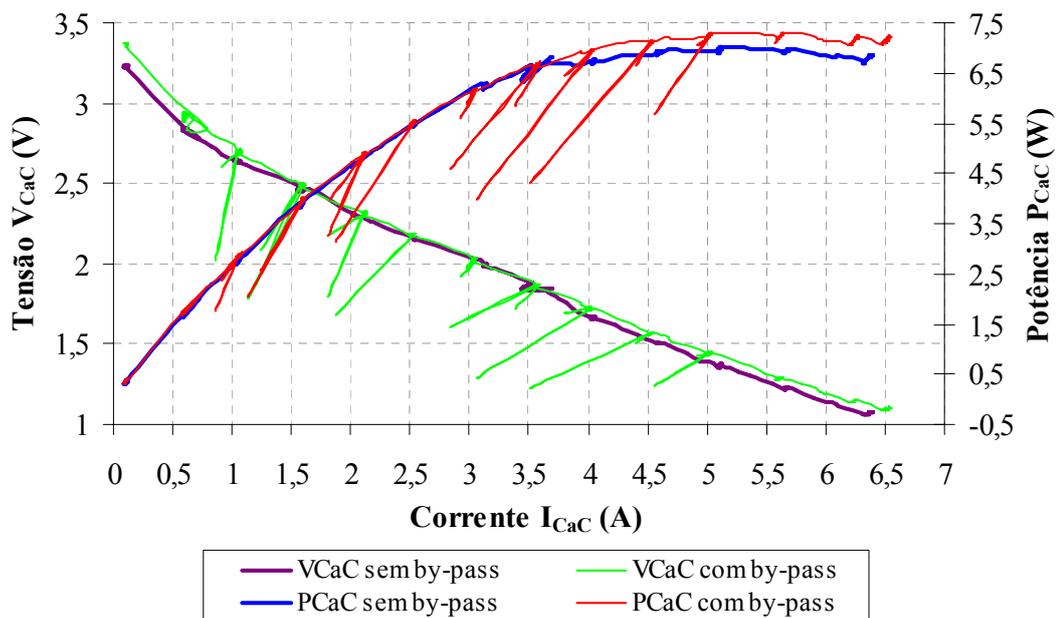


Figura 6.27 - Curva experimental de polarização.

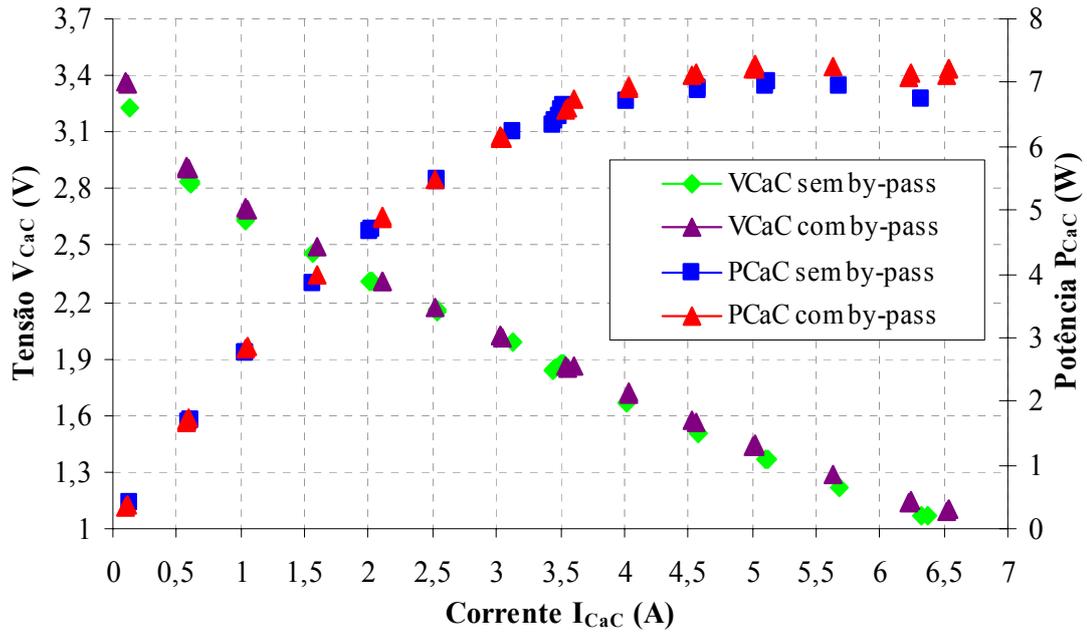


Figura 6.28 - Curva experimental de polarização.

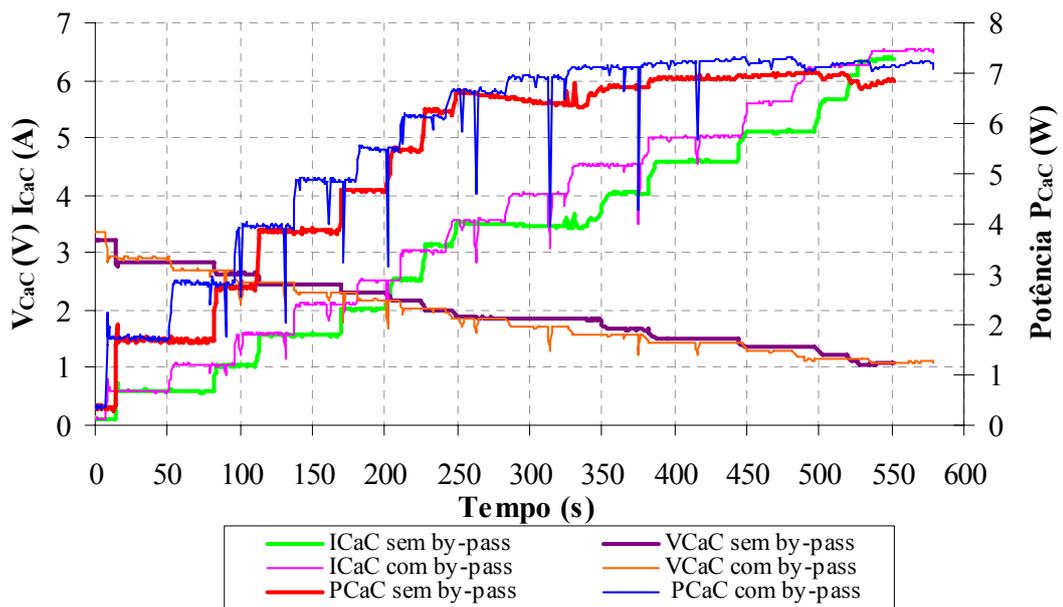


Figura 6.29 - Curva da polarização em função do tempo.

#### 6.4.3. Ensaio 3 - 1s

O terceiro ensaio realizado consistiu no ciclo de operação em que a chave conduz durante 1s e fica bloqueada durante 20s. Nas Figuras 6.30 e 6.31 mostra-se a pilha em regime permanente, onde nos instantes iniciais manteve-se a CaC sem a aplicação do *by-pass* e entre os instantes de 600s a 950s acionou-se a rotina de curtos e em 1350s acionou-se novamente, como ilustrado na mesma figura. Verifica-se um aumento significativo de potência durante a

aplicação do chaveamento. Esse aumento ficou em aproximadamente 3% com a aplicação dos curtos.

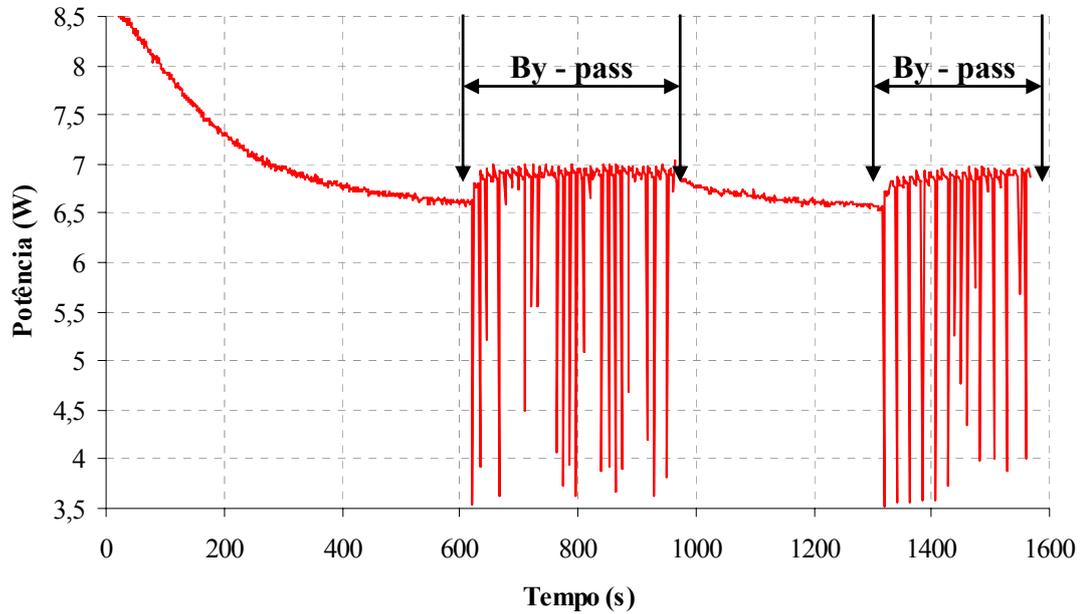


Figura 6.30 - Potência em regime permanente da CaC.

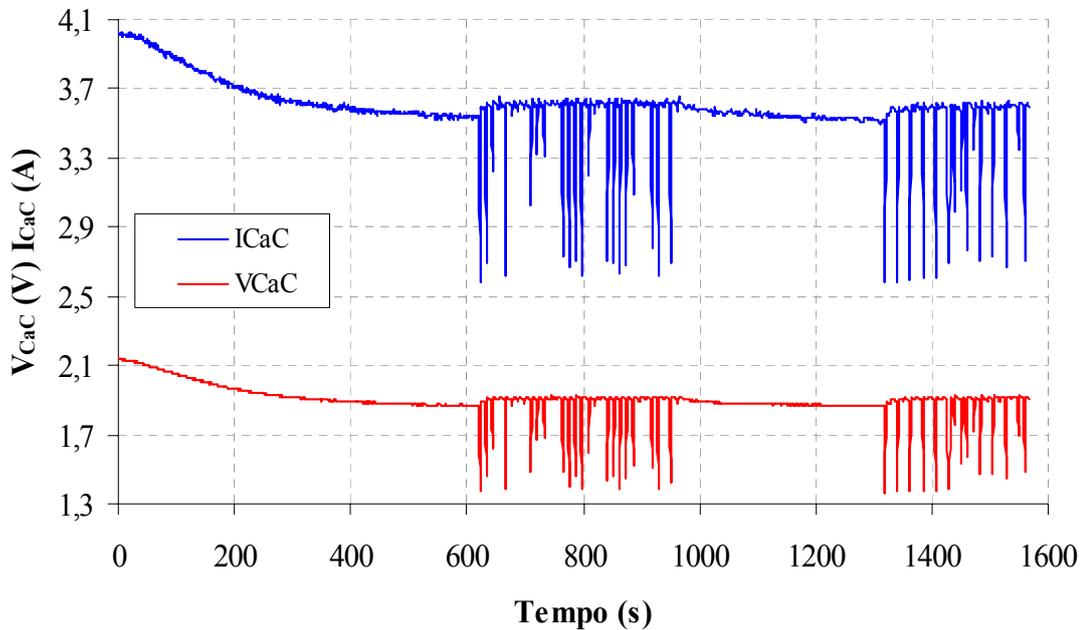


Figura 6.31 - Tensão e corrente em regime permanente da CaC.

Nas Figuras 6.32, 6.33 e 6.34 mostra-se o ensaio de polarização. Verifica-se que com a aplicação dos curtos ocorre um aumento de potência. Observa-se também que este aumento de potência ocorre tanto para correntes baixas (região de ativação) como para correntes elevadas (região de concentração).

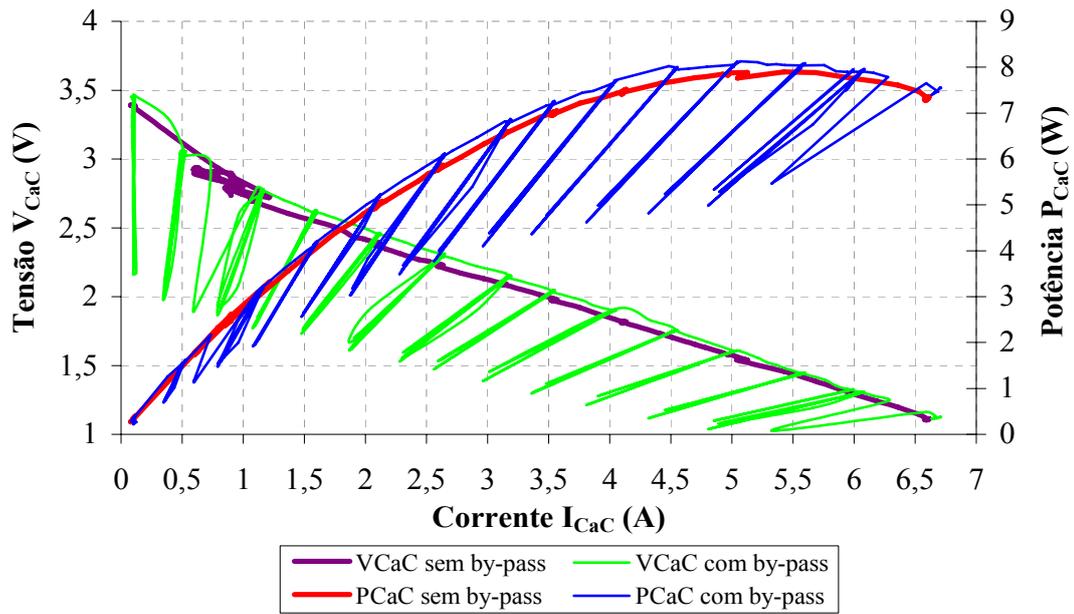


Figura 6.32 - Curva experimental de polarização.

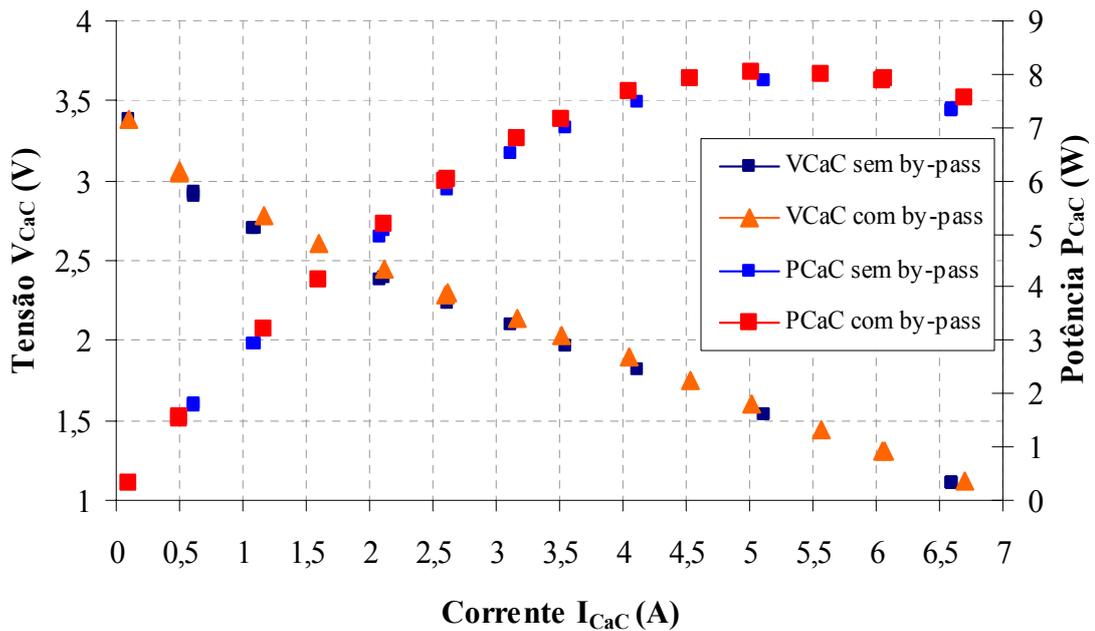


Figura 6.33 - Curva experimental de polarização.

Como se usou uma taxa de amostragem baixa para obtenção dos dados com a placa de aquisição, não é possível verificar com clareza os valores de tensão no momento da aplicação dos *by-passes*. Por esse motivo, na Figura 6.35 ilustra-se o detalhe da tensão sobre os dois blocos de células. A curva em vermelho ilustra o intervalo de atuação do *by-pass* no Bloco\_2 da pilha.

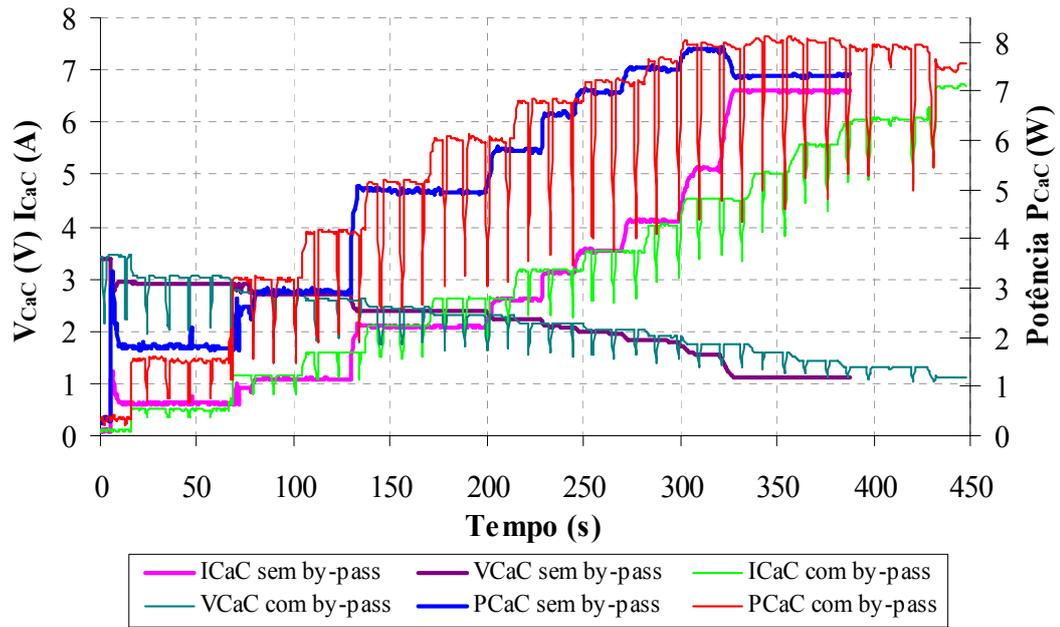


Figura 6.34 - Curva da polarização em função do tempo.

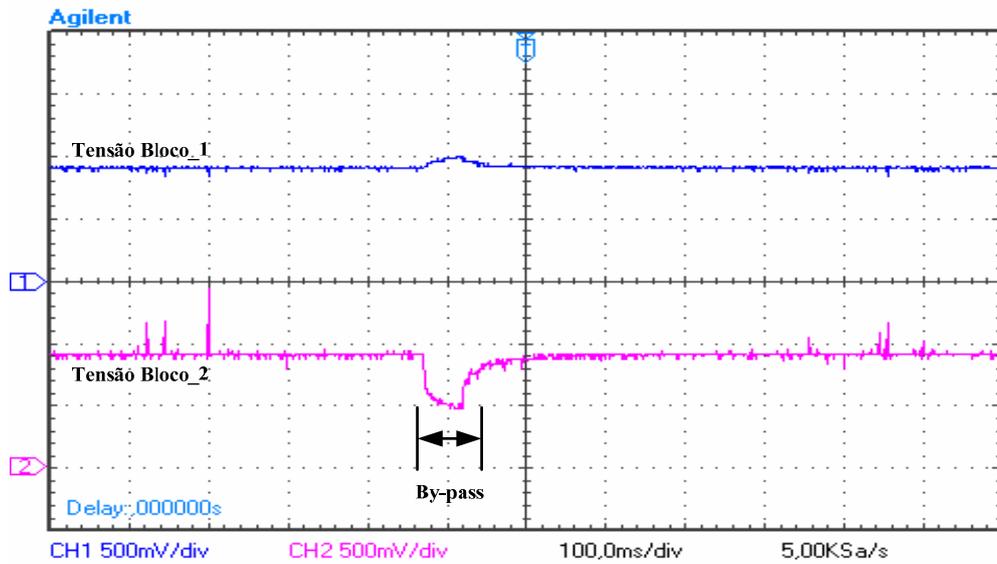


Figura 6.35 - Detalhe do *by-pass*.

A Figura 6.36 indica o acionamento do chaveamento dentro de uma faixa de tempo de 60 segundos para os blocos de células.

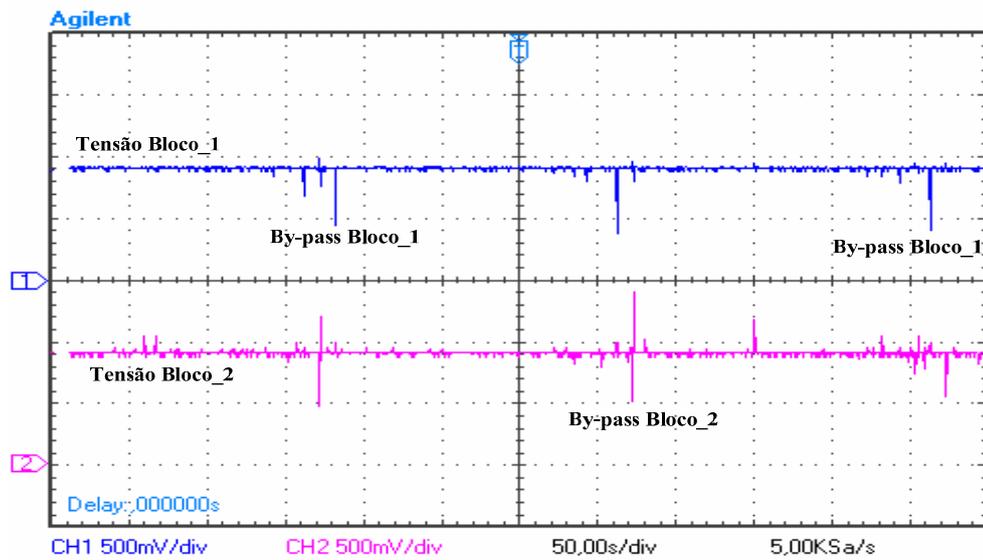


Figura 6.36 - Detalhe de aplicação do *by-pass* nos blocos.

#### 6.3.4. Ensaio 4 - 200ms (variação de umidade do ar de reação)

A variação da umidade da membrana é grandeza de fundamental importância na operação prática de CaCs. Desse modo realizou-se um ensaio de variação da umidade juntamente com a aplicação do *by-pass*, com uso do umidificador ilustrado no Capítulo 4. Essa variação pode ser vista na Figura 6.37. Assim sendo, dentro da variação de umidade obtida (de 47% a 68%) não se obteve um impacto significativo na potência da pilha com ou sem aplicação dos curtos-circuitos.

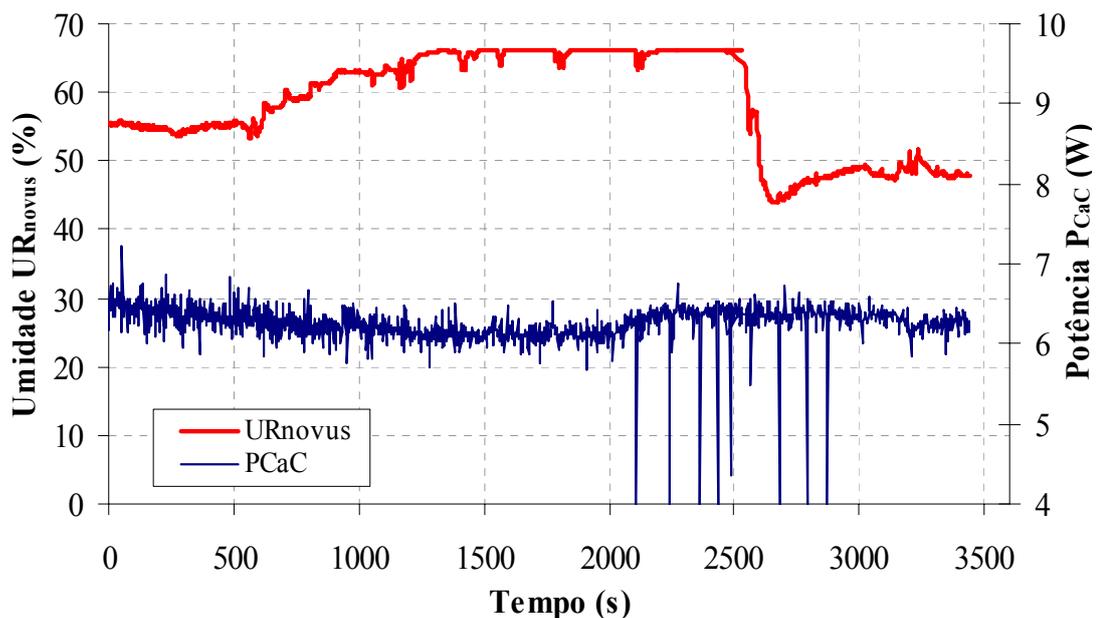


Figura 6.37 - Aplicação do *by-pass* e variação da umidade.

## 6.5. Resumo do capítulo

Neste capítulo discutem-se os principais resultados obtidos através dos vários ensaios com o protótipo completo em funcionamento.

Através dos ensaios de operação em regime permanente pode-se observar o funcionamento completo do protótipo com a aquisição e tratamento dos sinais dos sensores. Também se pode observar a geração dos sinais PWM de controle do nível de tensão dos ventiladores. A partir da aquisição de dados e por cálculos no programa em Labview pode-se estimar o consumo de ar, de  $H_2$  e de  $O_2$  e também a produção de água e calor da pilha para um tempo determinado de operação (15 minutos neste estudo).

Nos ensaios de aplicação do *by-pass* nota-se que no momento de atuação do curto ocorre uma queda instantânea de potência dificultando a visualização no gráfico. Isso acontece devido a pilha utilizada nesta dissertação possuir apenas quatro células em série e de acordo com suas configurações internas só foi possível implementar o chaveamento de duas a duas células. Como o *by-pass* é aplicado em blocos de células alternados, como explicado no Capítulo 4, no momento da atuação do chaveamento a tensão do circuito reduz pela metade, pois apenas um bloco estará conectado ao circuito. No entanto, para aplicações desta técnica em pilhas com maior número de células em série (por exemplo, 32, 48, 70 ou mais células) esse problema praticamente não é significativo, pois os curtos podem ser aplicados em uma célula por vez. Com isso, tem-se uma queda instantânea de no máximo 0,65V que é a tensão de uma única célula.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

---

Na modelagem realizada avaliaram-se as principais características eletroquímicas das CaCs de modo a predizer seu comportamento para as condições encontradas na prática. Os resultados obtidos com o modelo eletrônico usando semicondutores concordam com os dados práticos apresentados na literatura, validando assim este modelo. Várias comparações foram efetuadas entre os resultados do modelo eletrônico, simulado neste trabalho, com os resultados encontrados na literatura para o modelo clássico. As diferenças observadas entre a resposta do modelo eletrônico, o modelo clássico e os dados reais das pilhas são mais acentuadas no início e no final da curva de polarização, justamente porções que não eram satisfatoriamente representadas por outros modelos.

O estudo usando o modelo eletrônico é importante por possuir uma aplicação mais voltada à eletrônica de potência, ao contrário do modelo clássico que é mais indicado para uma análise do funcionamento interno da pilha. Por exemplo, o sistema de potência com a CaC usa normalmente um conversor de potência para entregar uma tensão regulada na saída. O modelo eletrônico facilita a modelagem no projeto dos conversores de potência e do controle destes sistemas. Com apenas um bloco de simulação o modelo proposto serve para analisar o comportamento da CaC num sistema de integração com outras fontes alternativas de energia ou até mesmo com injeção de energia na rede.

Portanto, constatou-se que o modelo eletrônico possui uma boa resposta com relação aos parâmetros analisados. Entretanto, ele possui muitas limitações quando comparado com o modelo clássico, o qual é mais completo em sua análise. Esta conclusão deve-se ao fato de que o modelo clássico trata a célula como um modelo eletroquímico, e não apenas elétrico. Também inclui toda modelagem termodinâmica da pilha (temperatura de operação e umidade relativa da membrana), a qual é muito importante para o perfeito funcionamento de uma célula e para a determinação das leis de controle que envolve o processo. Contudo, apesar do modelo eletrônico não ser completo ele é bastante funcional, didático e reproduz de forma bastante aceitável os principais fenômenos envolvidos na operação das pilhas.

Os resultados dos ensaios com o protótipo permitiram avaliar a influência das variações de umidade, temperatura, pressão de hidrogênio e fluxo de ar na eficiência da pilha. Todas as variáveis, acima citadas, causaram variação no rendimento da CaC. No entanto,

algumas causaram variações mais significativas que outras. Percebe-se que a variável de maior impacto na eficiência é a temperatura, seguido do fluxo de ar, da umidade e por fim, sem significância considerável, tem-se a pressão do hidrogênio.

Os ensaios de operação em regime permanente permitem ao projetista de sistemas envolvendo CaCs avaliar qual o melhor ponto de operação para as condições necessárias a sua aplicação. Deve-se realizar uma análise criteriosa destas relações, ou seja, para potências elevadas tem-se um consumo elevado e rendimento baixo. Porém, nas regiões ôhmicas e de concentração, observou-se as menores taxas de variação de eficiência ocasionadas por agentes externos. Para potências baixas tem-se um rendimento maior e consumo de combustível menor, porém, na região de ativação observaram-se as maiores taxas de variação da eficiência.

Com os ensaios de aplicação do *by-pass* observou-se que esta técnica realmente ocasiona um ganho de potência e aumento da eficiência da pilha. O ciclo de operação das chaves em que se obtiveram maiores variações da eficiência foi o ensaio de 1s com a chave conduzindo. Observou-se nos ensaios e também na literatura que esse método é dependente da dinâmica interna de cada modelo de pilha. Provavelmente a resposta da técnica de curtos esta associada ao nível de umidade da membrana e também aos aspectos construtivos da mesma como capacitância e resistências internas. Assim sendo, isso explicaria a variação dos resultados para diferentes valores de tempos do *by-pass*. Dessa forma, para obter um melhor desempenho com a técnica deve-se verificar através de ensaios práticos qual o melhor tempo de atuação do *by-pass* para cada tipo de CaC.

A instalação e automação prática de CaCs envolve conhecimentos específicos de diversas áreas. Além disso, por se tratar de uma tecnologia inovadora pouco material informativo é disponibilizado pelas empresas fabricantes das pilhas, o que dificulta o estudo e a implementação prática de plantas com células a combustível.

Essa dissertação reuniu resultados tanto teóricos como práticos sobre o impacto que suas grandezas de controle ocasionam na eficiência da pilha. Assim sendo, o projetista de sistemas com CaC deverá analisar, dentro desses limites, qual a melhor forma de implementar sua planta, não esquecendo do custo atual da compra ou produção de hidrogênio. A seguir são apresentadas as contribuições dessa pesquisa e as sugestões de continuidade do trabalho.

## 7.1. Contribuições da pesquisa

O autor acredita que contribuiu com a pesquisa sobre células a combustível nos seguintes pontos:

- ⇒ Inclusão do fenômeno de partida na análise do modelo eletrônico de CaC e validação da modelagem de pilhas comerciais. Com isso, obtem-se uma melhor definição do tempo necessário para a efetiva entrada em operação do gerador;
- ⇒ Desenvolvimento de um programa de monitoramento gráfico, também adequado para acionamento e controle dos dispositivos auxiliares da pilha. Com isso viabiliza-se a possibilidade de operar o gerador dentro de condições de eficiência desejáveis minimizando, também, os danos ocasionais à pilha;
- ⇒ Ampliação dos estudos sobre a eficiência de CaCs frente as variações em suas grandezas de controle.
- ⇒ Análise e implementação da técnica de *by-pass* na abordagem da eficiência de CaCs para averiguar e quantificar o efeito desta técnica em uma célula real. Como resultados têm-se dados de difícil obtenção na literatura e dificilmente praticáveis em simuladores convencionais.

## 7.2. Sugestões para continuidade do trabalho

Vários estudos podem ser realizados em relação à eficiência de CaCs como:

- ⇒ Avaliar quantitativamente o ganho de eficiência com a utilização de um umidificador ativo do ar de reação;
- ⇒ Implementar a mesma interface de monitoramento e acionamento para uma pilha de maior potência e com isso desenvolver um sistema de co-geração e aproveitamento do calor gerado pela CaC;
- ⇒ Otimizar a técnica de cálculo do tempo e da frequência do chaveamento (*by-pass*) que melhor se adapte ao tipo de pilha analisada;
- ⇒ Estudar a associação do *by-pass* com os parâmetros construtivos das pilhas, tais como: capacitância e resistências internas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- XUE, X.D., CHENG, K.W. E. e SUTANTO, D. **Unified mathematical modeling of steady-state and dynamic voltage-current characteristics for PEM fuel cells.** *Electrochimica Acta*, Vol. 52, p. 1135 a 1144, 2006.
- AMPHLETT, J.C. BAUMERT, R.M. MANN, R.F. B.A. PEPPLEY, B.A. ROBERGE, P.R. **Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell - I. Mechanistic model development.** *Journal of The Electrochemical Society*, v.142, n.1, p.1-8. Jan. 1995.
- LARMINIE, J., DICKS, A. **Fuel cell systems explained.** 308 p., Ed. John Wiley & Sons, Inglaterra, 2003.
- AMPHLETT, J.C. BAUMERT, R.M. MANN, R.F. B.A. PEPPLEY, B.A. ROBERGE, P.R. **Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell - II. Empirical model development.** *Journal of The Electrochemical Society*, v.142, n.1, p.9-16. Jan. 1995.
- FARRET, F.A., GODOY, M. **Integration of alternative sources of energy.** 471 p., Wiley Interscience - IEEE, New Jersey, EUA, 2006.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA. **Prospects for Hydrogen and Fuel Cells.** França, 2005.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME. **Plano nacional de energia 2030 - PNE 2030.** 226 p., Brasília, Brasil, 2007.
- ALEJANDRO, J. **Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model.** *Journal of Power Sources*, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.04.066, 2007.
- WEYDAHL, H. **Transient response of a proton exchange membrane fuel cell.** *Journal of Power Sources*. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.06.073, 2007.

YAP, H.T. e SCHOFIELD, N. **Test characterisation of a H<sub>2</sub> PEM fuel cell**. P. 551 a 558, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007.

CORRÊA, J. M. **Subsídios teóricos e práticos para modelagem e simulação de pilhas de células de combustível**. 177 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, PPGEE, Santa Maria, 2002.

BARBIR, F. **PEM Fuel cells - theory and practice**. Ed. Elsevier, Academic Press, Burlington, 2005.

WANG, C., HASHEM, M., STEVEN, R. **Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits**. p. 442 a 451, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, 2005.

FARRET, F. A. **Fontes Alternativas de Energia**. 200 p., Ed. UFSM, Brasil, 1999.

HIRSCHENHOFER J.H., STAUFFER D. B., ENGLEMAN R.R., KLETT M. G. **Fuel cell handbook**. Parsons Corporation, 6th edn., 2005.

CHU, D.; JIANG, R. **Analysis of PEM fuel cell stacks using an empirical current-voltage equation**. 370 p., Journal of Applied Chemistry, Vol. 30, 2000.

RUNTZ, K. J., LYSTER, M. D. **Fuel cell equivalent circuit models for passive mode testing and dynamic mode design**. IEEE CCECE/CCGEI, Saskatoon, May, 2005.

CORRÊA, J.M., FARRET, F., SIMÕES, M.G. **An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electrochemical model**. Proceeding of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON'01, Denver, Colorado USA, p. 141 - 146, 2001.

LAURENCELLE, F., CHAHINE, R., HAMELIN, J., BOSE, T.K., FOURNIER, M., AGBOSSOU, K. e LAPERRIÈRE, A. **Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack**. Fuel Cells 2001, Vol. 1 n<sup>o</sup> 1, 2001.

- YUVARAJAN, S., YU, D. **Electronic circuit model for proton exchange membrane fuel cells.** p. 238 a 242, Electrical and Computer Engineering Department - North Dakota State University, Journal of Power Sources, 2004.
- CORRÊA, J.M., FARRET, F., POPOV, V.A., SIMÕES, M.G. **Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells.** p. 211 a 218, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, 2005.
- ZANCAN, M.D. **Potencial de eficientização energética das micro e pequenas empresas comerciais varejistas de santa maria.** 106 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- BALASUBRAMANIAN, J. **Investigation of fuel cells models and auxiliary power unit configurations.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Northern Illinois University, 2005.
- GONZATTI, F. **Bases experimentais para o projeto, automação e instalação de sistemas de geração de energia com células de combustível.** 96 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- YU, D., YUVARAJAN, S. **Characteristics and modeling of PEM fuel cells.** p. 880 a 883, IEEE ISCAS 2004.
- YUVARAJAN, S., YU, D. **A novel circuit model for PEM fuel.** p. 362 a 366, Electrical and Computer Engineering Department - North Dakota State University, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005.
- MARQUEZINI, D. **Interação entre conversores chaveados com baixa ondulação e células de combustível.** 137 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, PPGEE, Santa Maria, 2007.
- AVISTA LABORATORIES, **Operator's manual of the SR-12 PEM Fuel Cells.** 2000.
- BCS TECHNOLOGY, **Data Sheet for a 500W PEM stack.** 2002.

- YALES, R. **Contribuições para sistemas de processamento de energia de células a combustível.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, 2006.
- WU, A.; LI, W. e BERG, P. **Numerical analysis of dynamic processes in fully humidified PEM fuel cells.** p.1 a 10, International Journal of Hydrogen Energy, Canada, 2006.
- 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.
- FUGLEVAND, W.A., DEVRIES, P.D., LOYD, G.A., LOTT, D.R. e SCARTOZZI, J.P. **Fuel cell and method for controlling same,** US Patent 6,096,449, to Avista Labs, Aug. 1, 2000.
- FUGLEVAND, W.A., DEVRIES, P.D., LOYD, G.A., LOTT, D.R. e SCARTOZZI, J.P. **Fuel cell power system and methods of controlling a fuel cell power system;** US Patent 6,387,556 B1, to Avista Labs, May. 14, 2002.
- CHOI, W., ENJETI, P.N., HOWZE, J.W. **Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current.** Journal of Power Sources, vol. 158, p. 1324–1332, 2006.

## APÊNDICE

---

### APÊNDICE A - SENSORES DE TEMPERATURA

#### A.1. Características teóricas dos termopares

Devido à dificuldade de encontrarem-se termopares industriais que se adequassem aos propósitos deste trabalho, esses termopares foram construídos manualmente nesta dissertação. A seguir tem-se a metodologia de projeto desses sensores.

Na Figura A.1 é mostrado um esquema de ligação dos termopares construídos no laboratório. O termopar de cobre/constatam, tipo  $T$ , é um sensor de temperatura que está relacionado ao efeito termoelétrico ou efeito de Seebeck. Uma diferença de tensão é gerada quando a extremidade soldada estiver a uma temperatura  $T$  diferente de  $T_o$ .

A leitura depende da temperatura da junção quente e da temperatura  $T_o$ . Para obterem-se medições precisas, deve-se usar uma junção “fria” garantindo que  $T_o = 0(^{\circ}\text{C})$ . Sem o uso desta junção fria a leitura varia de acordo com a variação de  $T_o$ . Na Equação (A.1) pode-se notar que se deve manter a temperatura  $T_o$  igual a zero, pois assim a medida da tensão de saída do termopar é proporcional somente a  $T$ .

$$V_{saída} = K \cdot (T - T_o) \quad (\text{A.1})$$

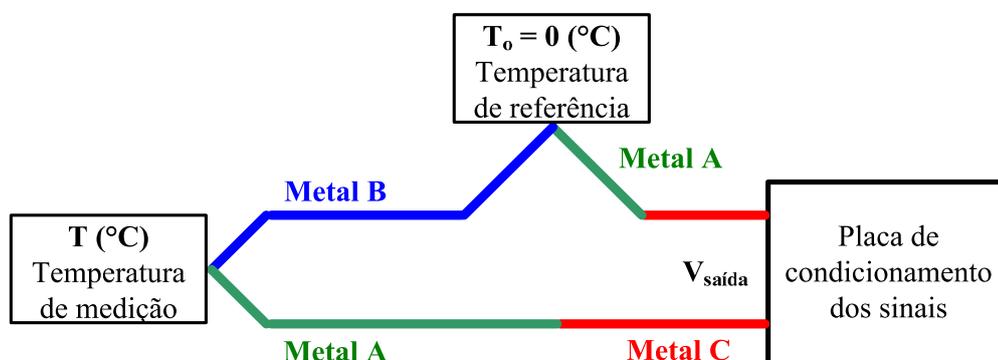


Figura A.1 - Ligação de um termopar com junção fria.

A forma usada neste trabalho para assegurar que a junção fria seja igual a zero é utilizar uma fonte de tensão como mostrada na Figura A.2. Esta fonte de tensão foi calibrada,

experimentalmente, de acordo com a tensão fornecida pelo termopar quando a temperatura  $T_o$  for igual a zero. Assim, pode-se avaliar a correspondente correção  $V_{T_o} = V(T_o)$ . A tensão de saída do termopar  $V_{real}$  é então corrigida de acordo com a Equação (A.2). Com o uso da fonte de tensão auxiliar garante-se que  $V_{T_o} = 0$ , e conseqüentemente,  $V_{real} = V_T$ .

$$V_{real} = V_T + V_{T_o} \quad (A.2)$$

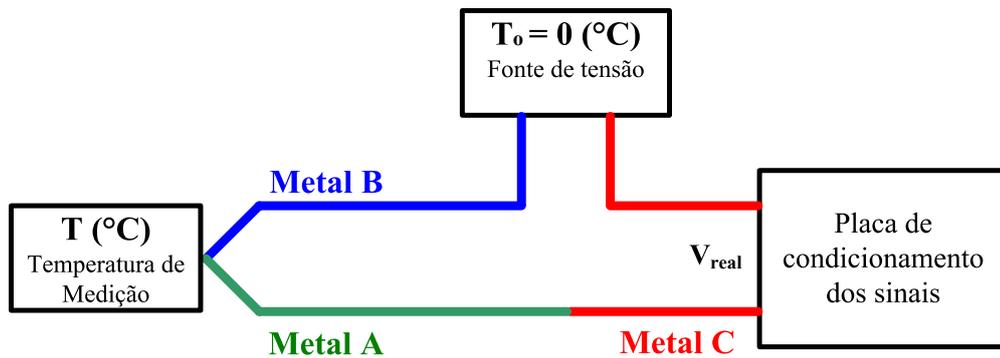


Figura A.2 - Ligação de um termopar com fonte de tensão, simulando a junção fria.

O esquema de ligação da fonte auxiliar para representar a junção fria é mostrado na Figura A.3.

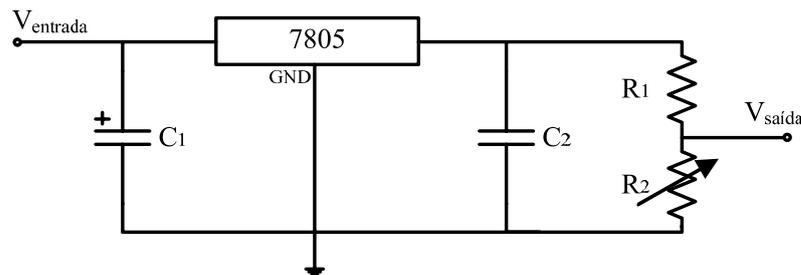


Figura A.3 - Fonte auxiliar.

## A.2. Características construtivas do sensor

O termopar tipo T possui as seguintes características:

- ⇒ Medições na faixa de -200 a 371 °C;
- ⇒ Coeficiente de Seebeck igual a 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ;

- ⇒ Termoelemento (+) composto por cobre (100%);
- ⇒ Termoelemento (-) composto por constantan (55% de cobre e 45% de níquel);
- ⇒ Faixa de tensão de saída de 0 a 5mV para temperaturas de 0 a 100°C.

O principal motivo da escolha deste material para a construção dos termopares é pela sua aplicação em atmosferas inertes, oxidantes ou redutoras. Pela grande homogeneidade com que o cobre pode ser processado, obtém-se boa precisão. Também, é aplicável para temperaturas abaixo de zero e tolerante a umidade, fator importantes no uso com CaC, pois ela estará em contato direto com vapor de água quente. Em temperaturas acima de 300°C, a oxidação do cobre torna-se muito intensa. Assim sendo, acarreta a redução de sua vida útil e provoca desvios em sua curva de resposta original que está fora dos limites de uso para os experimentos neste trabalho.

### A.3. Circuito eletrônicos de condicionamento dos sinais

A entrada de tensão do circuito eletrônico é composta pelo sensor de temperatura (termopar), onde o sinal gerado pelo termopar é da ordem de milivolts. Este sinal passa por três estágios de amplificação e dois filtros passa-baixas, como visto no Anexo A. O primeiro estágio de amplificação trata-se de um amplificador inversor, onde seu ganho é determinado pela Equação (A.3).

$$A_1 = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{A.3})$$

O segundo estágio também é um amplificador inversor, onde seu ganho é determinado pela relação expressa pela Equação (A.4).

$$A_2 = \frac{R_4}{R_3} \quad (\text{A.4})$$

O terceiro estágio é realizado por um amplificador não-inversor com correção de offset. O resistor variável  $R_7$  é responsável por essa correção. O ganho desse estágio é dado pela Equação (A.5).

$$A_3 = 1 + \frac{R_5}{R_6} \quad (\text{A.5})$$

Assim, o ganho total do circuito de condicionamento é dado pela Equação (A.6).

$$A_{TOTAL} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (\text{A.6})$$

A filtragem do sinal é realizada por um filtro ativo passa-baixas e outro passivo passa-baixas. A frequência de corte do filtro ativo é calculada pela Equação (A.7).

$$f_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_4 \cdot C_1} \quad (\text{A.7})$$

A frequência de corte do filtro passivo é dada pela Equação (A.8).

$$f_{C2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_9 \cdot C_2} \quad (\text{A.8})$$

#### **A.4. Calibragem dos sensores**

A calibragem dos sensores serve para obter-se sua curva característica, onde consta a relação da temperatura medida e a tensão de saída da placa eletrônica. Os sinais de saída foram projetados para limites dentro da faixa de 0 a 4V e temperaturas entre 0 a 100°C. Estas faixas de valores possibilitam a aquisição de dados com placa de aquisição, e também a utilização de microcontrolador. As Figuras A.4, A.5, A.6 e A.7, mostram as curvas obtidas experimentalmente no laboratório. Os ensaios práticos para obtenção das curvas foram baseados na metodologia de comparação do sensor a ser calibrado com um instrumento padrão, certificado por órgão de controle de qualidade. O sensor utilizado como padrão foi um termômetro de mercúrio, certificado pelo INMETRO. Nos gráficos são dadas as equações de ajuste que foram utilizadas no programa em Labview para aquisição dos sinais destes sensores. Para isso é utilizada uma equação de ajuste, mostrada em vermelho nos gráficos, que faz a aproximação dos valores da curva experimental e fornece a equação linear de primeiro grau necessária.

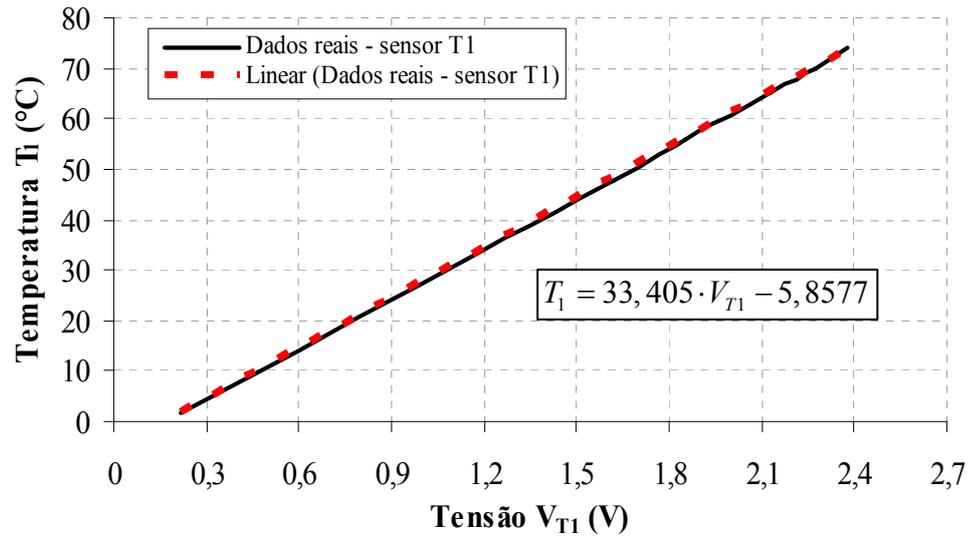


Figura A.4 - Curva de operação do termopar  $T_1$ .

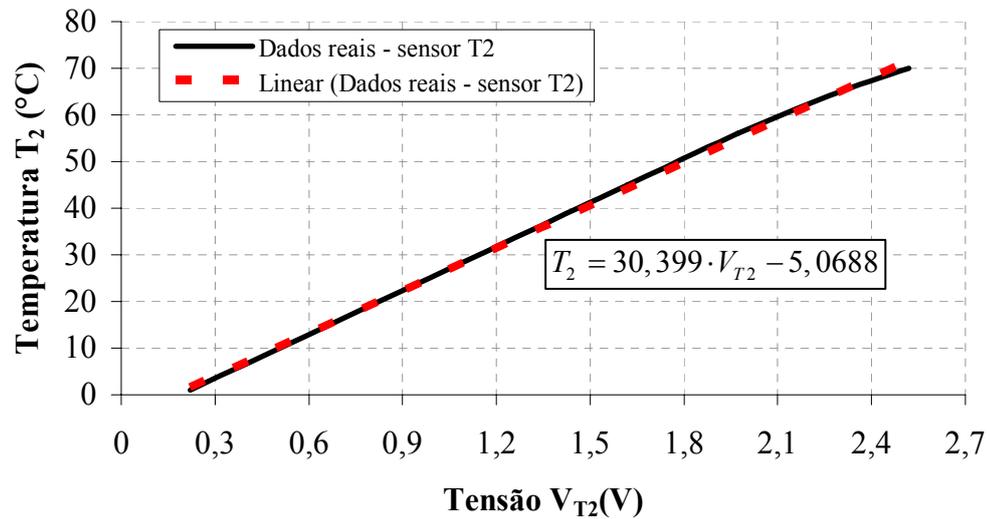


Figura A.5 - Curva de operação do termopar  $T_2$ .

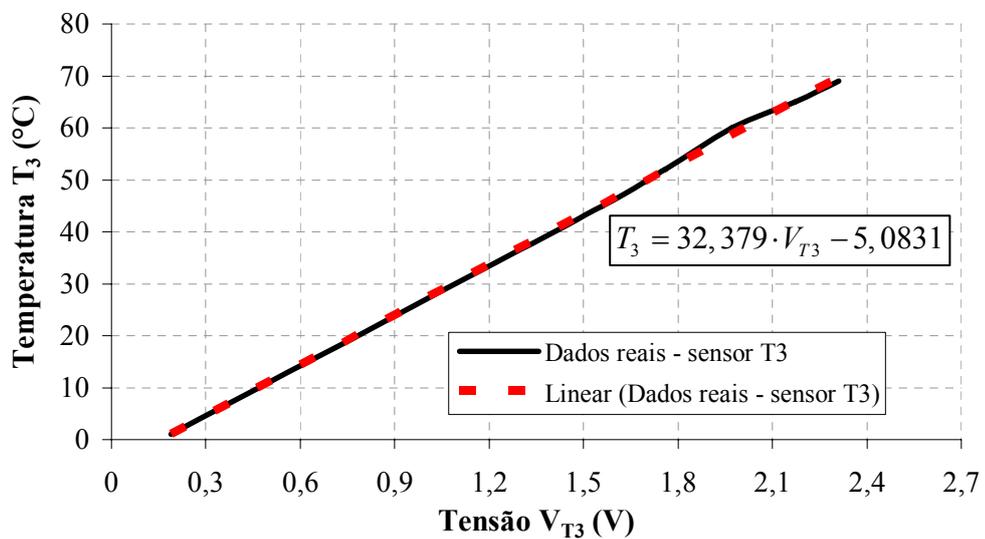
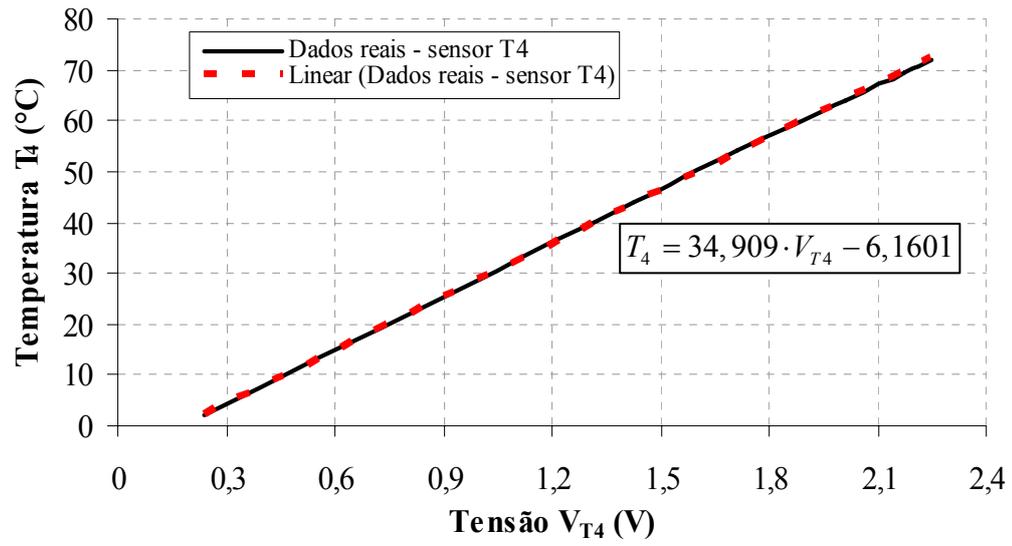


Figura A.6 - Curva de operação do termopar  $T_3$ .

Figura A.7 - Curva de operação do termopar  $T_4$ .

## APÊNDICE B - SENSORES DE PRESSÃO

### B.1. Descrição do sensor

Os sensores de pressão utilizados foram os modelos MPX2102GVP e o MPX2102APGP fabricados pela empresa Freescale, mostrados na Figura B.1.

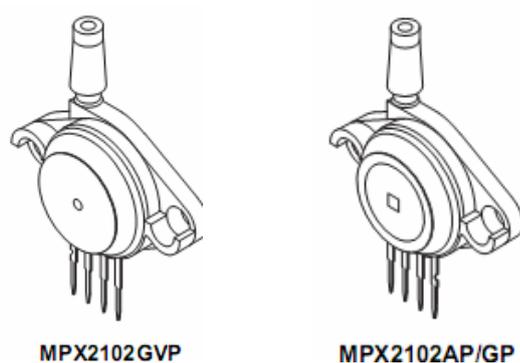


Figura B.1 - Sensores de pressão.

O sensor de pressão mostrado acima possui como características principais as apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Características do sensor de pressão.

Alimentação	$V_s = 10 \sim 16V_{dc}$
Sensibilidade	$\Delta V / \Delta P = 0,4(mV / kPa)$
Pressão máxima	$P_{máx} = 400kPa$
Pressão de operação	$P_{op} = 0 \sim 100kPa$ $P_{op} = 0 \sim 14,5psi$ $1kPa = 0,145psi$
Tempo de resposta	$t_R = 1,0ms$

### B.2. Circuito para condicionamento do sinal dos sensores

Apresenta-se no Anexo B o circuito de condicionamento do sinal. Os estágios de amplificação são de dois tipos: o primeiro é um amplificador de instrumentação e o segundo um amplificador inversor. O amplificador de instrumentação (AI), utilizado no primeiro

estágio, amplifica pequenas diferenças dos sinais de tensão superpostas a grandes tensões de modo comum. As tensões de modo comum são iguais, portanto, elas se anulam. O AI tem como principais características: ganho de tensão ajustado por resistor externo e impedância alta na entrada dos dois terminais. Para o circuito do Anexo A, o ganho do amplificador de instrumentação é dado pela Equação (B.1).

$$A_1 = 1 + \frac{2 \cdot R}{R_G} \quad (\text{B.1})$$

O resistor  $R$  ligado ao terra no amplificador de instrumentação é um resistor variável cuja finalidade é fazer a correção do offset do sinal.

O segundo estágio de amplificação do sinal trata-se de um amplificador com entrada inversora. Ou seja, o sinal de saída será  $180^\circ$  defasado em relação ao sinal de entrada. O ganho é dado pela Equação (B.2).

$$A_2 = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{B.2})$$

O ganho total é dado pela multiplicação dos ganhos dos estágios 1 e 2, mostrado na Equação (B.3).

$$A_{TOTAL} = A_1 \cdot A_2 \quad (\text{B.3})$$

A filtragem do sinal é realizada por dois filtros: um filtro ativo passa-baixas e um filtro passivo passa-baixas. A frequência de corte é definida como pela Equação (B.4).

$$f_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_1} \quad (\text{B.4})$$

O filtro passivo é composto por um circuito RC. Sua frequência de corte é determinada pela Equação (B.5).

$$f_{C2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot C_2} \quad (\text{B.5})$$

### B.3. Calibragem dos sensores

Os sinais de saída foram projetados para valores limites na faixa de 0 a 4V entre 0 a 15 psi possibilitando, assim, a aquisição de dados com uma placa de aquisição, e também a utilização de microcontrolador. As Figuras B.2 e B.3 demonstram as curvas obtidas experimentalmente no laboratório. Os ensaios práticos foram baseados na metodologia de comparação do sensor a ser calibrado com um instrumento padrão. O medidor de pressão padrão foi um regulador de duplo estágio, tipo diafragma com escala em psi e fabricado pela empresa Concoa. Nos gráficos são dadas as equações de ajuste que foram utilizadas no programa em Labview para aquisição dos sinais destes sensores.

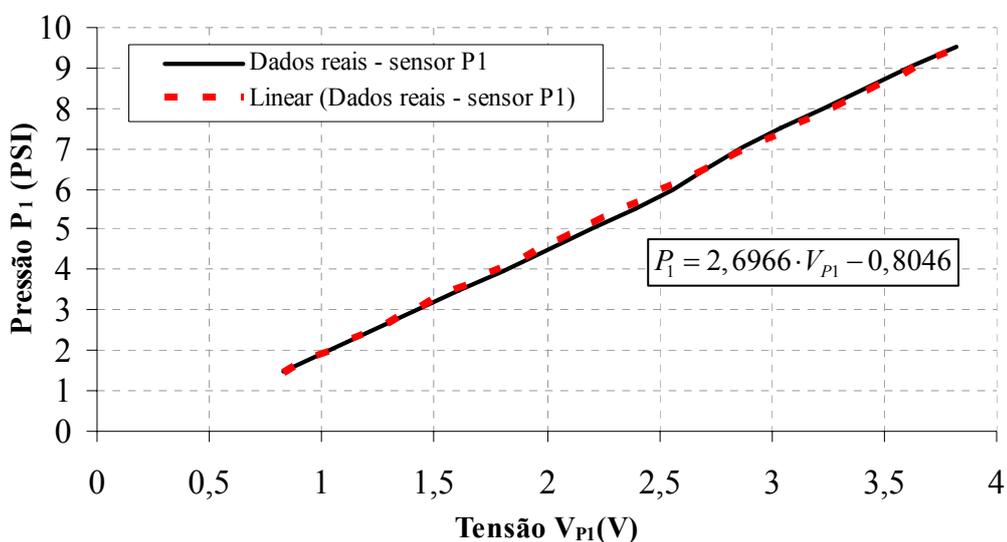


Figura B.2 - Curva de operação do sensor de pressão P<sub>1</sub>.

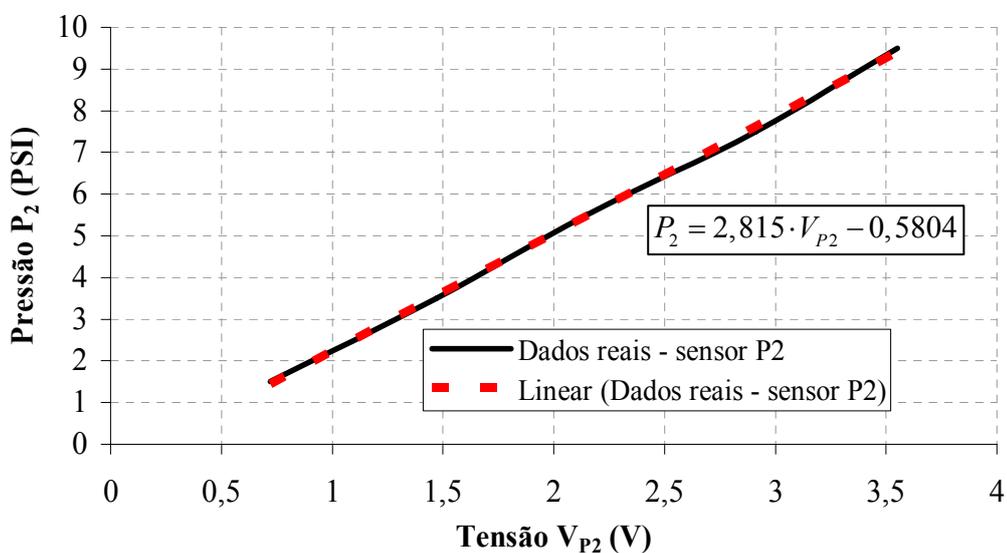


Figura B.3 - Curva de operação do sensor de pressão P<sub>2</sub>.

## APÊNDICE C - SENSOR DE UMIDADE E TEMPERATURA NOVUS

O sensor de umidade e temperatura utilizado para medição do ar de entrada na pilha foi o modelo RHT-DM da marca Novus. Os sensores incorporam sensores de precisão e com estabilidade suficiente para medição de umidade relativa e temperatura. Os valores medidos são convertidos em sinais elétricos, linearmente relacionados às suas leituras.

Este sensor tem sua saída em corrente, ou seja, fornece uma corrente entre 0 e 20 mA correspondente a temperaturas entre 0 a 100°C e umidade relativa de 0 a 100%. Como a placa de aquisição tem as entradas dadas em tensão, converteu-se os sinais de temperatura e umidade para tensão com uso de um circuito resistivo, como pode-se observar no esquema de ligação do sensor da Figura C.1.

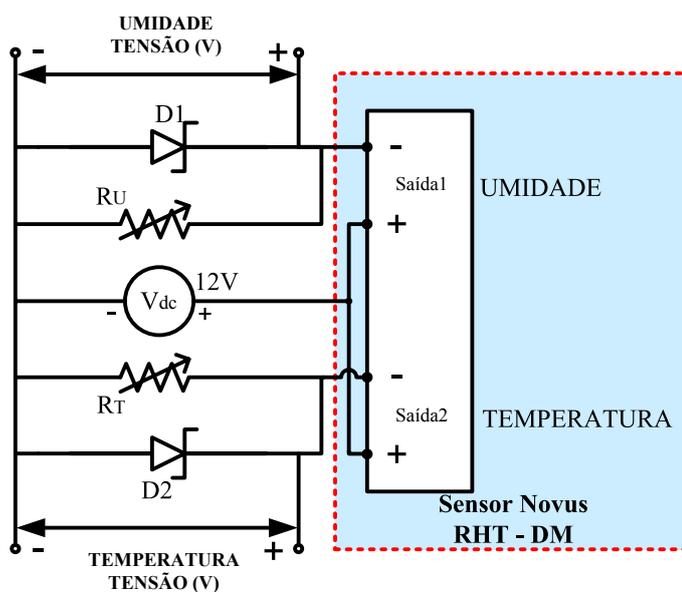


Figura C.1 - Esquema de ligação do sensor.

Nas Figuras C.2 e C.3 são apresentadas as curvas de calibração do sensor de umidade e temperatura. Nestes gráficos são dadas as equações de ajuste que foram utilizadas no programa em Labview para aquisição dos sinais destes sensores. Para isso é utilizada uma equação linear, mostrada na Figura C.2, que faz a aproximação dos valores da curva experimental e fornece uma equação ajustada de primeiro grau. Para a umidade é necessário usar um polinômio de segunda ordem para essa aproximação, mostrado na Figura C.3.

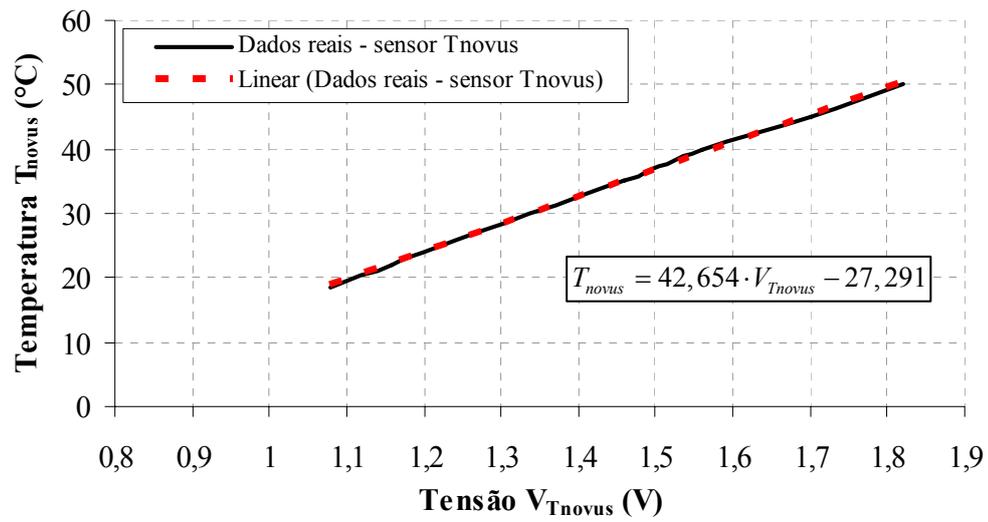


Figura C.2 - Curva de operação sensor Novus de temperatura.

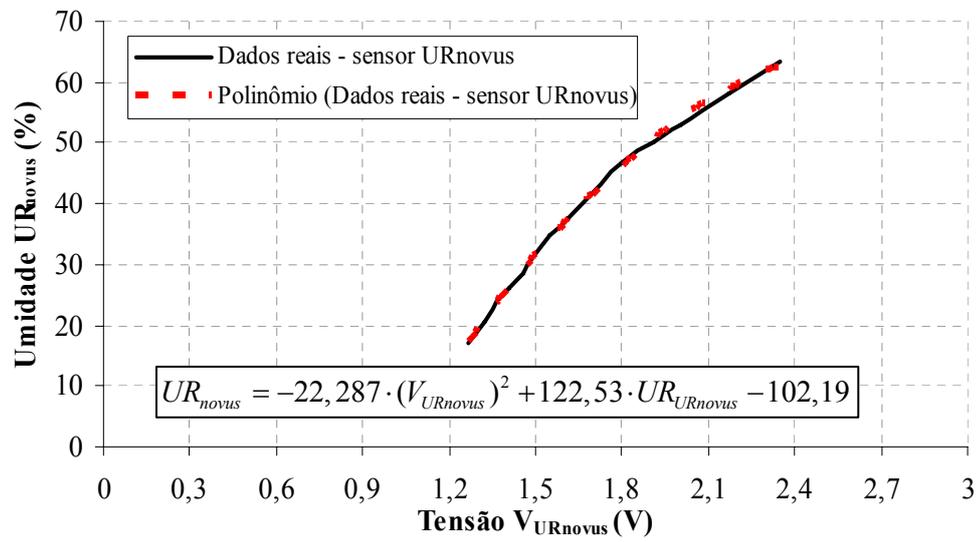


Figura C.3 - Curva de operação sensor Novus de umidade.

## ANEXOS

### ANEXO I - CIRCUITO PARA OS TERMOPARES

Na Figura I.1 mostra-se o circuito eletrônico implementado para condicionamento dos sinais dos termopares.

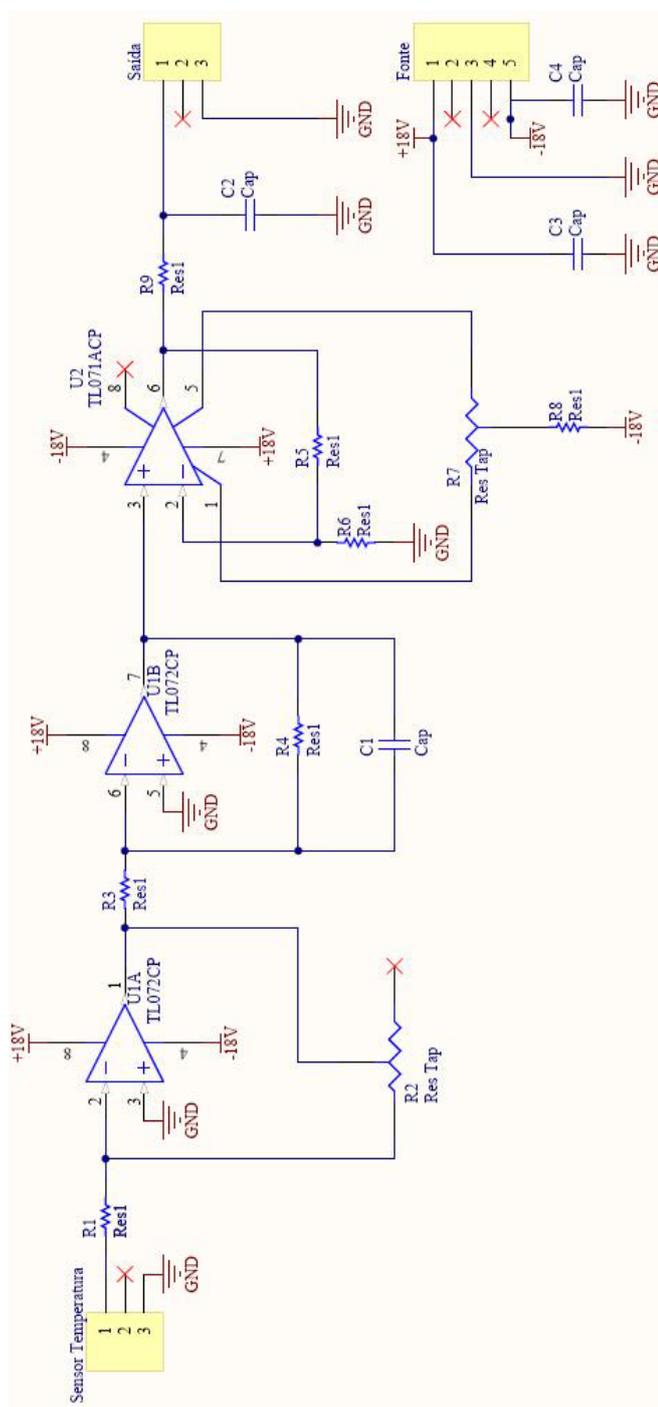


Figura I.1 - Circuito para tratamento do sinal dos termopares.

## ANEXO II - CIRCUITO PARA O SENSOR DE PRESSÃO

Na Figura II.1 mostra-se o circuito eletrônico implementado para condicionamento dos sinais dos sensores de pressão.

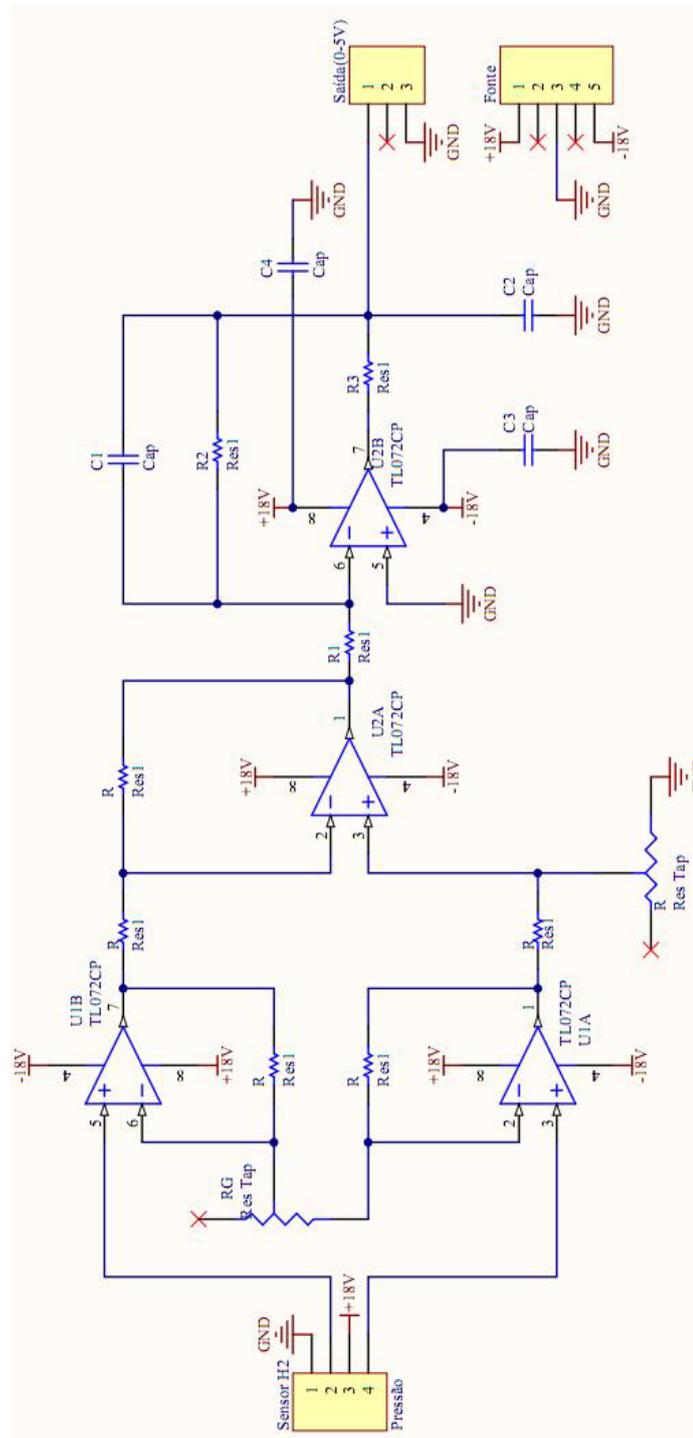


Figura II.1 - Circuito para tratamento do sinal dos sensores de pressão.

## ANEXO III - CIRCUITO PARA O SENSOR DE TENSÃO E CORRENTE

Na Figura III.1 mostra-se o circuito dos sensores de tensão e corrente.

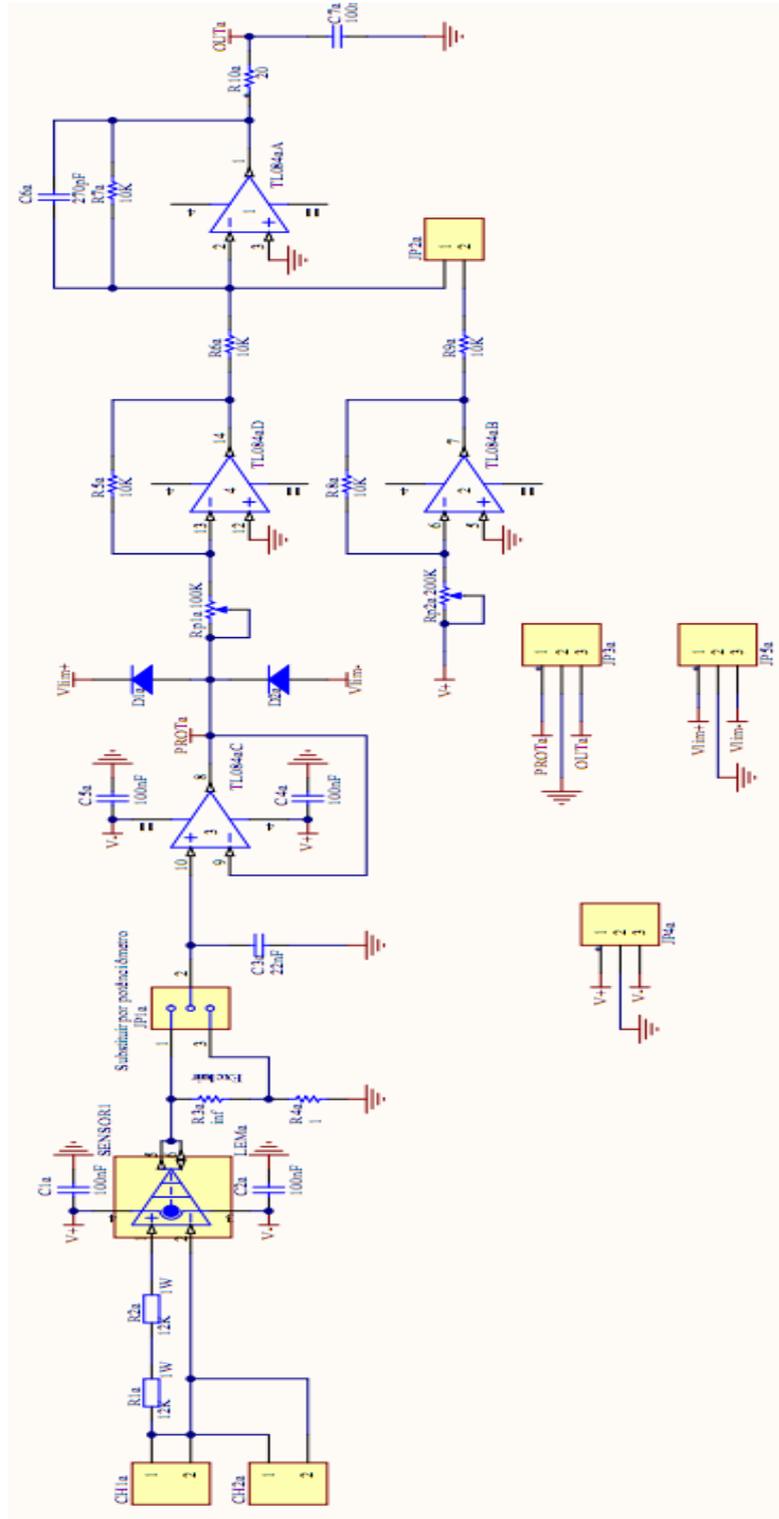


Figura III.1 - Circuito para tratamento do sinal dos sensores de corrente e tensão.

## ANEXO IV - PLACA ELETRÔNICA DO PIC E CARGA VARIÁVEL

Na Figura IV.1 mostra-se o placa eletrônica do microcontrolador PIC18F452 utilizada para implementação da rotina de by-pass na pilha.

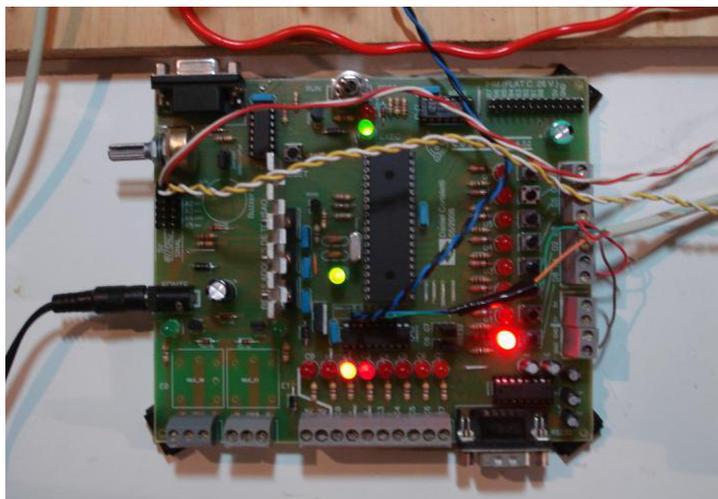


Figura IV.1 - Placa para utilização do microcontrolador PIC.

Na Figura IV.2 mostra-se o circuito simplificado correspondente à carga variável usada nos ensaios da CaC.

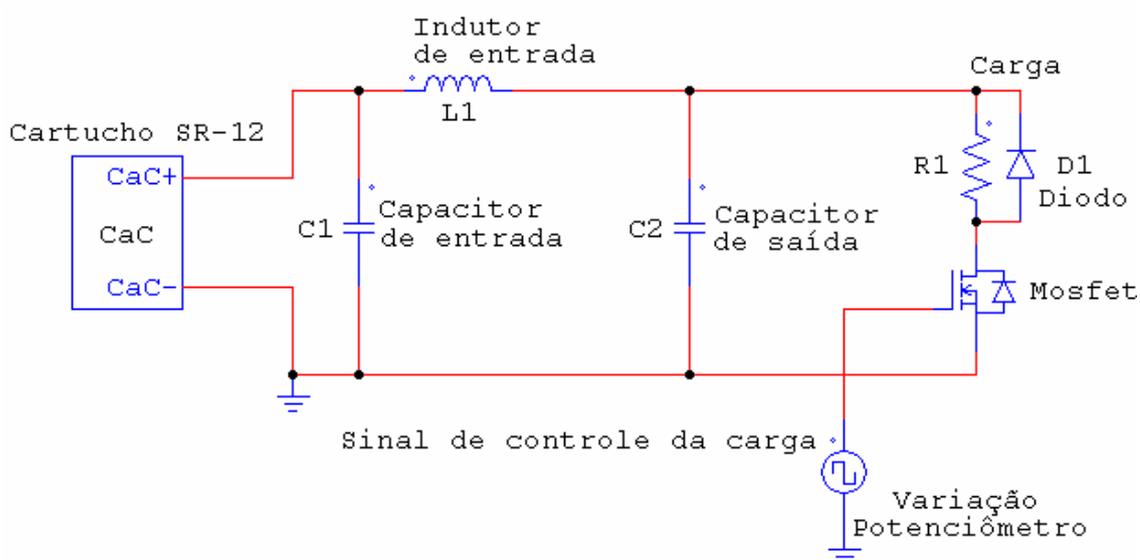


Figura IV.2 - Esquema simplificado da carga variável usada.