

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

**GERENCIAMENTO DA CLIMATIZAÇÃO DE  
CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA  
INTEGRAÇÃO COM A REDE DE ENERGIA  
ELÉTRICA VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Diego Berlezi Ramos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**UFSM**

**Tese de Doutorado**

Gerenciamento da climatização de células a combustível do  
tipo PEM para integração com a rede de energia elétrica  
visando à eficiência energética

---

**Diego Berlezi Ramos**

**PPGEE**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

GERENCIAMENTO DA CLIMATIZAÇÃO DE CÉLULAS A  
COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA INTEGRAÇÃO COM A REDE  
DE ENERGIA ELÉTRICA VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

---

**por**

**Diego Berlezi Ramos**

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

**Doutor em Engenharia Elétrica**

**PPGEE**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

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

A comissão examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**GERENCIAMENTO DA CLIMATIZAÇÃO DE  
CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA  
INTEGRAÇÃO COM A REDE DE ENERGIA  
ELÉTRICA VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

elaborada por  
**Diego Berlezi Ramos**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Felix Alberto Farret, Ph.D. – UFSM**  
(Presidente / Orientador)

---

**Lineu Belico dos Reis, Dr. – USP**

---

**Luiz Eduardo Borges da Silva, Ph.D. – UNIFEI**

---

**Luciane Neves Canha, Dra. – UFSM**

---

**Ghendy Cardoso Jr., Dr. – UFSM**

Santa Maria, 29 de Março de 2010

## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>LISTA DE NOMENCLATURAS .....</b>  | <b>v</b>   |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>01</b>  |
| 1.1 Eficiência energética .....  | 01         |
| 1.2 Perspectivas eficientes para o hidrogênio ( $H_2$ ).....                         | 02         |
| 1.3 Células a combustível .....  | 04         |
| 1.4 Justificativa .....  | 07         |
| 1.5 Objetivos .....  | 11         |
| 1.6 Organização do trabalho .....  | 12         |
| <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: CÉLULA A COMBUSTÍVEL .....</b>                | <b>14</b>  |
| 2.1 Introdução .....   | 14         |
| 2.2 Central geradora baseada em CaCs.....  | 15         |
| 2.3 Reações internas da célula .....   | 16         |
| 2.4 Modelo matemático e considerações comportamentais da CaC.....                    | 18         |
| 2.4.1 Hidrogênio ( $H_2$ ) .....   | 21         |
| 2.4.2 Oxigênio ( $O_2$ ) .....   | 25         |
| 2.4.3 Conteúdo de água da membrana (umidade) .....                                   | 27         |
| 2.4.4 Temperatura.....   | 29         |
| 2.4.5 Correções nos cálculos para $P_{H_2}$ e $P_{O_2}$ .....                        | 30         |
| 2.4.6 Resposta a transitórios.....   | 32         |
| 2.4.7 Tensão ôhmica.....   | 36         |
| 2.4.8 Tensão de difusão .....  | 38         |
| 2.4.9 Análise do balanço de energia.....   | 39         |
| 2.5 Eficiência das células a combustível.....  | 42         |
| 2.6 Resumo do capítulo.....  | 45         |
| <b>CAPÍTULO 3 – MODELAGEM E CONTROLE DE CACs USANDO ALGORITMOS NEURO-FUZZY .....</b> | <b>47</b>  |
| 3.1 Introdução .....   | 47         |
| 3.2 Modelagem neuro-fuzzy .....  | 48         |
| 3.2.1 Construção do modelo ANFIS para a CaC.....                                     | 54         |
| 3.3 Controle fuzzy.....  | 64         |
| 3.3.1 Programação dos controladores fuzzy.....                                       | 73         |
| 3.4 Resumo do capítulo.....  | 96         |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM A CÉLULA A COMBUSTÍVEL .....</b>        | <b>98</b>  |
| 4.1 Introdução .....   | 98         |
| 4.2 Avaliação comportamental da CaC.....   | 98         |
| 4.2.1 Variação da pressão do hidrogênio ( $P_{H_2}$ ).....                           | 99         |
| 4.2.2 Variação da temperatura.....   | 101        |
| 4.2.3 Variação da umidade relativa ( $UR$ ) .....                                    | 103        |
| 4.2.4 Variação do fluxo de ar ( $Q_{ar}$ ).....                                      | 105        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.2.5 Efeitos adicionais observados .....  | 107        |
| 4.3 Resumo do Capítulo.....  | 114        |
| <b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS: MODELAGEM E CONTROLE DA EFICIÊNCIA DA A CÉLULA A COMBUSTÍVEL .....</b> | <b>115</b> |
| 5.1 Introdução .....   | 115        |
| 5.2 Modelo neuro-fuzzy CaC SR-12.....  | 116        |
| 5.2.1 Coleta e seleção de dados para treinamento do modelo .....   | 117        |
| 5.2.2 Validação do modelo ANFIS .....  | 118        |
| 5.3 Controladores fuzzy para aumento da eficiência .....   | 121        |
| 5.3.1 Controlador fuzzy para a pressão do $H_2$ ( $P_{H_2}$ ).....   | 121        |
| 5.3.2 Controlador fuzzy para o fluxo do ar de entrada ( $Q_{ar}$ ) .....   | 128        |
| 5.3.3 Controlador fuzzy para a temperatura do ar de reação ( $T_{ent}$ ) .....                                   | 132        |
| 5.3.4 Controlador fuzzy para a umidade relativa ( $UR$ ) .....   | 135        |
| 5.4 Avaliação experimental do controlador fuzzy .....  | 144        |
| 5.4.1 Controlador fuzzy experimental para a $P_{H_2}$ .....  | 146        |
| 5.4.2 Controlador fuzzy experimental para o fluxo do ar.....   | 148        |
| 5.4.3 Controlador fuzzy experimental para a temperatura .....  | 149        |
| 5.4.4 Controlador fuzzy experimental para a umidade relativa.....  | 151        |
| 5.4.5 Controlador fuzzy experimental simultâneo .....  | 153        |
| 5.5 Sumário dos ganhos de eficiência obtidos .....   | 154        |
| 5.6 Comentários finais .....   | 155        |
| 5.7 Resumo do Capítulo.....  | 157        |
| <b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....</b>   | <b>158</b> |
| 6.1 Aspectos inovadores da pesquisa .....  | 160        |
| 6.2 Principais contribuições .....   | 161        |
| 6.3 Sugestões para a continuidade do trabalho .....  | 162        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>165</b> |
| <b>APÊNDICES .....</b>   | <b>172</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>203</b> |

## RESUMO

Tese de Doutorado

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

### GERENCIAMENTO DA CLIMATIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM PARA INTEGRAÇÃO COM A REDE DE ENERGIA ELÉTRICA VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

AUTOR: DIEGO BERLEZI RAMOS

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PH.D

CO-ORIENTADOR: NATANAEL RODRIGUES GOMES, DR.

As células a combustível (CaCs) representam uma alternativa para gerar energia de forma ambientalmente amigável. Especificamente, estes equipamentos requerem apenas um combustível (em geral, hidrogênio) e um oxidante (oxigênio ou ar) para gerar eletricidade, água e calor como resultado de reações eletroquímicas promovidas através de uma membrana polimérica sólida – o eletrólito da reação. As CaCs com membrana de troca protônica (*Proton Exchange Membrane - PEM*) têm recebido maior atenção da indústria. Isso se deve por suas características de funcionamento: baixa temperatura de operação, simplicidade construtiva, modularidade, portabilidade e eficiência. Entretanto, o desempenho destes dispositivos é suscetível a influências externas, tais como a pressão (ou fluxo) dos reagentes, temperatura de operação, conteúdo de água acumulado na membrana, carga demandada e condições climáticas. Esta sensibilidade torna a eficiência da CaC altamente variável. Para contornar este problema esta tese propõe o gerenciamento da CaC dentro de condições específicas para uma operação eficiente. Faz-se isso pela coordenação simultânea das principais variáveis que afetam a eficiência do gerador: temperatura, pressão e umidade em relação à sua característica  $V \times I$ . O algoritmo de controle proposto mantém a CaC em sua região linear de operação, onde as perdas são balanceadas, resultando em um aproveitamento mais racional do combustível. Considerando-se a complexidade relativa aos processos intrínsecos de climatização da montagem membrana-eletrodo (MEA) de uma CaC, adotam-se algoritmos inteligentes baseados em redes neurais e lógica fuzzy para simular o comportamento da CaC e controlar sua operação de forma eficiente. Estes efeitos são mostrados por resultados práticos causados pela ocorrência simultânea dos fatores externos mencionados. O tratamento isolado destas variáveis não permite atingirem-se níveis mais altos de eficiência. Com a análise dos dados pode-se desenvolver um algoritmo de controle usando inferência fuzzy. Estes dados também permitem a simulação usando um sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS), que simplifica a modelagem. Um dos principais focos de interesse para o uso de CaCs refere-se à integração com múltiplas fontes alternativas. Também se considera a possibilidade de conexão com uma rede principal. Para realizar esta conexão supõe-se que o gerador esteja sujeito às variações de carga decorrentes de um ilhamento. Isto é usado como justificativa para desenvolver o algoritmo de controle, que busca manter condições eficientes de operação da CaC após a mudança de carga. Os resultados simulados e práticos com CaCs mostram que é possível atingirem-se aumentos de níveis de eficiência na faixa de 5 a 20%, sem comprometer o consumo de combustível e a integridade da membrana.

**Palavras-chave:** eficiência de células a combustível, membrana de troca protônica, controle fuzzy, modelagem ANFIS, ilhamento.

## ABSTRACT

PhD Thesis

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

### PEM FUEL CELLS MANAGEMENT TO INTEGRATION WITH THE POWER GRID AIMING AT THE OPERATIONAL EFFICIENCY

AUTHOR: DIEGO BERLEZI RAMOS

ADVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PH.D

CO-ADVISOR: NATANAEL RODRIGUES GOMES, DR.

Fuel cells (FCs) offer a friendly environmental way to generate energy. Specifically, these devices require only a fuel (generally, hydrogen) and an oxidizer (pure oxygen or air) to produce electricity, water and heat. It is a result of the electrochemical reactions occurring in a polymeric solid membrane. The Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) are calling attention by special characteristics: low operational temperature, simplicity, modularity, portability and efficiency. However, its energetic performance is highly susceptible to external influences: reactants pressure (or flux), operational temperature, membrane water content, weather and load conditions. This sensitivity makes the FC efficiency highly variable. Thus, this thesis proposes a FC management within specific efficient operating conditions. It is accomplished by simultaneous coordinating the main variables affecting generator's efficiency: temperature, pressure and humidity. The proposed algorithm maintains the FC working within its linear operating region. Here, the losses are limited by rational fuel utilization. Considering the intrinsic and relative complexity of the relationships to stabilize the PEMFC membrane electrode assembly (MEA) this thesis uses intelligent algorithms, such as neural networks and fuzzy logic to emulate the FC behavior and to promote an efficient operation. These effects are checked with practical results obtained with simultaneous occurrence of the above mentioned external factors. The isolated treatment of these variables does not allow to reach higher efficiency levels. With the obtained data analysis it is possible to develop a control algorithm by using a neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to simplify the FC modeling task. One of the main FC generator applications relies on the wide range of power source integration. Also, it is considered the main grid connection, assuming that the generator is subjected to load variations as a result of islanding events. It is a critical situation, mainly when there is load sharing between the local generator and the main grid, which is used as a reference to justify the control algorithm ability to track the operational FC efficiency after any load variation. FC simulated and practical results show that it is possible to reach ranges between 5 to 20% of higher efficiency levels without adversely affecting fuel consumption and membrane integrity.

**Keywords:** fuel cells efficiency, proton exchange membrane, fuzzy logic control, ANFIS modeling, islanding.

## Lista de Nomenclaturas

|                |  |
|----------------|--|
| CHP            | Sistemas combinados de calor e eletricidade ( <i>Combined Heat and Power</i> )                   |
| HHV            | Poder calorífico superior ( <i>Higher Heating Value</i> )  |
| LHV            | Poder calorífico inferior ( <i>Lower Heating Value</i> )   |
| PEM            | Membrana de troca de prótons ( <i>Proton Exchange Membrane ou Polymer Electrolyte Membrane</i> ) |
| PI             | Compensador PI (proporcional/integral)   |
| PWM            | Modulação por largura de pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )                                 |
| THD            | Distorção harmônica total ( <i>Total Harmonic Distortion</i> )                                   |
| ANEEL          | Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| ANFIS          | Adaptive Neurofuzzy inference system   |
| CA             | Corrente alternada   |
| CC             | Corrente contínua  |
| CPU            | Central processing unit  |
| DG ou GD       | Distributed generation ou Geração distribuída  |
| DOE            | Department of Energy   |
| DSP            | Digital Signal Processor   |
| FC ou CaC      | <i>Fuel cell</i> ou célula a combustível   |
| GM             | <i>grid connected mode</i>   |
| IM             | <i>islanding mode</i>  |
| PEMFC          | <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>  |
| PWM            | <i>Pulse width modulation</i>  |
| RNA            | Rede Neural Artificial   |
| SIF ou (FIS)   | Sistema de Inferência Fuzzy ou <i>Fuzzy Inference System</i>                                     |
| SPWM           | <i>Sinusoidal PWM</i> (PWM senoidal)   |
| $A$            | área ativa da célula ( $cm^2$ );   |
| $a_c$          | parâmetro de atividade química para o catodo;  |
| $C_a$          | capacitância de ativação ( $F$ )   |
| $C_{H^+}^*$    | concentração de prótons na interface membrana/gás no lado do cátodo ( $mol/cm^3$ )               |
| $C_{H_2}^*$    | concentração na fase líquida do hidrogênio na interface anodo/gás ( $mol/cm^3$ )                 |
| $C_{H_2O}^*$   | concentração de água na interface membrana/gás do cátodo ( $mol/cm^3$ )                          |
| $C_{O_2}^*$    | concentração de oxigênio na interface membrana/gás do cátodo ( $mol/cm^3$ )                      |
| $E$            | Potencial termodinâmico ( $V$ )  |
| $E_{Nernst}$   | Potencial de Nernst ( $V$ )  |
| $\eta_{CaC}$   | Eficiência termodinâmica da célula a combustível (%)   |
| $F$            | Constante de Faraday ( $96.487C/mol$ )   |
| $j$            | densidade de corrente ( $A/cm^2$ )   |
| $I$            | corrente ( $A$ )   |
| $I_{CaC}$      | corrente da célula a combustível ( $A$ )   |
| $k_a^0, k_c^0$ | taxa intrínseca das reações para o anodo e catodo, respectivamente ( $cm/s$ )                    |
| $l$            | espessura da membrana polimérica ( $cm$ )  |
| $LHV_{H_2}$    | valor do baixo aquecimento do hidrogênio ( $J/kg$ )  |
| $m, n$         | coeficientes de transferência de massa   |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\dot{m}_{H_2}$              | fluxo de massa do hidrogênio ( $kg / s$ )   |
| $MW_{H_2}$                   | massa molecular do hidrogênio ( $kg / mol$ )  |
| $P_a, P_c$                   | pressão total do anodo e do catodo, respectivamente ( $atm$ )   |
| $P_{H_2}^*, P_{O_2}^*$       | pressão parcial do hidrogênio e do oxigênio na interface catalisador/gás do anodo na interface catalisador/gás do catodo, respectivamente ( $atm$ ) |
| $P_{H_2O}^{sat}$             | pressão do vapor d'água saturado ( $atm$ para as equações (2.12) e (2.14) e $bar$ para a equação 2.15)  |
| $R$                          | constante dos gases ( $8.314J / molK$ )   |
| $R_{at}$                     | resistência de ativação ( $\Omega$ )  |
| $R_{con}$                    | resistência dos contatos ( $\Omega$ )   |
| $R_{interna}$                | resistência interna total ( $\Omega / cm^2$ )   |
| $\rho_M$                     | resistividade específica da membrana para o fluxo de prótons hidratados ( $\Omega / cm$ )   |
| $T$                          | temperatura da célula ( $K$ )   |
| $V_{CaC}$                    | tensão da célula a combustível ( $V$ )  |
| $W_{bruta}$                  | potencia total de saída ( $W$ )   |
| $\Delta G_c^o$               | energia livre padrão para a reação do catodo ( $J / mol$ )  |
| $\Delta G_a^o$               | energia livre padrão para a adsorção química* proveniente do estado gasoso ( $J / mol$ )  |
| $z$                          | elétrons por molécula de hidrogênio ( $z = 2$ )   |
| $V_{at}$                     | tensão de ativação ( $V$ )  |
| $V_{dif}$                    | tensão de difusão ( $V$ )   |
| $V_{ohm}$                    | tensão ôhmica ( $V$ )   |
| $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ | coeficientes semiempíricos para o cálculo da tensão de ativação   |
| $\alpha_c$                   | coeficiente de troca ( $\approx 1/2$ )  |

# INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Eficiência Energética

É prevista uma crescente demanda energética mundial (na ordem de 44%) entre 2006 e 2030 [1]. Este evento tem refletido diretamente no aumento do consumo de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo e, principalmente no uso de fontes renováveis. Assim, o uso de todas as fontes disponíveis tende a crescer consideravelmente. Além disso, acrescentam-se as preocupações relativas aos impactos ambientais dos combustíveis fósseis e os fortes investimentos e incentivos governamentais da maioria dos países incentivando a penetração das energias renováveis no mercado. Portanto, existem estimativas positivas para uso das energias alternativas, tais como demonstrado na Figura 1.1. Neste contexto, as fontes renováveis apresentam as mais rápidas taxas de crescimento (3% ao ano) devido aos preços projetados para os barris de petróleo (US\$200,00/barril) para os próximos anos.

Dentre as energias renováveis de maior interesse, encontram-se os painéis solares, os geradores eólicos, a biomassa e os biocombustíveis. Porém, a necessidade de se incrementar o uso das fontes renováveis, um desafio (ou mesmo, um problema) vem à tona: por altos custos envolvidos de geração, em geral, grande parte das tecnologias para conversão energética de fontes alternativas conhecidas são pouco eficientes. Portanto, novas metodologias que elevem os níveis de eficiência de conversão devem ser pesquisados e avaliados.

Os painéis processam energia solar e a convertem em eletricidade. Com a tecnologia atualmente disponível, os painéis tem baixos rendimentos, dependendo ainda de armazenamento da energia gerada pela não regularidade de fatores como insolação,

temperatura e outras características do painel utilizado. Isto limita seus níveis de eficiência a faixas inferiores a 20%, em média.

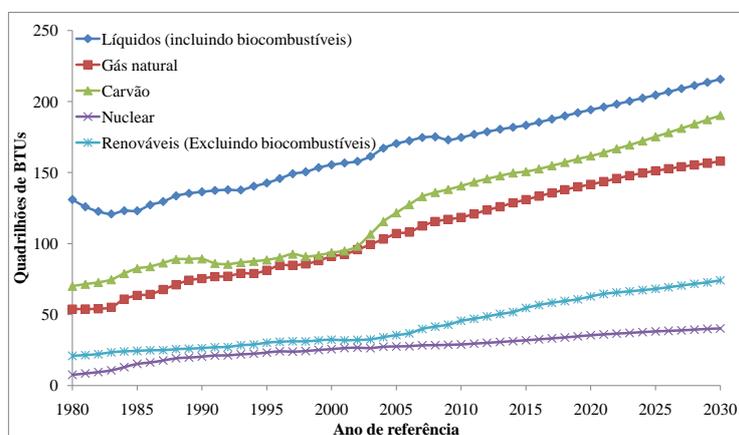


Figura 1.1 – Estimativas de uso de energia proveniente de fontes comercializáveis. Fonte [1]

Os geradores eólicos processam a energia cinética dos ventos transformando-a em eletricidade. No entanto, estes requerem locais adequados para sua instalação. Estes devem ser situados em regiões com características favoráveis à coleta de energia dos ventos. Isso limita sua eficiência a faixas inferiores a 60%, aproximadamente.

Fontes baseadas em biomassa e biocombustíveis acabam por terem os mesmos níveis de rendimentos que o carvão [2] com, no máximo, 25% em média.

No Brasil, a preocupação com o uso das fontes renováveis não é recente [3-9]. No caso brasileiro, boa parte do potencial hidroelétrico é desperdiçada [10] com a liberação de águas das barragens para equalização de sua capacidade física de retenção hidráulica. Este potencial extra de energia cinética das águas poderia ser convertido em outras formas de armazenamento, tal qual o hidrogênio ( $H_2$ ).

## 1.2 Perspectivas Eficientes para o Hidrogênio ( $H_2$ )

A principal alternativa às fontes tradicionais, que se vislumbra num horizonte relativamente próximo, é a tecnologia do  $H_2$  que já está se estabelecendo em escala mundial. Isto se deve principalmente a progressiva elevação dos custos dos

combustíveis fósseis baseados em petróleo [11]. O  $H_2$  representa uma autonomia energética em potencial para diversos países [12-15].

Os fatores que favorecem o uso do  $H_2$  são os seguintes: é naturalmente abundante e menos poluente em relação a outros elementos, tem maior eficiência (alta densidade energética) e, pode ser obtido a partir de recursos diversos.

A Figura 1.2 compara a densidade energética do  $H_2$  a outros tipos de combustíveis. Com relação à sua massa equivalente, tem um potencial de liberação de energia muito maior. Aproximadamente cinco vezes mais alta que o alumínio (usado como combustível de foguetes).

O  $H_2$  não é uma fonte primária. É um portador de energia e deve ser produzido a partir de outras fontes para ser utilizado posteriormente. A Figura 1.3 [16] apresenta, de forma ilustrativa e sintética, alguns dos principais meios de obtenção de  $H_2$  e os maiores potenciais de aplicação (os tamanhos dos setores não têm correlação com as expectativas de mercado). As largas faixas de opção de fontes, conversões e aplicações mostradas na Figura 1.3, apesar de não exaurirem o tema, ilustram a flexibilidade dos recursos baseados em  $H_2$ .

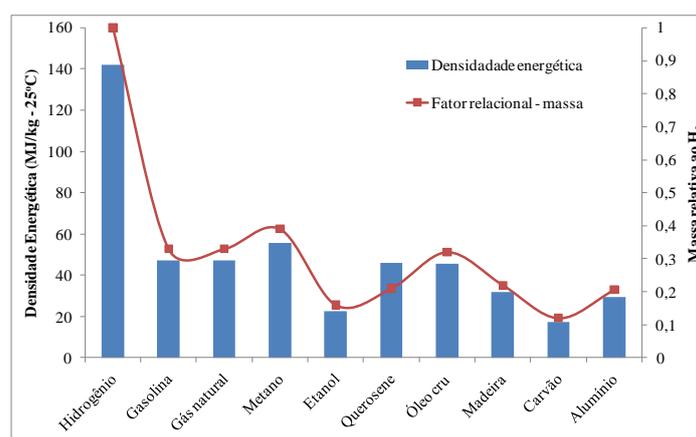


Figura 1.2 – Densidade energética do  $H_2$  - massa relativa ao  $H_2$ . Fonte: adaptado de [16]

No caso do Brasil, a fonte primária de produção de  $H_2$  poderia advir diretamente de centrais hidroelétricas [10,17]. Entretanto, apesar das várias

possibilidades de uso do  $H_2$  (Figura 1.3), as células a combustível (CaCs) tendem a ser o seu principal foco de aplicação, como é visto a seguir.

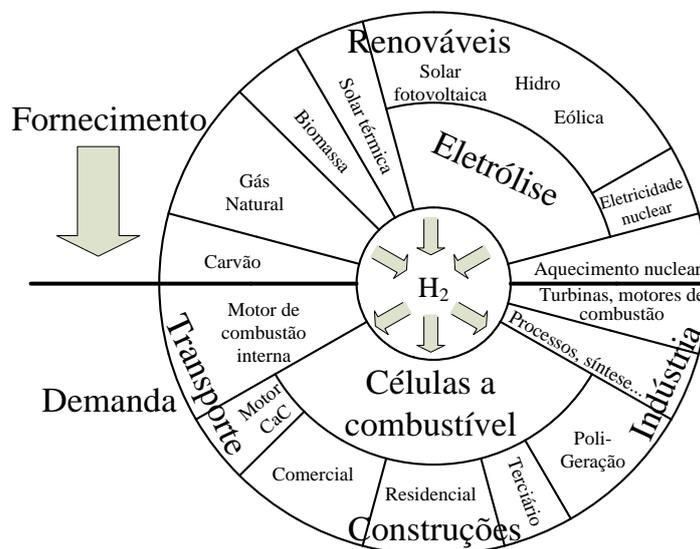


Figura 1.3 – Principais formas de geração e uso do  $H_2$ . Fonte: adaptado de [14]

### 1.3 Células a Combustível

A célula a combustível (CaC ou *FC – Fuel Cell*) é um conversor eletroquímico que transforma energia química de um “combustível” diretamente em eletricidade [15,18]. Como regra geral, um processo de geração elétrica a partir de combustíveis envolve várias etapas para a conversão de energia:

1. Conversão do combustível de energia química para calor (por combustão);
2. Uso do calor para produção de vapor;
3. Uso do vapor para movimentação de uma turbina, em um processo que converte energia térmica em mecânica;
4. Conversão eletromecânica de energia por meio da movimentação de um gerador.

A CaC circunscreve estes processos e produz energia em uma única etapa, sem requerer partes móveis, o que lhe confere maiores níveis de eficiência dada a capacidade

de conversão com poucas perdas, tornando-a interessante ao mercado [19]. Ela é mais simples e, portanto, menos dispendiosa e com eficiência mais elevada que os processos de geração que utilizam os passos descritos. A geração eletroquímica com a CaC consome  $H_2$  e  $O_2$ , produzindo eletricidade, calor e água. Uma vez que a CaC promove a reação do  $H_2$  com o  $O_2$  liberando energia elétrica, água e calor, pode-se dizer que é, em si mesma, ambientalmente amigável e limpa, quase livre de emissões nocivas.

Como principais vantagens que favorecem os investimentos nas CaCs podem-se citar [15,18,19] a simplicidade construtiva, a operação silenciosa, ausência de partes móveis, confiabilidade e isenção de emissões, alta eficiência, abundância do  $H_2$ , a combinação de calor e potência, a aplicação em geração distribuída, o controle (pela redução ou corte) dos picos de carga, as baixas temperaturas de operação (principalmente para CaC de baixa temperatura) e a larga gama de aplicações.

Como os equipamentos essenciais à operação de CaCs usam poucas partes móveis, isso aumenta sua confiabilidade, conferindo-lhe uma vida útil estimada maior do que a esperada para geradores rotativos. Ainda, os ruídos produzidos na geração são reduzidos, limitando-se a sons produzidos por compressores, ventiladores dentre outros. Entretanto, a eficiência da CaC é afetada pela operação dos equipamentos auxiliares, demandando melhores técnicas de controle dos conjuntos destes equipamentos. Se os periféricos que permitem a adequada operação da CaC forem gerenciados adequadamente, níveis de eficiência ainda maiores podem ser obtidos de centrais geradoras baseadas em CaCs. No entanto, estas funções devem ser criteriosamente monitoradas e controladas, pois a CaC tem sua eficiência bastante afetada por fatores climáticos externos e internos tais como a temperatura de operação, a pressão dos reagentes, a umidade relativa na membrana, afetada tanto pelo ar de entrada quanto pela quantidade de água produzida pelas reações e acumulada na membrana e nos canais internos da pilha, dentre outros.

A eficiência da conversão de energia da CaC quando comparada com outras fontes é elevada, em geral, acima de 40% para geração elétrica apenas e acima de 80% (se for aproveitado o calor gerado simultaneamente). A Figura 1.4 compara as eficiências das CaCs com outras fontes, de origem térmica. A Figura 1.5 exemplifica a larga faixa de aplicações de CaCs e as potenciais fontes de geração de combustível para aplicação das mesmas.

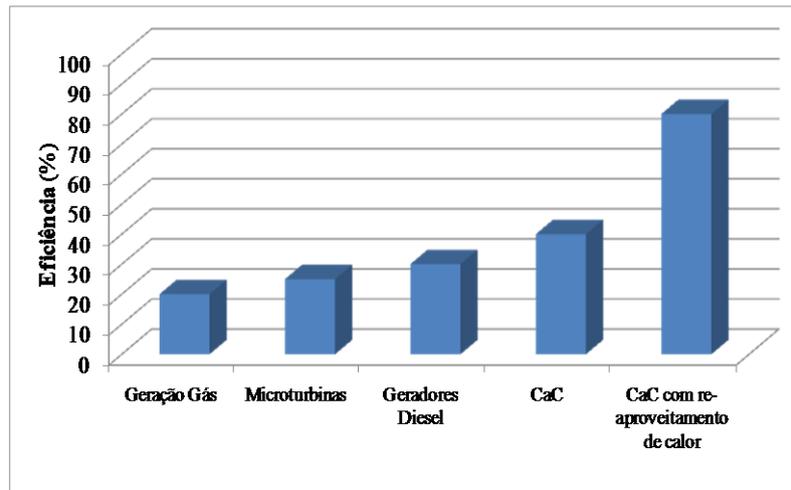


Figura 1.4 – Comparativo da eficiência da CaC com outras fontes

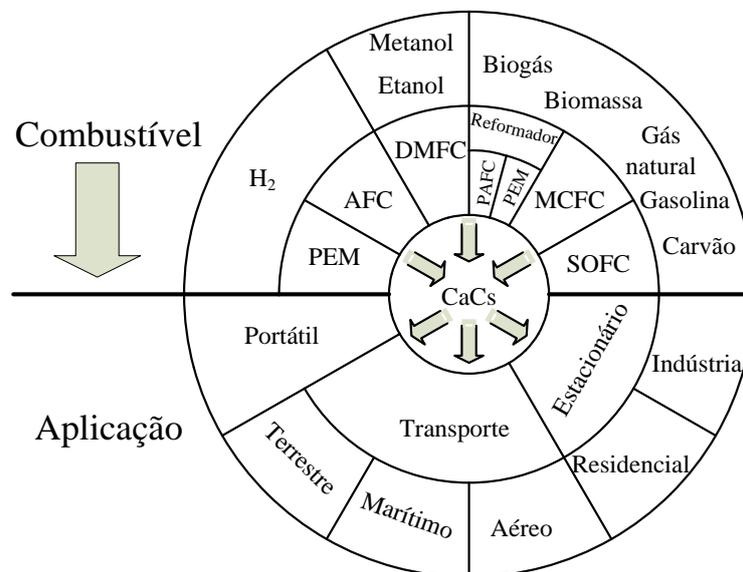


Figura 1.5 – Fontes de combustível e setores de aplicação das CaCs. Fonte: adaptado de [14]

As CaCs do tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) apresentam vantagens e desvantagens quando comparadas com outros tipos de células [2,15,18,19] – tais como *Phosphoric Acid (PAFC)*, *Direct Methanol (DMFC)*, *Alkaline (AFC)*, *Solid Oxide (SOFC)*. Como vantagens principais, podem-se citar a rápida inicialização (praticamente imediata), baixo peso e volume, dispensa fluídos corrosivos, baixas temperaturas de operação (30~100 (°C)) e uma relação peso/potência favorável. A principal desvantagem está na necessidade de catalisadores constituídos de metais nobres, geralmente a platina (sensível ao envenenamento por *CO*), de custo elevado.

Assim, este é um fator adicional que torna o gerenciamento adequado da CaC uma atividade crítica. É necessário promover a extração do maior nível possível de energia do gerador, sem comprometer a sua vida útil, dados os custos de produção.

Ao se analisar os documentos produzidos por [1,11-13] observa-se uma priorização pelo uso de CaCs do tipo PEM. Pode-se dizer que este tipo de CaCs garante o alto grau de popularidade dadas as suas características e potenciais aplicações, tanto nas áreas de geração quanto automotiva. Atualmente, seu valor comercial de venda para usuários é, em geral, de U\$ 4.000,00/kW [20], em média.

#### 1.4 Justificativas

A CaC é uma das principais aplicações para uso do  $H_2$  em geração alternativa. Assim, muitas discussões têm sido conduzidas. Observa-se que ainda não há estudos definitivos sobre a melhor forma de operar uma CaC, com relação a sua vida útil, consumo e, principalmente, sua eficiência.

As CaCs possuem uma faixa de potência nominal ao operar na região mais linear de sua curva característica  $V \times I$ . Nesta região de operação, existem vantagens na relação custo-benefício, tanto do ponto de vista do consumo de  $H_2$  quanto sobre a longevidade do gerador. É nesta região de operação em que se baseia esta proposta de tese.

As CaCs são comercialmente promissoras, apesar do seu custo. Porém, sua eficiência de conversão energética é motivo pelo qual muitas das diferentes tecnologias de fabricação são ainda mantidas em sigilo por indústrias e grupos de pesquisas. Assim, o desenvolvimento de um recurso de automação para esse gerador, tanto para atuar como fonte isolada ou conectada a rede é de suma importância para ampliar o conhecimento, dominar a tecnologia, e dar continuidade a pesquisas nesta área.

Entretanto, por si só, uma CaC não é capaz de fornecer energia de forma adequada e eficiente. São requeridos equipamentos adicionais como compressores (para os gases de entrada), circuito de refrigeração (incluindo exaustores e bombas de água, para determinadas CaCs), conversores CC/CC, dentre outros.

A automação das CaCs pode ser dividida em duas partes: interna e externa. A externa refere-se ao uso da energia do gerador, baseado nas necessidades do utilitário ao qual ela está conectada. Esta função relaciona-se com eletrônica de potência, sistemas elétricos, técnicas de controle e otimização.

A automação interna visa operar a CaC propriamente dita. Seu controle depende do conhecimento de detalhes construtivos do gerador, comportamento eletroquímico e térmico, dentre outros. O controle deve garantir o bom desempenho e vida útil, atuando diretamente sobre o fluxo de gases, a pressão, a estequiometria, a temperatura e a umidade relativa, além das variáveis elétricas: rendimento eletroquímico, corrente e tensão. A automação interna é o foco desta tese, com o objetivo maior de buscar operar a pilha sem danos à membrana, com mínimas perdas, confiabilidade, segurança e de forma eficiente. A ênfase se dá por manter a CaC operando dentro de características pré-determinadas de eficiência, principalmente quando em regime permanente.

Como uma das possibilidades desta tese, visa-se aplicações de geração distribuída em regiões remotas ou micro-redes com possibilidade de operação ilhada. Dentre estas se podem citar zonas rurais ou outros ambientes distantes de grandes centros de distribuição. Assim, pode-se aumentar a qualidade no fornecimento, de forma eficiente e sem comprometimento da vida útil da fonte primária. O conjunto (CaC tipo PEM incluindo conversor e inversor) pode estar conectado a uma rede principal (*grid connected mode - GM*) ou operar de forma isolada (*islanding mode - IM*). Nestas condições instáveis de operação onde, por razões diversas (falhas na rede principal, manutenção e outras condições de desconexão), o gerador pode sofrer variações na potência requerida, tornam-se necessários meios para realizar a manutenção dos níveis de eficiência energética solicitados da CaC. Para manter a CaC operando na faixa adequada de eficiência, o equipamento de climatização deve adaptar sua operação para as novas condições de carga, sem desperdício de combustível e sem colocar em risco a integridade do gerador.

No caso de operação em IM, a interface deve gerir a potência extraída da CaC para alimentar a carga local, sem provocar sobrecarga e manter a eficiência dentro de níveis adequados, com mínimas perdas e protegida de situações estressantes. No caso de operação GM, a fonte e a rede principal devem compartilhar a potência fornecida à carga, caso necessário.

A estrutura proposta é dada na Figura 1.6. Os detalhes sobre o desenvolvimento do gerenciador da CaC, dos condicionadores de energia (conversor CC/CC e inversor CC/CA) e dos respectivos algoritmos de controle são detalhados ao longo desta tese.

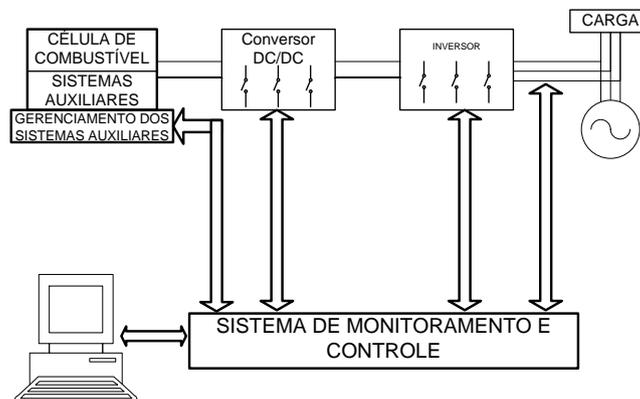


Figura 1.6 – Diagrama geral do sistema proposto

Como a ANEEL tem estimulado investimentos na geração com fontes alternativas [21], abre-se mercado para os empreendedores de fontes alternativas.

A geração distribuída (GD) é um intenso foco de pesquisas nos últimos anos, principalmente em decorrência de fatores econômicos e ambientais. Dentre uma das grandes preocupações encontra-se a capacidade de integração de múltiplas fontes de energia. A GD pode apresentar soluções energéticas com um maior custo-benefício para alguns clientes, sendo favorável do ponto de vista ambiental, ou mesmo fornecendo altos níveis de potência com qualidade e confiabilidade relativamente elevadas [22,23]. Neste contexto, abre-se espaço para a ampliação do uso de CaCs, principalmente quando se considera o seu potencial de uso do ponto de vista da eficiência.

Um dos maiores retardadores para a disseminação das CaCs ainda é o custo elevado do kWh. No entanto, deve-se levar em consideração que o potencial dos recursos naturais no Brasil permite a produção local de  $H_2$ , que pode ser aplicado para gerar energia por meio de CaCs. Considerando-se a possibilidade de transferência do excedente, esse recurso pode contribuir para descentralizar a matriz geradora. Entretanto, a obtenção de energia a partir da CaC deve ser feita de forma a maximizar

sua eficiência. Assim, este trabalho tem seu foco no sentido de se obterem níveis maiores de eficiência na produção de energia elétrica pela CaC.

Como os custos ainda são elevados, isso limita parcialmente a avaliação técnica necessária da operação destes geradores. Assim, são requeridos modelos que permitam analisar as respostas das CaCs sob determinadas situações de demanda. Os modelos para CaCs comumente disponíveis [18,26-34], apesar de basearem-se em equações bem definidas pelas teorias eletroquímicas [35], necessitam do conhecimento de determinados parâmetros intrínsecos. Em geral, estes são de difícil obtenção, seja por limitações tecnológicas para sua determinação (equipamentos de medição) ou por constituírem de informações restritas aos fabricantes. Esse problema compromete parte da tarefa de modelagem no equacionamento do modelo, forçando a adoção de componentes empíricos. Dessa forma, buscar obter padrões comportamentais de uma CaC a partir dessas equações pode se mostrar uma tarefa complexa e enfadonha. Como a CaC é uma estrutura altamente não-linear, a localização de valores satisfatórios para estes parâmetros pode se tornar uma rotina demorada.

Como opção para modelar e controlar sistemas não-lineares, considerando as dificuldades de modelagem citadas, tem-se os sistemas inteligentes [36,37]. Dentre os algoritmos considerados “inteligentes”, encontram-se a lógica fuzzy, redes neurais, redes neuro-fuzzy e, mais recentemente, os algoritmos ANFIS (*Adaptive Neuro-fuzzy Inference System*). Estes sistemas tratam a planta de interesse como uma caixa-preta (*black-box*). Sua estrutura lógica interna permite “emular” o padrão de comportamento da estrutura modelada, fornecendo uma saída similar à realidade, com relação aos valores de excitação na entrada.

O aspecto diferencial desta tese encontra-se na proposta de uma alternativa para manter a eficiência da CaC dentro de condições pré-estabelecidas, através de modelagem e controle simultâneo e multivariável de CaCs tipo PEM usando ANFIS e Fuzzy. Estas ferramentas permitem o tratamento da CaC de forma mais simplificada que as técnicas de modelagem e controle clássicas, que se valem de equações paramétricas não-lineares com alto grau de complexidade.

A vantagem de algoritmos ANFIS para modelagem refere-se a uma característica única: a geração automática e seletiva de uma estrutura interna própria de inferência Fuzzy aliada a um posterior processamento neural. É estimado que a aplicação de algoritmos neuro-fuzzy multi-variáveis permitam modelar o

comportamento da CaC de forma que as curvas de eficiência possam ser melhor avaliadas, com base na realidade físico-química da CaC e de forma desvinculada da aplicação de equações paramétricas. Esta independência de cálculos matemáticos por meio de parâmetros equacionais empíricos permite o acréscimo de variáveis adicionais ao modelo. As análises dos respectivos impactos destas variáveis sobre a eficiência do gerador assumem maior relevância do que suas próprias descrições matemáticas que, por diversas vezes se tornam severamente complexas e exaustivas, principalmente para desenvolvedores de algoritmos de controle não familiarizados com os aspectos eletroquímicos funcionais das CaCs.

## 1.5 Objetivos

O objetivo principal desta tese é promover a operação eficiente de CaCs tipo PEM pelo monitoramento e controle simultâneo dos seus parâmetros de funcionamento.

Concomitante a este objetivo principal busca-se o seguinte:

1. Estudar, de forma detalhada, os efeitos das principais variáveis que afetam a eficiência da CaC;
2. Introduzir um modelo que inclua as características operacionais dos processos usando uma abordagem não paramétrica;
3. Propor uma estratégia de controle e monitoramento adequada para esta aplicação;
4. Implementar um controlador capaz de operar incertezas tais como variações de carga, temperatura, pressão e/ou fluxo dos reagentes, e as múltiplas interações entre estas grandezas e outras variáveis de difícil consideração;
5. Propor uma interface de potência para tratamento da energia gerada pela CaC.

Ainda incluída na proposta desta tese, encontra-se a possibilidade do uso da CaC conectada a um sistema de GD com a vantagem de usá-la em modo ilhado, em caso de falta ou falha da rede principal. Para tal, são consideradas as variações devido ao ilhamento, fazendo-se com que o sistema de gerenciamento da célula monitore a

potência demandada pela célula, de tal forma a não causar danos à mesma, mantê-la funcionando em níveis de eficiência mais convenientes para cada situação e preservar o funcionamento da CaC dentro de sua região linear de operação. Enquanto isso, o controle da interface de potência (inversor CC/CA) deve prever a ocorrência do evento de ilhamento que isola a rede local, conectada à célula, do restante do sistema de distribuição principal.

## **1.6 Organização do trabalho**

O capítulo 1 é uma introdução geral, contextualizando o tema desta tese, justificando e salientando a importância e o diferencial do trabalho desenvolvido.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica de um sistema de CaC, realizando a análise comportamental do mesmo. Para tanto, são estudados os fenômenos com maior interferência na eficiência total do gerador.

No capítulo 3 propõe-se uma estratégia de modelagem e controle visando um aproveitamento mais racional da CaC, de forma a mantê-la em condições pré-definidas de eficiência. Neste estudo, avalia-se a possibilidade de uso de um sistema de gerenciamento baseado em algoritmos inteligentes, uma vez que estes se mostram bastante adequados para uso em sistemas com um alto nível de complexidade. Incluem-se nestas abordagens os periféricos necessários à operação correta da célula (compressores, sensores e equipamento de refrigeração), de forma a poder-se obter a energia necessária da pilha sem comprometer sua integridade.

O capítulo 4 fornece resultados provenientes de simulações e experimentos que visam verificar na prática o comportamento da CaC, bem como realizar uma coleta de dados para a construção de modelos.

O capítulo 5 apresenta a validação prática dos resultados pertinentes à possibilidade de manutenção dos níveis de eficiência da CaC, dentro de condições pré-definidas.

No capítulo 6 são apresentadas conclusões deste trabalho assim como a proposição de futuros trabalhos que porventura possam dar continuidade a tese.

Os apêndices apresentam informações referentes à aplicação das técnicas de modelagem e controle por meio de redes neurais, clusterização subtrativa e controladores fuzzy. Ainda são apresentadas as diferentes configurações de estruturas neurais avaliadas para a consideração das melhores definições do modelo neuro-fuzzy aplicado às CaCs utilizadas neste trabalho. Também se apresenta o projeto da interface de potência necessária ao condicionamento da energia fornecida pela CaC. São fornecidos os elementos necessários para o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de ilhamento. Este algoritmo deve ser capaz de controlar o inversor CC-CA no sentido de permitir que a fonte continue a suprir energia para a carga local, mesmo em situação de ausência da rede principal.

Os anexos discutem sobre a eficiência global das centrais geradoras baseadas em CaCs. São apresentados os detalhes dos circuitos de aquisição de dados, monitoramento e controle aplicados para a validação dos resultados experimentais obtidos neste trabalho. As curvas de calibração dos diversos sensores de pressão, temperatura e umidade relativa são mostradas, incluindo as equações necessárias para a linearização dos valores adquiridos. Também, nos anexos, apresentam-se os materiais e a metodologia utilizados para a validação prática da hipótese estabelecida nesta tese.

# REVISÃO

## BIBLIOGRÁFICA:

### CÉLULA A

### COMBUSTÍVEL

---

#### 2.1 Introdução

O crescimento e amadurecimento da tecnologia das células a combustível (CaCs) colocou-as no grupo das mais promissoras fontes para o futuro. Estes geradores oferecem um novo modo de produzir e armazenar energia cujo estudo ainda demanda novas formas de modelagem. Para caracterizá-las, avaliar a sua viabilidade de uso e visualizar o impacto de instalação em uma rede elétrica são necessários modelos e métodos de simulação que contemplem os diversos aspectos da complexidade de seu funcionamento, tirando-se o melhor proveito de seu funcionamento.

Comercialmente, as CaCs encontram-se disponíveis de forma modular [20,38] com potência de saída variando de kW até centenas de MW, oferecendo um amplo leque de aplicações, principalmente para geração distribuída (GD). O uso de modelos para cada uma possibilita aumentar a confiabilidade e possibilidade de redução de custos no dimensionamento, transmissão e distribuição de energia para locais remotos.

As CaCs têm se mostrado favoráveis para implementações estacionárias de baixa potência. Porém, o atual custo desta tecnologia, gira em torno de U\$4000,00/kW [20] (custo de aquisição) em média, para fontes de pequeno porte (até 10 kW). Assim, torna-se importante estudar métodos que permitam estender a vida útil deste equipamento e aumentar a eficiência de conversão.

Este Capítulo descreve o comportamento básico das CaCs com eletrólito polimérico sólido (*PEM - Proton Exchange Membrane*) e estabelece bases para elaborar modelos de geração elétrica baseados em CaCs, verificando quais seriam as condições ótimas de funcionamento. Com isto, são definidas faixas de eficiência otimizadas com vistas ao baixo consumo e desempenho satisfatório, sem degradação excessiva do equipamento. Deseja-se identificar os elementos que influenciam na eficiência total da CaC levando em conta as principais reações sob os pontos de vista macroscópico e microscópico. São priorizadas características como a dinâmica de alimentação de combustível, o comportamento elétrico e o controle. Estes são elementos fundamentais para operar a CaC dentro de condições desejadas de eficiência. Assim, a investigação conduzida nesta tese, permite estabelecer o comportamento requerido para a estratégia de gerenciamento a ser adotada.

## 2.2 Central geradora baseada em CaCs

A Figura 2.1 apresenta uma estrutura típica para uma pequena central de geração baseada em CaC [18]. Um esquema geral é apresentado, incluindo os equipamentos auxiliares da CaC (compressores, sopradores, tanque de armazenagem de  $H_2$  e equipamento de refrigeração), conversor CC/CC, banco de baterias e inversor CC/CA, para injeção da energia na rede e/ou compartilhamento de cargas. Em determinados modelos de CaCs também é usada a refrigeração à água, além do arrefecimento a ar .

Para analisar o impacto local sobre a rede de GD, requer-se o uso de modelos apropriados. No caso da geração local ser baseada em CaCs o modelo deve ser capaz de preencher alguns requisitos, considerando-se a aplicação conjunta a uma interface eletrônica com cargas variáveis. O modelo deve representar variações de potência, tensão e frequência com rapidez e boa precisão. Isto é útil para estudar a estabilidade, porém não o é, necessariamente, para caracterizar o comportamento do chaveamento (estudo das harmônicas) do conversor eletrônico.

Considerando estes aspectos, a referência [40] analisa os modelos mais adequados para simulação de CaCs conectadas a sistemas de potência. Observa-se que o modelo dinâmico é uma ferramenta útil para a previsão do comportamento das CaCs

sob perturbações na carga, partida e parada. Assim, verifica-se as informações transitórias de temperatura, tensão ( $V_{CaC}$ ) e potência ( $P_{CaC}$ ) da CaC em função do tempo. Porém, modelos baseados no equacionamento eletroquímico empregam técnicas empíricas para modelagem, fazendo uso de regressão linear para descrever os processos envolvidos. Conforme se aprofundam as pesquisas, essas técnicas têm sido substituídas por modelos mecanicistas. Porém, [40] não faz propostas para oferecer um modelo mais abrangente, que considere os elementos que afetam majoritariamente o desempenho da CaC: pressão, temperatura, umidade e potência fornecida.

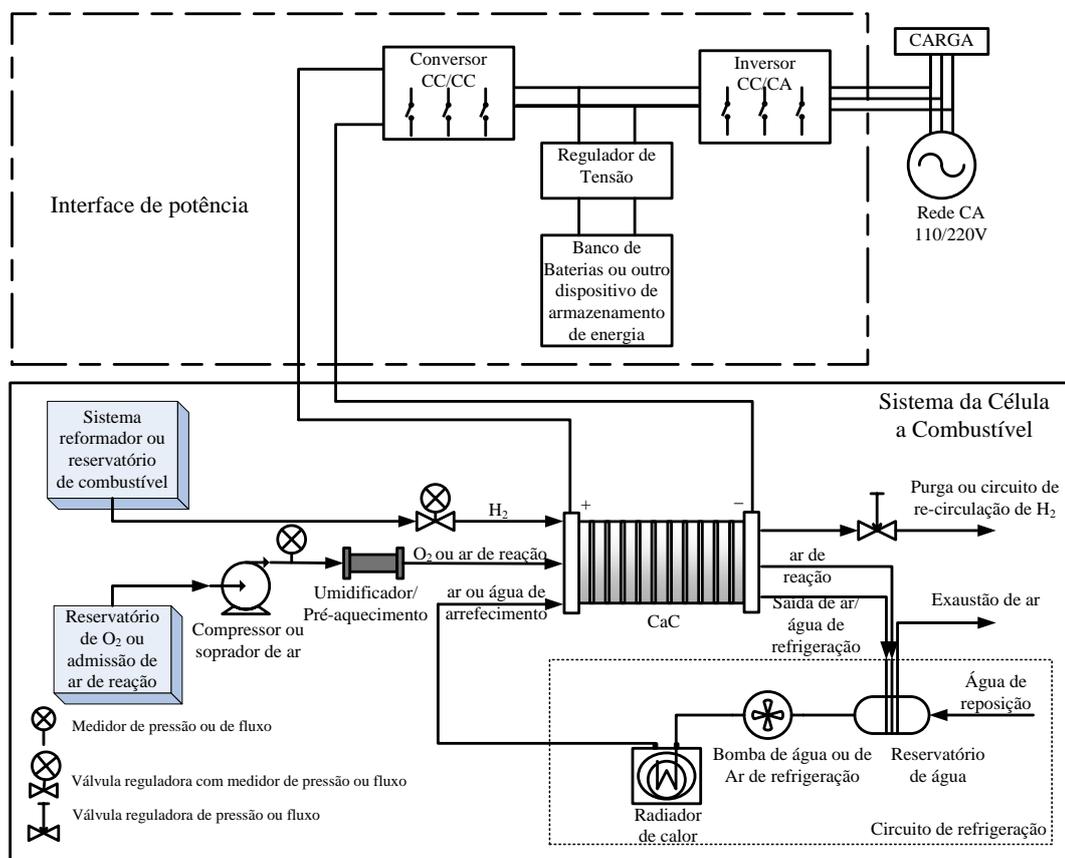


Figura 2.1 – Esquema de uma pequena central geradora baseada em CaC. [fonte: adaptado de [39]]

### 2.3 Reações internas da célula

A estrutura da CaC é descrita como dois eletrodos (ânodo e cátodo) separados por uma membrana polimérica sólida (*MEA*) (em geral, Nafion<sup>TM</sup>) que atua como

eletrólito (Figura 2.2). O  $H_2$  flui através de canais (*flowfield*) para o ânodo, onde é dissociado em prótons que atravessam pela membrana até o cátodo e em elétrons que circulam no circuito externo como corrente elétrica ligando os dois eletrodos. O oxidante (ar ou  $O_2$ ) flui por canais similares para o cátodo. O  $O_2$  se combina com os elétrons provenientes do circuito externo e com os prótons que fluem através da membrana. Esta combinação resulta em água, cujas reações químicas são:

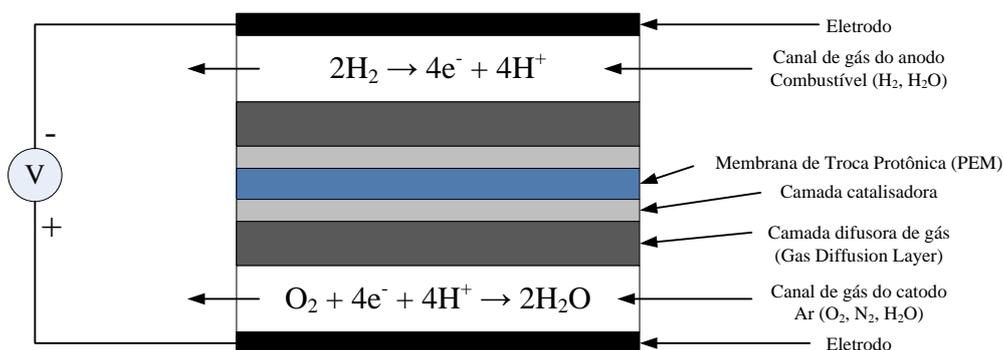
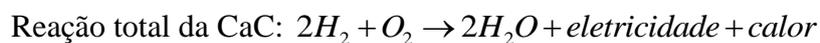
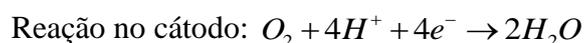
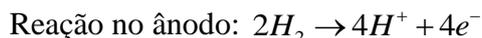


Figura 2.2. Esquema típico de uma CaC

Em [32,33] são feitas considerações a respeito da influência do Nafion<sup>TM</sup> usado para a construção da membrana, seus componentes e operação. É apresentada uma análise sobre o comportamento de um gerador MK-IV (fabricado pela Ballard<sup>TM</sup>), avaliando vários fatores influentes sobre o desempenho da CaC. Observa-se que a curva de polarização  $V \times I$  sofre alterações ao modificar-se as pressões de  $O_2$  ( $P_{O_2}$ ),  $H_2$  ( $P_{H_2}$ ), e a temperatura de operação da CaC. Esta análise tem o propósito de realizar uma avaliação dos fenômenos eletroquímicos correlatos utilizando-os para desenvolver um modelo baseado em ajuste de curvas. Com isto os autores pretendem apresentar um

modelo mecanicista e empírico, mas não conduziram experimentos objetivando melhorar o desempenho da pilha ou buscar pontos de eficiência otimizada.

## 2.4 Modelo matemático e considerações sobre comportamento da CaC

Conforme [31], a potência útil da célula só é obtida quando uma corrente ( $I_{CaC}$ ) é drenada. No entretanto, a tensão real da célula ( $V_{CaC}$ ) decresce desde a sua tensão de equilíbrio termodinâmico ( $E$ ) devido às perdas irreversíveis. Quando  $I_{CaC}$  flui, surge uma queda na tensão termodinâmica, correspondente ao trabalho elétrico realizado pela CaC. A tensão de equilíbrio ( $E$ ) indica o potencial ideal sem quedas de tensão ou perdas que se originam a partir da tensão (ou perdas) de ativação ( $V_{at}$ ), da queda de tensão ôhmica ( $V_{ohm}$ ) e da tensão de difusão (ou perdas de concentração) ( $V_{dif}$  ou  $V_{conc}$ ).

A expressão da tensão para uma única célula é apresentada na Equação (2.1).

$$E_{CaC} = E + V_{at} + V_{ohm} + V_{dif} \quad (2.1)$$

Em eletroquímica, a relação entre  $I_{CaC}$  e  $V_{CaC}$  é conhecida como curva de polarização ou curva característica  $V \times I$ . Esta curva representa o regime permanente e não contém informações sobre a forma como a CaC comporta-se durante transitórios. A Figura 2.3 mostra uma curva  $V \times I$  teórica da CaC relacionando  $V_{CaC}$  com a densidade de corrente ( $j$ ) representando assim os desvios de tensão causados pelas perdas expressas na Equação (2.1). Observa-se que a região inicial da curva é marcada por um forte desvio da tensão gerado pelas perdas nas reações químicas das energias internas de ativação. Na região mais linear de operação da célula predominam as perdas ôhmicas, em virtude das características resistivas da membrana polimérica. Ao final da curva característica, são dominantes as quedas de tensão devidas aos efeitos da saturação das reações (perdas por saturação ou difusão).

A tensão termodinâmica reversível entre  $H_2$  e  $O_2$  é dada pela Equação (2.2), conhecida como Equação de Nernst.

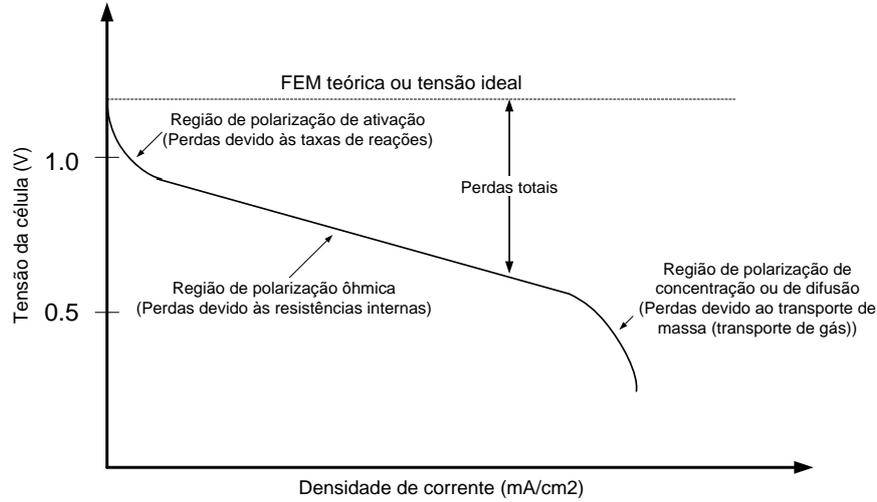


Figura 2.3. Característica teórica de polarização de uma CaC

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln[P_{H_2}^* \cdot (P_{O_2}^*)^{0.5}] \quad (2.2)$$

onde  $E_0$  é uma tensão de referência do potencial padrão do eletrodo de  $H_2$  [35] e os termos,  $P_{H_2}^*$  e  $P_{O_2}^*$  são as pressões parciais relacionados às concentrações de  $H_2$  e  $O_2$  no ânodo e no cátodo.

Uma expansão da Equação (2.2) é fornecida por [41,42] e tem a forma da Equação (2.3).

$$E = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \cdot 10^{-5} [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (2.3)$$

A tensão  $V_{at}$  origina-se da energia cinética da reação de transferência de carga através da interface eletrodo/eletrólito. Isto significa que uma parcela de tensão no eletrodo é reduzida pela reação de transferência de elétrons. Esta tensão é relacionada com a natureza das reações eletroquímicas e representa a magnitude da energia de ativação, quando a reação se propaga na taxa demandada pela corrente. A  $V_{at}$  é dividida em potenciais de ânodo e de cátodo ( $V_{act,a}$  e  $V_{act,c}$ , respectivamente), representados pelas Equações (2.4) e (2.5) [41,42,43].

$$V_{at,a} = -\frac{\Delta G_c}{2 \cdot F} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln(4 \cdot F \cdot A \cdot k_a^0 \cdot C_{H_2}^*) - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln(j) \quad (2.4)$$

$$V_{at,c} = \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot z \cdot F} [\ln(z \cdot A \cdot k_c^0 \cdot e^{\frac{(-\Delta G_a)}{RT}} \cdot (C_{O_2}^*)^{(1-\alpha_c)} \cdot (C_{H^+}^*)^{(1-\alpha_c)} \cdot (C_{H_2O}^*)^{\alpha_c})] \quad (2.5)$$

onde  $\Delta G_c$  é a energia livre padrão para a reação do cátodo ( $J/mol$ ),  $z$  é o número de equivalentes (elétrons perdidos ou ganhos) envolvidos na reação do cátodo,  $F$  é a Constante de Faraday ( $96.487C/mol$ ),  $T$  é a temperatura de operação da CaC ( $K$ ),  $A$  é a área ativa da membrana ( $cm^2$ ),  $k_a^0$  e  $k_c^0$  são as taxas intrínsecas das reações para o anodo e catodo, respectivamente ( $cm/s$ ),  $C_{H_2}^*$  é a concentração na fase líquida do hidrogênio na interface anodo/gás ( $mol/cm^3$ ),  $C_{O_2}^*$  concentração de oxigênio na interface membrana/gás do cátodo ( $mol/cm^3$ ),  $\alpha_c$  é um parâmetro de atividade química para o catodo, e  $j$  é a densidade de corrente ( $A/cm^2$ ).

Para obter-se uma expressão simplificada de  $V_{at}$ , as Equações (2.4) e (2.5) podem ser combinadas e reescritas (Equação (2.6)). Observa-se uma forte influência da temperatura de operação sobre as perdas de ativação.

$$V_{at} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(j) \quad (2.6)$$

onde  $\xi_i$  são coeficientes semiempíricos definidos pelas Equações (2.7) à (2.10).

$$\xi_1 = \left(-\frac{\Delta G_a}{\alpha_c \cdot z \cdot F}\right) + \left(-\frac{\Delta G_c}{2 \cdot F}\right) \quad (2.7)$$

$$\xi_2 = \frac{R}{\alpha_c \cdot z \cdot F} \ln[z \cdot F \cdot A \cdot k_c^0 \cdot (C_{H^+}^*)^{(1-\alpha_c)} \cdot (C_{H_2O}^*)^{\alpha_c}] + \frac{R}{2 \cdot F} [\ln(4 \cdot F \cdot A \cdot k_a^0 \cdot C_{H_2}^*)] \quad (2.8)$$

$$\xi_3 = \frac{R}{\alpha_c \cdot z \cdot F} \cdot (1 - \alpha_c) \quad (2.9)$$

$$\xi_4 = -\left(\frac{R}{\alpha_c \cdot z \cdot F} + \frac{R}{2 \cdot F}\right) \quad (2.10)$$

O uso dos  $\xi_i$  confere um significativo grau de liberdade quando o modelo é usado para simular uma pilha específica. Os termos  $\xi_i$  são obtidos a partir do procedimento de correção baseado no levantamento da curva  $VxI$ . Apesar de serem decorrentes de características inerentes a cada pilha, a literatura costuma usar valores muito próximos para diversos modelos de CaCs [31,42,43]. A sensibilidade às alterações destes parâmetros é estudada em [30]. Em [41] são apresentados diversos valores para os  $\xi_i$ , a partir dos quais são obtidas faixas de variação para os demais coeficientes das Equações (2.7) à (2.10). Estas aproximações costumam ser realizadas por diversos modelos como os apresentados na literatura [28-33,42,44]. Este cálculo e sua comprovação para cada CaC são relativamente complexos e sua validação depende de dados fornecidos por fabricantes ou por exaustivos testes experimentais.

#### 2.4.1 Hidrogênio ( $H_2$ )

As concentrações de água no ânodo e no cátodo têm um grande impacto nas perdas de ativação (influência da umidade). O  $H_2$  no ânodo e o  $O_2$  no catodo se espalham através de um filme de água para alcançar os locais ativos do catalisador. Espera-se que o lado do ânodo da membrana apresente uma baixa concentração de água, enquanto que o filme de água no lado do cátodo seja mais espesso em virtude da produção de água ocorrendo ali.

A concentração efetiva de  $H_2$  no lado do ânodo do catalisador pode ser aproximada pela concentração de  $H_2$  na interface água/gás no ânodo como expresso pela Equação (2.11).

$$C_{H_2}^* = \frac{P_{H_2}^*}{1.09 \cdot 10^6 e^{\left(\frac{77}{T}\right)}} \quad (2.11)$$

Por sua vez,  $P_{H_2}^*$  depende do conteúdo de água no canal do ânodo (suposto constante por aproximações de ordem zero) e é expresso pela Equação (2.12).

$$P_{H_2}^* = \frac{1}{2} \cdot P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[ \frac{1}{x_{H_2O} \cdot e^{\left(\frac{1.653 \cdot j}{T^{1.334}}\right)}} - 1 \right] \quad (2.12)$$

onde  $P_{H_2}^*$  é a pressão parcial do  $H_2$  na interface catalisador/gás do anodo (*atm*),  $P_{H_2O}^{sat}$  é a pressão do vapor d'água saturado (*atm*) e  $x_{H_2O}$  é a conteúdo de água (em %) na interface catalisador/gás.

A pressão efetiva de  $H_2$  ( $P_{H_2}$ ) é considerada constante para fins de simulação por boa parte da literatura. Porém, isso não é totalmente verdadeiro. Em [15,18] é feita uma ressalva para o fato de que há uma queda na pressão no lado do ânodo, conforme  $H_2$  é consumido como resultado da corrente sendo drenada. Esta redução em  $P_{H_2}$  resulta da variação do fluxo de gás nos dutos que causa queda de  $P_{H_2}$  devido à resistência do fluido. Esta redução depende de  $I_{CaC}$  (e, portanto, do consumo de  $H_2$ ) e das características físicas dos periféricos de manutenção de combustível. Conseqüentemente, com a redução da pressão do gás, há uma redução em  $V_{CaC}$ . Há consenso entre os pesquisadores de que não há uma solução analítica global plenamente satisfatória para o problema da modelagem das variações da tensão devido a esta redução de pressão. Normalmente, são propostas algumas aproximações que no entretanto possuem desvantagens peculiares quanto ao seu grau de exatidão. Para elaborar uma estratégia de climatização adequada, torna-se interessante realizar uma análise da viabilidade da correção deste problema em particular, uma vez que a redução de  $P_{H_2}$  causa um desvio na eficiência. Na prática, a variação de  $P_{H_2}$  pode chegar a 5%, afetando apreciavelmente a eficiência da CaC.

Na Figura 2.5, pode ser visualizada a curva característica  $V \times I$  de uma CaC de 6 kW. Suas condições nominais são dadas no Quadro 2.1. Os valores apresentados nesta são obtidos na folha de especificações de uma CaC NedStack PS6 [45], e implementadas em MatLab/Simulink™.

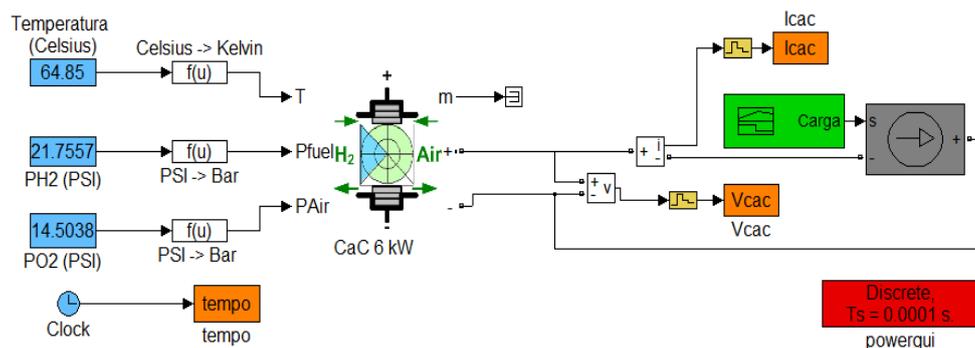


Figura 2.4. Modelo de CaC em MatLab/Simulink™

A Figura 2.6 descreve os efeitos da variação de  $P_{H_2}$  para esta CaC de 6kW, mantendo a temperatura de operação,  $P_{O_2}$  e umidade constantes. Esta figura apresenta os resultados de simulações de uma CaC em MatLab/Simulink™. A corrente  $I_{CaC}$  é variada desde zero até seu valor máximo (225 A, aproximadamente) para obter-se uma representação aproximada do comportamento do gerador a cada condição de operação. Na região onde predominam perdas de concentração, verifica-se que a CaC não atinge maiores potências. Isso decorre dos problemas de transporte de gases nesta faixa de funcionamento do gerador. É possível observar que a eficiência pode ser levemente elevada com o aumento de  $P_{H_2}$ . Um aumento de 20,0% na pressão do  $H_2$  não produz uma elevação acima de 1,0% em  $V_{CaC}$ , neste caso.

|  |                      |        |  |         |        |
|--|----------------------|--------|--|---------|--------|
| Potência ( W )                             | Nominal              | 5998,5 | Composição do combustível ( $x_{H_2}$ (%) )                        | 99,95   |        |
|  | Máxima               | 8325,0 | Composição do oxidante ( $x_{O_2}$ (%) )                           | 21,0    |        |
| Resistência interna ( $\Omega$ )           | 0,075675             |        | Taxa de fluxo de combustível à utilização nominal do $H_2$ ( lpm ) | Nominal | 50,06  |
| Tensão de Nernst para uma célula ( E )     | 1,1288               |        |  | Máxima  | 84,50  |
| Utilização nominal ( % )                   | Hidrogênio ( $H_2$ ) | 99,56  | Taxa de fluxo de ar à utilização nominal do oxidante ( lpm )       | Nominal | 300,0  |
|  | Oxidante ( $O_2$ )   | 59,30  |  | Máxima  | 506,40 |
| Consumo nominal ( slpm )                   | Combustível          | 60,38  | Temperatura nominal de operação ( K )                              | 338,0   |        |
|  | Ar                   | 143,70 | Pressão nominal do $H_2$ ( kPa )                                   | 150,0   |        |
| Densidade da corrente de troca $i_0$ ( A ) | 0,016049             |        | Pressão nominal do ar ( kPa )                                      | 100,0   |        |

Quadro 2.1 – Parâmetros nominais da CaC de 6 kW. Obs.:  $100kPa = 1bar = 14,50PSI$

Observa-se que elevar a  $P_{H_2}$  muito acima de seu valor nominal contribui mais para o desperdício de  $H_2$ . Na prática, este aumento deve ser criteriosamente dosado uma vez que isso pode incorrer em desperdício de gás. Em CaCs reais os efeitos desta variação podem diferir em amplitude para cada tipo de gerador e condições de operação.

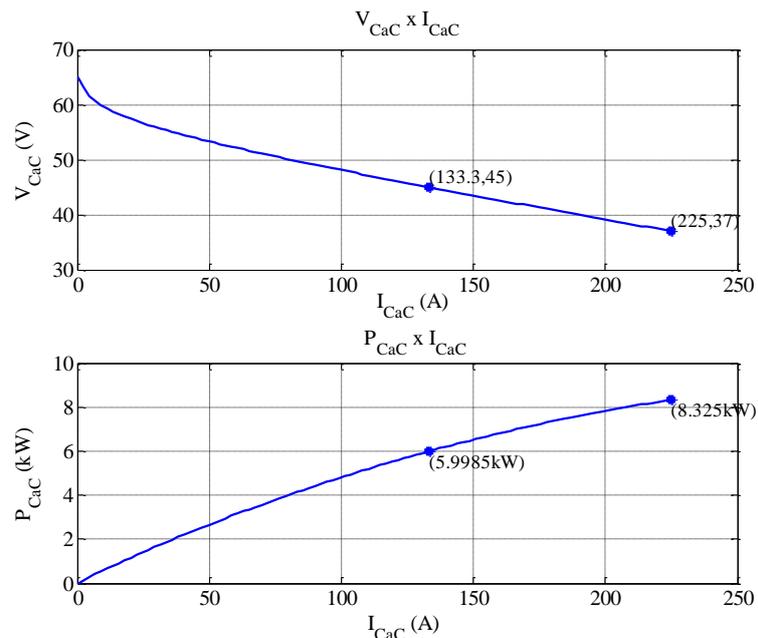
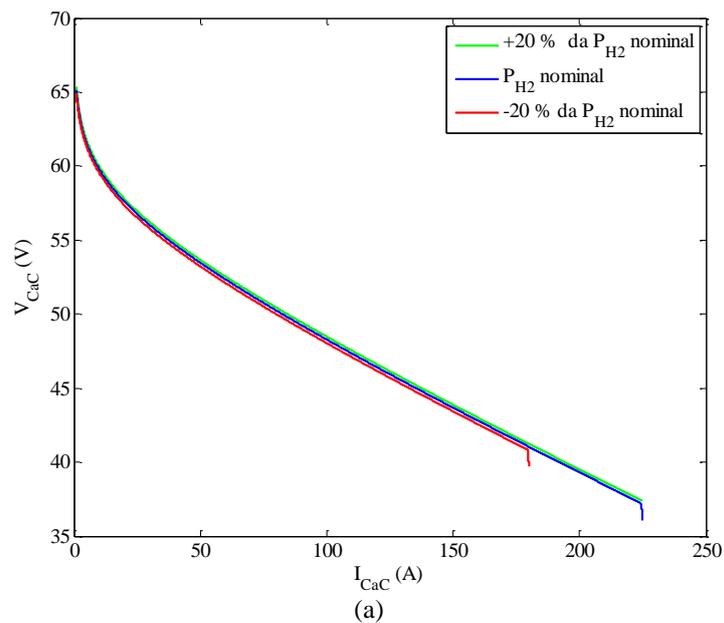


Figura 2.5 – Característica nominal de operação para a CaC



(a)

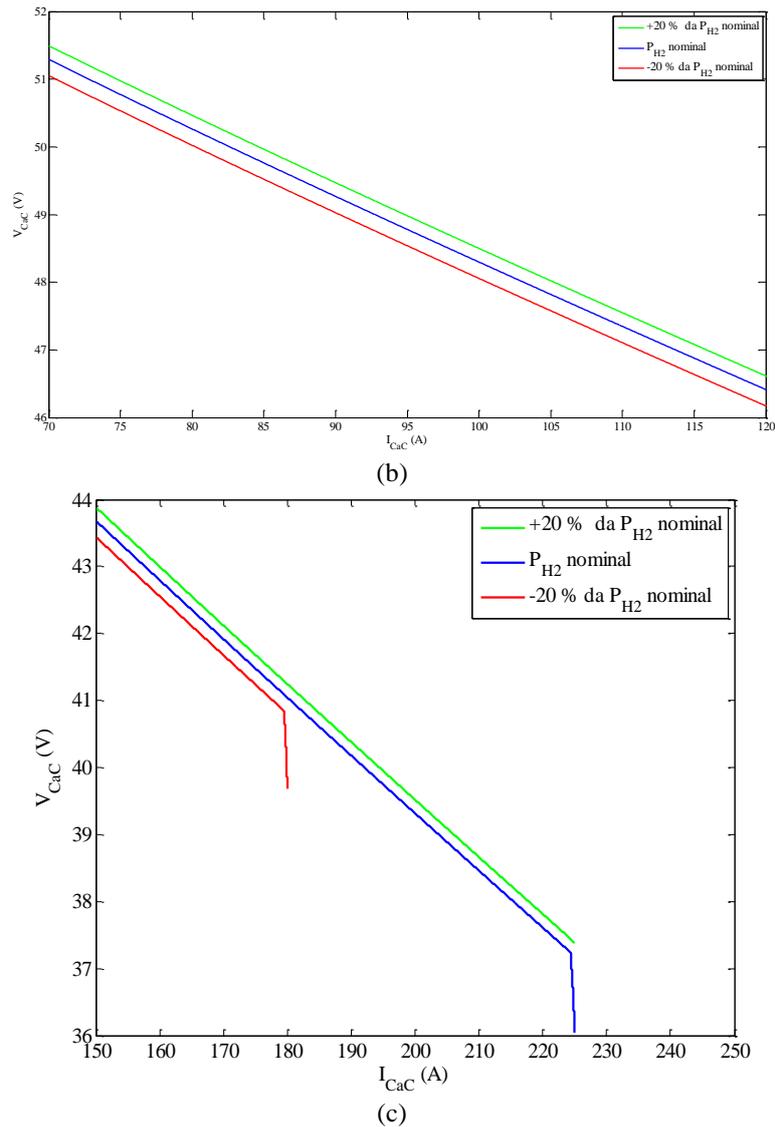


Figura 2.6 – (a) Efeito da variação da  $P_{H_2}$ , (b) detalhe da região linear de operação da CaC, para a variação da  $P_{H_2}$ , (c) detalhe da região onde predominam perdas de concentração

#### 2.4.2 Oxigênio ( $O_2$ )

A concentração efetiva de  $O_2$  no lado do cátodo do catalisador pode ser aproximada pela concentração de  $O_2$  na interface água/gás (Equação (2.13)). A pressão  $P_{O_2}^*$  na interface água/gás é relacionada a concentração de água no canal do cátodo como dado pela Equação (2.14).

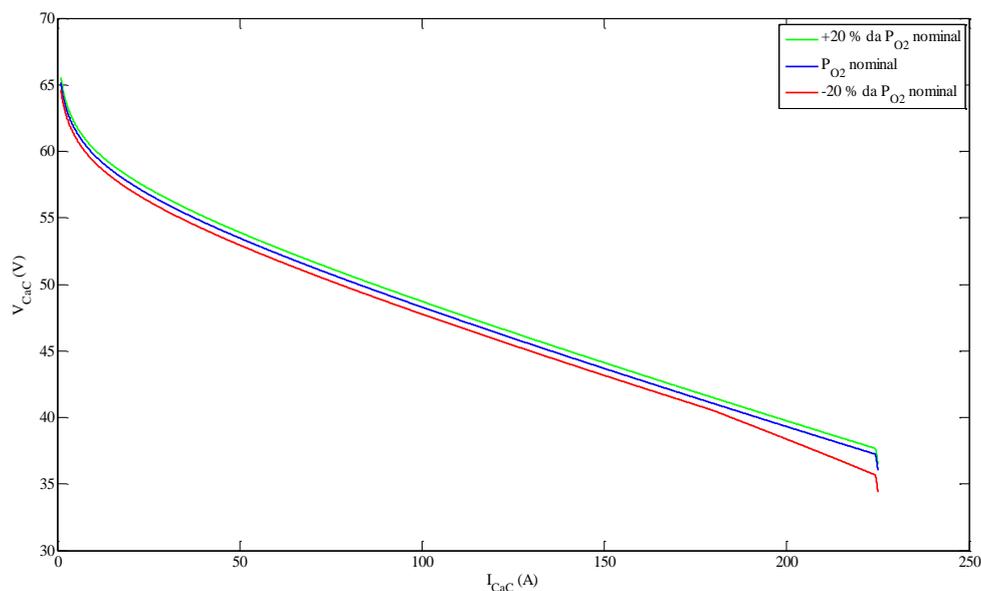
$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{\left(\frac{-498}{T}\right)}} \quad (2.13)$$

$$P_{O_2}^* = P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[ \frac{1}{x_{H_2O} \cdot e^{\left(\frac{4.192 \cdot j}{T^{1.334}}\right)}} - 1 \right] \quad (2.14)$$

Para [31] a pressão de saturação do vapor de água ( $P_{H_2O}^{sat}$ ) é função da temperatura da e é calculada de acordo com a Equação (2.15).

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2.1794 + 0.02953 \cdot (T - 273.15) - 9.1837 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273.15)^2 + 1.4454 \cdot 10^{-7} \cdot (T - 273.15)^3 \quad (2.15)$$

A Figura 2.7 demonstra os efeitos da variação de  $P_{O_2}$  para a CaC de 6kW. A  $P_{O_2}$  é variada em  $\pm 20\%$  de seu valor nominal. Isso produz alterações na eficiência em torno de  $\pm 1,2\%$ . Isto pode ser explicado pelo fato de que o fluxo do reagente promove uma melhor remoção do conteúdo de água do lado do cátodo. As reações são facilitadas e as transferências na superfície da membrana são feitas de forma mais eficaz. Os valores maiores no fornecimento de  $O_2$  estabelecem relações estequiométricas mais apropriadas ao consumo dos reagentes em função das condições operacionais do gerador.



(a)

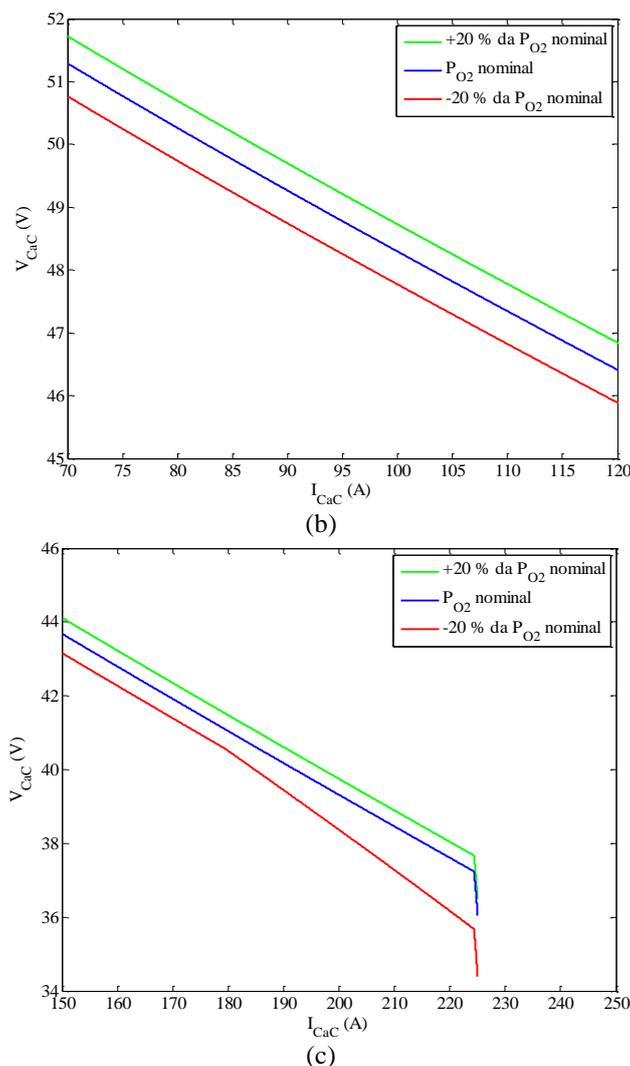


Figura 2.7 – (a) Efeito da variação de  $P_{O_2}$ , (b) detalhe da região linear de operação da CaC, para a variação de  $P_{O_2}$ , (c) detalhe da região onde predominam perdas de concentração

#### 2.4.3 Conteúdo de água da membrana (umidade)

Especial cuidado deve ser tomado com o gerenciamento de água da CaC [46]. Uma boa hidratação pode garantir a adequada migração de prótons  $H^+$  do ânodo para o catodo, visto que a condutividade do polímero depende da hidratação da membrana [47]. Em muitos casos, existe um circuito especial de circulação de água dentro da pilha (pilhas com auto-umidificação). Mesmo assim, o monitoramento do nível de umidade do ar de entrada ou de saída da CaC pode permitir melhor ajuste do controle da umidade por meio de um umidificador e/ou secador de ar externo.

A referência [47] salienta que para temperaturas acima de  $60^{\circ}\text{C}$  a umidade relativa do ar é abaixo ou muito abaixo de 100% para todos os valores razoáveis de estequiometria. A variação da umidade relativa versus temperatura para a saída de ar de CaCs do tipo PEM em duas relações estequiométricas  $\lambda$  é apresentada na Figura 2.8. Isto leva a conclusão de que a umidificação extra dos gases reagentes pode ser necessária para células operando acima de  $60^{\circ}\text{C}$ . Além disso, referindo-se à Figura 2.8, se a temperatura for mantida abaixo de  $60^{\circ}\text{C}$ , é possível definir-se uma estequiometria capaz de manter a umidade do ar em torno de 100%. Para baixas temperaturas, esta será obtida numa estequiometria de, aproximadamente,  $\lambda = 24$ . Isto pode parecer como sendo um grande fluxo de ar, mas na prática não é, pois de acordo com [2], este fluxo pode ser garantido por um pequeno ventilador. Esta característica dificulta a escolha da temperatura de operação ótima de uma CaC. Quanto maior a temperatura, mais alta a eficiência, principalmente porque as perdas no lado do cátodo são reduzidas. Entretanto, acima de  $60^{\circ}\text{C}$ , para resolver o aumento dos problemas de umidificação, podem ser acrescentados aos dispositivos de suporte da CaC equipamentos adicionais que promovam a correta umidificação. Isto pode aumentar os custos e afastar a possibilidade de se ter um gerador pequeno. Uma das chaves para corrigir o equilíbrio de água na célula é o ajuste de  $P_{\text{O}_2}$  (ou do fluxo de ar) e, portanto, da estequiometria.

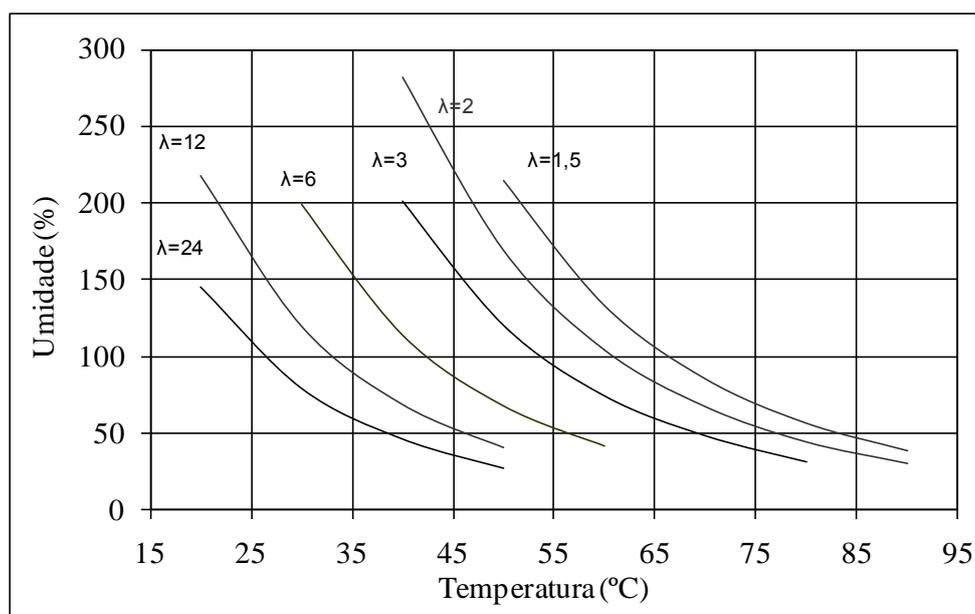
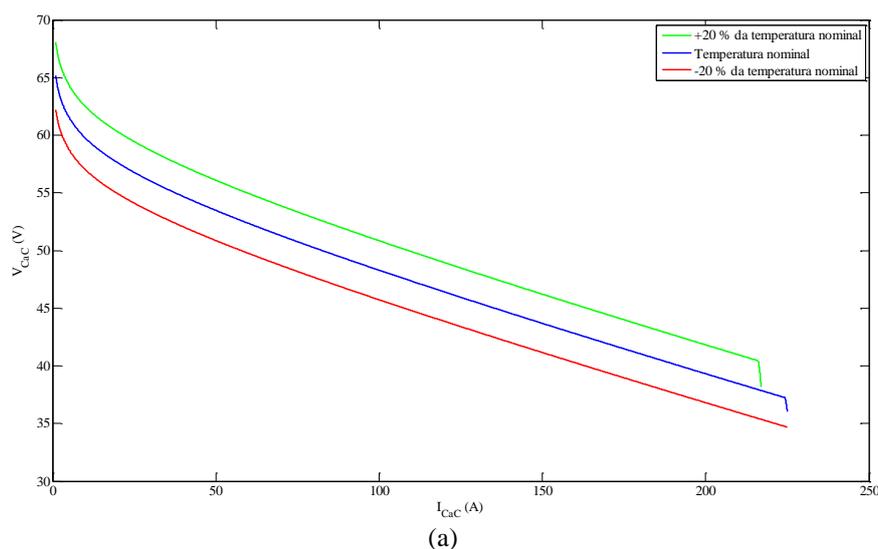


Figura 2.8 – Gráfico Umidade Relativa x Temperatura, para algumas razões estequiométricas, pressão de 1 kPa, com ar de entrada a  $20^{\circ}\text{C}$  e 70% de umidade relativa.

#### 2.4.4 Temperatura

Na Figura 2.9 são apresentados as simulações para a variação da temperatura de operação. Comparando-se os resultados da variação de temperatura com os resultados da variação de  $P_{H_2}$  e  $P_{O_2}$  observa-se que a temperatura tem maior impacto sobre a eficiência, principalmente na região linear de operação ( $\pm 5,9\%$ , aproximadamente).

Avaliando-se os resultados até aqui discutidos, observa-se que na região onde predominam as perdas por difusão, o gerador tem dificuldades em atingir maiores potências. Nesta região cada grandeza possui um efeito distinto. Isso denota não apenas distorções nos efeitos isolados de cada variável, mas também evidencia as desvantagens da operação do gerador na região mais extrema da curva. Assim, conclui-se que, apesar do fabricante estimar uma potência máxima do gerador nesta região, torna-se desvantajoso operar a pilha neste nível de potência. Para fins de controle, isto também é dificultado, pois demanda análises mais aprofundadas e tempo computacional mais oneroso. Conclui-se que utilizar a pilha majoritariamente em sua região linear seria o procedimento mais adequado e seguro, mesmo considerando-se a possibilidade de subutilização parcial, isto é não usá-la na máxima potência possível.



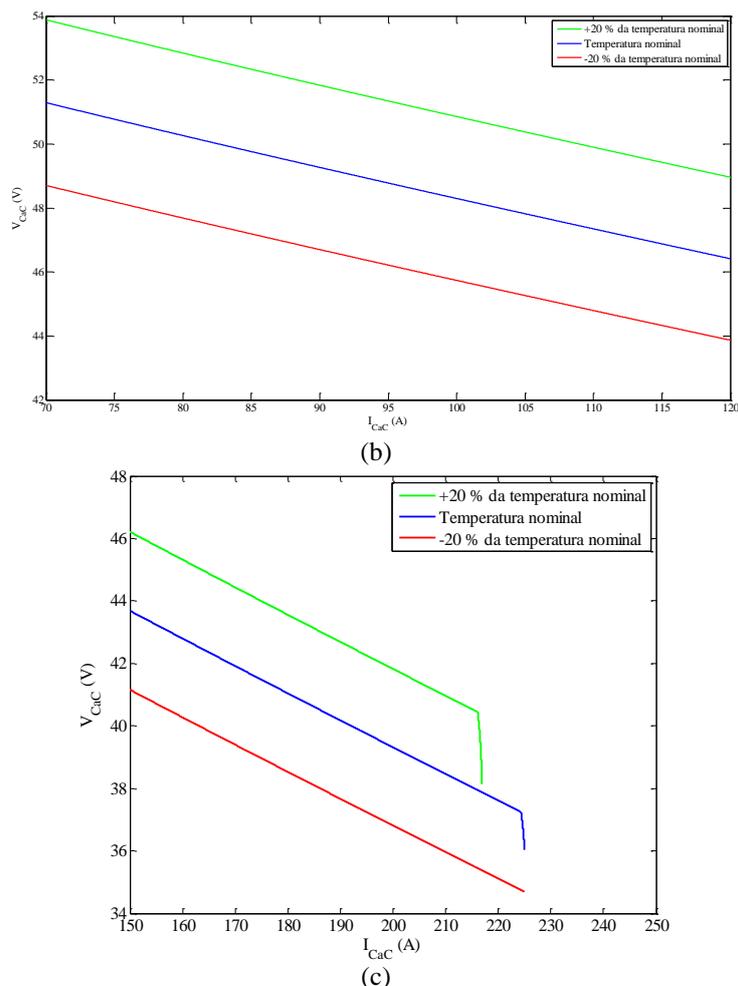


Figura 2.9 – (a) Efeito da variação da temperatura, (b) detalhe da região linear de operação da CaC para variação de temperatura, (c) detalhe da região onde predominam as perdas de concentração

Para [15] é difícil definir a temperatura correta de operação. Esta pode variar da entrada para a saída, do anodo para o catodo e assim por diante. Uma boa aproximação para a temperatura da CaC pode ser ou através da medida da temperatura superficial ou da temperatura do ar que sai da CaC ou da temperatura do refrigerante que sai da CaC. Porém, devido às diferenças de temperatura necessárias para a transferência de calor, não há um consenso sobre qual a efetiva temperatura de operação.

#### 2.4.5 Correções nos cálculos para $P_{H_2}$ e $P_{O_2}$

Se os reagentes forem  $H_2$  e ar [48] deve-se considerar a relação expressa na Equação (2.16), que leva em conta a presença de  $N_2$  no canal.

$$P_{N_2}^{canal} = \frac{0.79}{0.21} \cdot P_{O_2} \quad (2.16)$$

Esta relação é importante, pois o uso de  $O_2$  puro pode aumentar em até 30% a potência de saída ( $P_{CaC}$ ) [18]. Entretanto, para propósitos de popularização e redução de custos da central geradora baseada em CaC é mais interessante assumir a operação apenas com ar atmosférico.

Com a Equação (2.16), os cálculos das pressões nos lados do ânodo e no cátodo podem ser feitos com o auxílio das Equações (2.17) e (2.18).

$$P_{O_2} = P_c - (RH_c \cdot P_{H_2O}^{sat}) - P_{N_2}^{canal} \cdot e^{\left(\frac{0.291 \cdot j}{T^{0.832}}\right)} \quad (2.17)$$

$$P_{H_2} = \frac{1}{2} (RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat}) \cdot \left[ \frac{1}{e^{\left(\frac{1.635 \cdot j}{T^{1.334}}\right)} \cdot \left(\frac{RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat}}{P_a}\right)} - 1 \right] \quad (2.18)$$

onde  $P_a$  e  $P_c$  são as pressões de entrada no ânodo e no cátodo ( $atm$ ),  $RH_a$  e  $RH_c$  são a umidade relativa do vapor no ânodo e no cátodo,  $P_{H_2}$  e  $P_{O_2}$  são as pressões parciais efetivas ( $atm$ ) do  $H_2$  e do  $O_2$ , respectivamente;  $P_{N_2}^{canal}$  é a pressão parcial do  $N_2$  no canal do cátodo ( $atm$ );  $T$  é a temperatura da célula ( $K$ );  $A$  é a área efetiva do eletrodo ( $cm^2$ ) e  $j$  é a densidade de corrente da célula ( $A/cm^2$ ).

Pelo fato de diferirem os níveis de concentração de água, tanto para o lado do ânodo quanto para o do cátodo, presume-se que seria necessário corrigir os valores de  $x_{H_2O}$  para as Equações (2.12) e (2.14). Assim, como  $x_{H_2O_{a,c}}$  depende de  $RH_{a,c}$ ,  $P_a$  e  $P_c$ , pode-se usar as relações expressas nas Equações (2.19) e (2.20).

$$x_{H_2O_a} = \frac{RH_a \cdot P_{H_2O}^{sat}}{P_a} \quad (2.19)$$

$$x_{H_2O_c} = \frac{RH_c \cdot P_{H_2O}^{sat}}{P_c} \quad (2.20)$$

As equações (2.12) e (2.14) podem ser reconsideradas como (2.21) e (2.22).

$$P_{H_2}^* = \frac{1}{2} \cdot P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[ \frac{1}{x_{H_2O_a} \cdot e^{\left(\frac{1.653 \cdot j}{T^{1.334}}\right)}} - 1 \right] \quad (2.21)$$

$$P_{O_2}^* = P_{H_2O}^{sat} \cdot \left[ \frac{1}{x_{H_2O_c} \cdot e^{\left(\frac{4.192 \cdot j}{T^{1.334}}\right)}} - 1 \right] \quad (2.22)$$

#### 2.4.6 Resposta a transitórios

Os dados apresentados em [49] mostram a resposta transitória da densidade de corrente quando  $V_{CaC}$  é mudada rapidamente pelas variações de carga. Comportamentos de “overshoot” e “undershoot” na densidade de corrente nos transitórios são observados para várias mudanças na  $V_{CaC}$ , sob condições constantes de fluxo dos reagentes. Os resultados indicam uma correlação direta do comportamento “overshoot/undershoot” com a relação estequiométrica. É comprovado que para relações estequiométricas excessivas, a resposta transitória reflete um comportamento de primeira ordem, sem a sinais de “overshoot” e/ou “undershoot”. Em condições de sub-alimentação ocorre um comportamento de segunda ordem. Os “undershoots” são observados quando a relação estequiométrica de  $H_2$  é mudada para condições de subalimentação para alimentação normal. Isso é explicado pela distribuição não uniforme de  $H_2$ . O “overshoot” é explicado pelo excessivo consumo de  $H_2$ : uma densidade de corrente não uniforme e consumo suficiente de  $H_2$  para drenar o ar ambiente para o campo de dispersão na saída da CaC. Finalmente, o “overshoot” seguido de um “undershoot” é interpretado como a substituição do  $H_2$  pelo ar ambiente conforme a distribuição da densidade de corrente torna-se mais uniforme. É comprovado que comportamentos transitórios são principalmente dependentes do uso de  $H_2$ . Por se tratar de um estudo experimental, este trabalho não propõe alternativas para um gerenciamento eficaz do consumo de  $H_2$ . Uma vez que, num equipamento de geração real, a pilha está sujeita à variações

frequentes de carga, um mau gerenciamento do fornecimento de  $H_2$  pode levá-la à sucessivos surtos, degradando rapidamente a membrana polimérica.

O trabalho produzido por [50] desenvolve um modelo 3-D para estudar a operação dinâmica durante estados transitórios de uma CaC. São avaliados importantes elementos como a descarga da dupla camada eletroquímica, transporte de gás através da camada de difusão de gás (*GDL – Gas Diffusion Layer*) e a hidratação da membrana. É constatado que a hidratação da membrana ocorre num período de 10 s, o transporte de gás entre 0,01 e 0,1s, sendo o tempo de descarga da GDL rápido e desprezível. Os resultados mostram que o tempo necessário para a CaC atingir o regime permanente é da ordem de 10s devido, principalmente, ao efeito da acumulação de água na membrana. Adicionalmente, são observados “overshoots” ou “undershoots” nas densidades de corrente durante a aplicação de variações de carga, em algumas condições de operação. É avaliado nesta publicação que a hidratação da membrana afeta drasticamente a resposta dinâmica da célula pelo acúmulo de água que pode causar atrasos no transporte dos gases e das cargas eletrônicas envolvidas na reação. Nesse caso, a hidratação da membrana apresenta-se como uma variável com significativo grau de influência sobre o desempenho. Entretanto, estudos adicionais sobre a melhor forma de controlar este fenômeno não são conduzidos. Em equipamentos reais, uma das mais efetivas formas de se regular a hidratação da membrana polimérica se dá pelo ajuste da temperatura e do fluxo do ar de entrada. É comum promover-se também a umidificação do  $H_2$  nos dutos de alimentação. Porém, esta prática acaba por embutir um equipamento com custo adicional (umidificador para o  $H_2$ ) a um dispositivo já demasiadamente oneroso em termos financeiros.

Em [18,51-54] são utilizadas aproximações por meio de um circuito RC, conforme mostrado na Figura 2.10. Nestes trabalhos, o comportamento dinâmico da pilha é reproduzido com um bom grau de aproximação. Porém, não é possível fazer afirmações definitivas para este análogo capacitivo, uma vez que a membrana polimérica possui características operacionais distintas de um dielétrico normal – diferentes reagentes presentes nos eletrodos, composição molecular complexa, presença de catalisador de platina no eletrólito, susceptibilidade elevada a variações ambientais, tais como umidade, pressão e temperatura e assim por diante.

A literatura frequentemente aproxima o efeito de carga e descarga da dupla camada de carga (*CDL – Charge Double Layer*) à operação de um capacitor elétrico.

Este efeito capacitivo está vinculada a uma série de fenômenos, mas o principal deles refere-se à dupla camada de carga. Outros fenômenos, tais como a quantidade de espécies adsorvidas, também podem estar relacionados. Em [55] e pela literatura em geral considera-se a capacitância constante, porém esta pode ter algum grau de variação, dadas as grandezas envolvidas. A resistência em paralelo com esta capacitância representa a Equação de Butler-Vollmer [18], que depende exponencialmente, e não-linearmente, das sobre-tensões de ativação e concentração e também depende fortemente de outros fatores, tais como temperatura, concentração dos reagentes, presença de agentes contaminantes, dentre outros. Esta resistência também considera a barreira do transporte de massa pela inclusão da difusão dos reagentes, a qual determina o valor da densidade da corrente de troca.

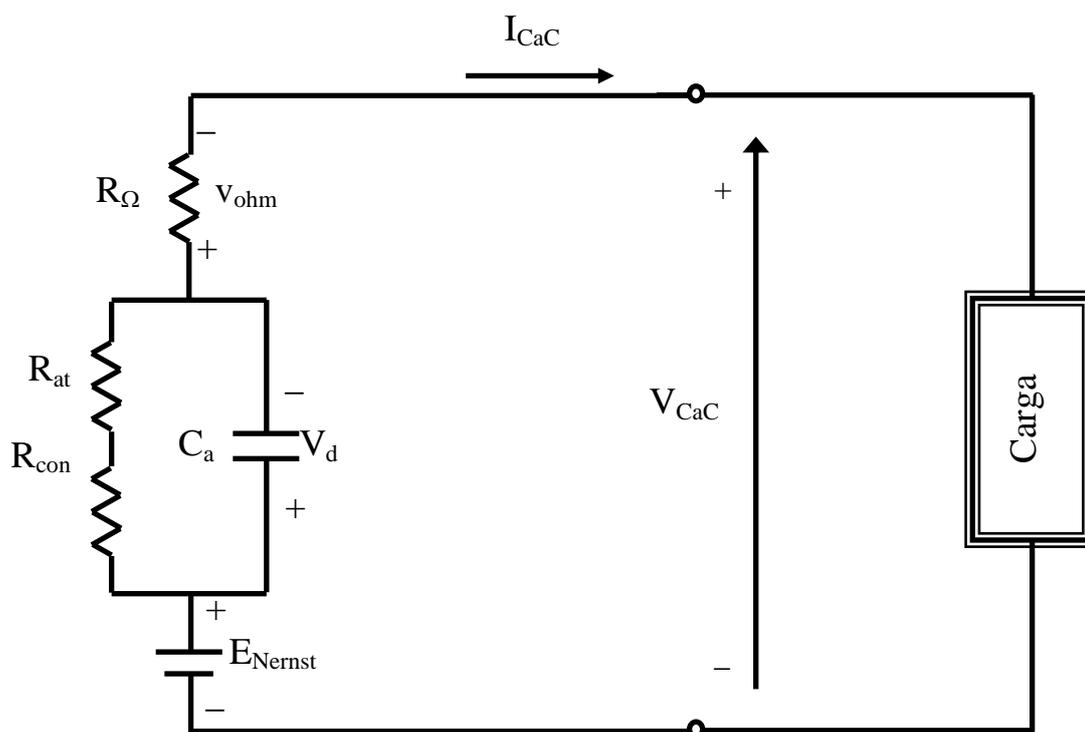
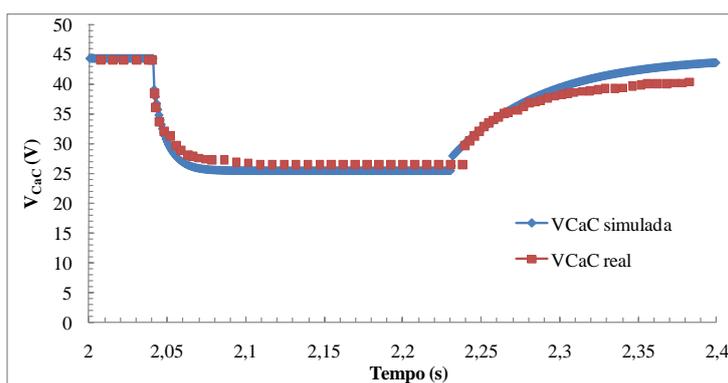


Figura 2.10 – Circuito elétrico equivalente do modelo eletroquímico.

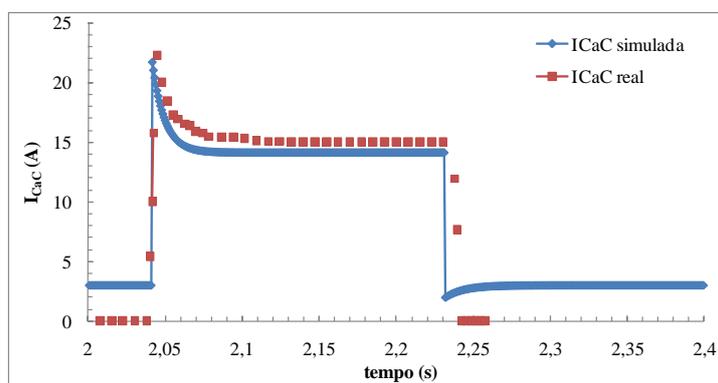
O equivalente capacitivo da dupla camada de carga ainda pode ser obtido com o método de interrupção de corrente descrito em [2,15]. Neste método é necessário realizar ensaios de variação de carga da CaC, utilizando-se equipamentos com rápida

capacidade de amostragem, para se definir de forma correta os tempos transitórios do fenômeno observado. A partir disso, são feitas leituras por meio de um processo visual que permite atingir-se um valor aproximado de capacitância para aquela condição específica de operação do gerador.

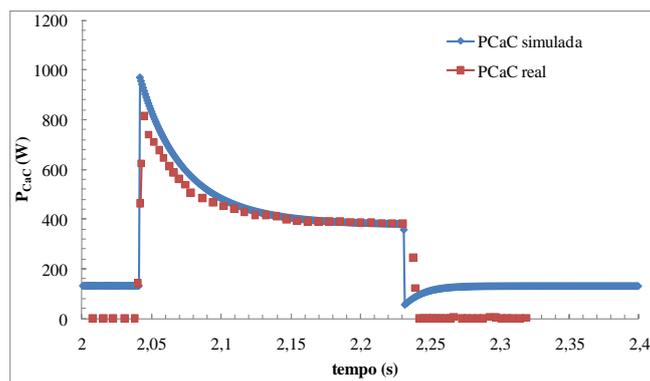
A Figura 2.11 mostra resultados de simulações dinâmicas a partir do modelo apresentado por [51,54], obtidas para um gerador SR-12 500W e comparadas com dados reais. Pode-se observar que durante a inserção de carga, ocorre um surto de corrente na pilha. Este efeito pode ter sérias implicações: se incorretamente controlada, a CaC pode apresentar grandes picos de potência na saída (quase 200% da potência nominal). Isto pode danificar o equipamento conectado ao gerador. Este efeito é especialmente importante em aplicações de eletrônica de potência, e deve ser levado em conta durante o projeto da interface de potência.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.11 – Simulação dinâmica para uma pilha SR-12: variação de (a)  $V_{CaC}$ , (b)  $I_{CaC}$  e (c)  $P_{CaC}$ .

Fonte: [51,54]

Em [56] um estudo (estacionário e dinâmico) apresenta as vantagens do usar uma válvula reguladora do fluxo de saída do cátodo em combinação com a tensão do motor do compressor como variáveis manipuladas através dos periféricos da CaC. Para uma dada  $I_{CaC}$ , a entrada no cátodo e o fluxo de saída determinam pressão no cátodo e estequiometria e, conseqüentemente, determinam a  $P_{O_2}^*$ ,  $V_{CaC}$  e o consumo de potência do compressor. Com o objetivo de manter uma alta eficiência, durante a operação, a válvula de regulação na saída do cátodo tem que ser ajustada para as condições de operação, especialmente marcadas pela  $I_{CaC}$  drenada da pilha. Além disso, a manipulação da válvula produz uma melhor resposta transitória. A influência dessa variável de entrada é explorada pela implementação de uma estratégia preditiva de controle. Assim, regulando-se  $V_{CaC}$  e o excesso de  $O_2$  no catodo, pode-se obter uma melhoria no desempenho. Observa-se que, dependendo da pressão de operação, o incremento da eficiência ocorre ao longo de diferentes faixas de densidades de correntes. Porém, este trabalho não avalia outras condições influentes no rendimento total, tais como temperatura e umidade da membrana.

#### 2.4.7 Tensão ôhmica

A  $V_{ohm}$  resulta das diferentes perdas resistivas as quais podem ser encontradas em praticamente todos os elementos da CaC: resistência iônica da membrana,

resistência iônica e eletrônica dos eletrodos, entre outros. A tensão resultante pode ser expressa pela Lei de Ohm, como apresentado na Equação (2.23).

$$V_{ohm} = -i \cdot R_{interna} \quad (2.23)$$

onde a resistência interna total ( $R_{interna}$ ) é uma função da temperatura e de  $I_{CaC}$ .

Uma expressão geral para  $R_{interna}$ , incluindo todos os parâmetros [31] é dada pela Equação (2.24).

$$R_{interna} = \rho_M \cdot \frac{l}{A} \quad (2.24)$$

A resistividade da membrana ( $\rho_M$ ), composta de Nafion<sup>TM</sup>, é expressa pela relação da Equação (2.25), geralmente aceita pela literatura, como pode ser verificado em [28-31,41,43,48]. Para [18], a condutividade de prótons é inversamente proporcional ao conteúdo de água.

$$\rho_M = \frac{181.6 \cdot [1 + 0.03 \cdot j + 0.062 \cdot (\frac{T}{303})^2 \cdot (j)^{2.5}]}{[\psi - 0.634 - 3 \cdot j] \cdot e^{(4.18 \cdot \frac{T-303}{T})}} \quad (2.25)$$

onde  $T$  é a temperatura absoluta da célula em Kelvin.

Para [41], na Equação (2.25), o termo  $181.6/(\psi - 0.634)$  representa a resistividade específica ( $\Omega \cdot cm$ ) com corrente zero à 30 °C e o termo exponencial no denominador é um fator de correção da temperatura se a célula não está à 30 °C. O termo entre colchetes no numerador é derivado de dados para correção da resistência. Este termo, em conjunto com o fator  $3 \cdot j$  (no termo  $[\psi - 0.634 - 3 \cdot j]$ ) representa uma correção empírica da resistividade específica, associando-se com dois outros fatores que afetam o conteúdo médio de água da membrana: a densidade de corrente e a temperatura da célula. O parâmetro  $\psi$  pode ter um valor próximo a 14 (condições ideais) com 100% de umidade relativa, atingindo até 22 ~ 23 em condições de

supersaturação. O valor de  $\psi$  é influenciado pelo procedimento de preparação da membrana, é função da umidade relativa e da relação estequiométrica do gás que chega ao ânodo, e também poderá ser uma função da idade (tempo de serviço) da membrana.

Em [43] é proposta a incorporação da degradação da tensão produzida, de acordo com o tempo de serviço da membrana. Propõe-se o cálculo do termo  $\psi$  em função do tempo de uso da CaC. Dessa forma,  $\psi$  na Equação (2.25) é substituído por  $\psi_{age}$ , determinado por uma relação linear, conforme a Equação (2.26).

$$\psi_{age} = \psi^0 + \psi_{DR} \cdot age \quad (2.26)$$

onde  $age$  é o tempo de operação ( $h$ );  $\psi_{DR}$  representa a taxa de degradação da condutividade da membrana e seu valor é determinado a partir de dados experimentais (aproximadamente  $-0.0007h^{-1}$  para [43]).

Para [43], o termo de degradação pode ser introduzido na Equação 2.27 de cálculo de  $\xi_2$ , onde  $k_{DR}$  é a taxa de degradação da CaC devido às mudanças na atividade do catalisador. Assim, a nova expressão proposta para  $\xi_2$  é dada por:

$$\xi_2 = k_{DR} \cdot \frac{age}{T} + k_{cell}^0 + 0.000197 \cdot \ln A + 4.3 \cdot 10^{-5} \cdot \ln C_{H_2}^* \quad (2.27)$$

#### 2.4.8 Tensão de difusão

A tensão de difusão ( $V_{dif}$ ) é gerada pelas limitações na transferência de massa e pela disponibilidade dos reagentes nas regiões próximas dos eletrodos. As reações nos eletrodos requerem fornecimentos constantes de reagentes [31] para que seja possível sustentar os níveis de corrente. Quando as limitações na difusão reduzem a disponibilidade de um reagente numa determinada região do eletrodo, parte da energia de reação disponível é usada para conduzir a transferência de massa criando, portanto, uma queda na tensão de saída. Problemas similares podem surgir se os produtos da

reação se acumulam próximos ou sobre as superfícies dos eletrodos, obstruindo os caminhos de difusão ou diluindo os reagentes.

Como proposto por [15,31,28-31,57,58] ( $V_{dif}$ ) pode ser representada pela Equação (2.28).

$$V_{dif} = m \cdot e^{(n \cdot j)} \quad (2.28)$$

A amplitude de  $V_{dif}$  é diretamente relacionada com a queda na concentração dos gases reagentes. Portanto, é inversamente proporcional ao crescimento da taxa de produção ( $n$ ) dos subprodutos da reação eletroquímica que ocorre nas camadas do catalisador, canais de fluxo e através do eletrodo. Uma interpretação física para os parâmetros  $m$  e  $n$  ainda não foi bem definida [31,32]. Estudos mostraram que  $m$  está correlacionado com a condutividade do eletrólito e  $n$  com a porosidade da camada de difusão de gás. Ambos,  $m$  e  $n$ , relacionam-se com as características de manutenção da água na membrana. Uma membrana parcialmente desidratada apresenta um decréscimo na condutividade, representado por  $m$ . O excesso de água no estado líquido leva a redução na porosidade e, conseqüentemente, a uma prematura limitação no transporte de massa, efeito representado por  $n$ .

O coeficiente de transferência de massa  $m$  decresce linearmente com a temperatura, mas tem duas mudanças significativas (Equações (2.29) e (2.30)).

$$m = 1.1 \cdot 10^{-4} - 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273.15) \text{ para } T \geq 312.15K (39^\circ C) \quad (2.29)$$

$$m = 3.3 \cdot 10^{-3} - 8.2 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273.15) \text{ para } T < 312.15K (39^\circ C) \quad (2.30)$$

#### 2.4.9 Análise do balanço de energia

Em [59] é investigado experimentalmente o balanço energético de uma CaC Ballard MKV-E. São avaliados os fenômenos transitórios que ocorrem durante o “aquecimento” (inicialização ou “*start-up*”), chaveamento de carga e quando o gerador está conectado a um inversor CC/CA. Observa-se que os efeitos estudados podem se

apresentar (com maior ou menor intensidade) em cada tipo de gerador. Neste caso, os melhores desempenhos foram obtidos para temperaturas acima de 70°C (para o gerador estudado). Verifica-se que baixas temperaturas de operação causam aumentos nas perdas, principalmente referentes aquelas devido ao transporte de massa, resultando em baixa eficiência. Medições do balanço energético mostram que acima de 100 A, 45% da entrada de  $H_2$  é convertida em eletricidade e 55% em calor. Porém, a maior porção deste calor (35%) pode ser recuperável pelo circuito de refrigeração (o restante é perdido (20%)). Apesar da CaC ser capaz de gerar 4 kW, picos de 5 kW (de curta duração) foram atingidos durante os testes. Rápidas comutações de carga causariam quedas de até 6% na tensão. Resultados de uma investigação experimental sobre o desempenho para diferentes concentrações de  $O_2$  (21% – ar, até 100% –  $O_2$  puro) foram conduzidos. A conclusão é de que o enriquecimento de  $O_2$  aumenta consideravelmente  $P_{CaC}$ . Neste trabalho não se busca atingirem melhores níveis de eficiência. Outra possibilidade de o uso do calor gerado poderia ser para climatizar ambientes.

As referências [60,61] são duas patentes americanas de propriedade da empresa AvistaLabs<sup>TM</sup> que sugerem o uso de chaves eletrônicas para causar curtos-circuitos controlados entre o cátodo e o ânodo da célula. Em condições anormais de operação de CaCs individuais, estas chaves são usadas para evitar danos à pilha. Ainda sugere-se que este procedimento pode melhorar a eficiência e auxiliar na fase de pré-aquecimento em três condições. Na primeira, a chave conduz a corrente da pilha se a célula em que a chave estiver em paralelo apresentar uma falha severa (como uma tensão menor de 0,4V). Neste caso, a chave assume a corrente total da pilha e o fluxo de combustível para esta célula é interrompido. Na segunda condição o dispositivo é chaveado em certa frequência caso o desempenho da CaC apresente-se fora de padrões pré-estabelecidos. Neste caso, o fornecimento de  $H_2$  é mantido. Este chaveamento também acontece ciclicamente para melhorar o rendimento final quando, então, o calor produzido evapora possíveis gotículas de água presentes nos poros que dificultariam a passagem dos gases. O chaveamento pode produzir, ainda, água que umedece a membrana e diminui a resistência à passagem dos íons. Pode haver neste caso um ganho adicional de tensão em torno de 5%. A abertura e o fechamento da chave devem corresponder a um ciclo de operação entre 0,01~4,0 min por célula e com razão cíclica menor que 20% do ciclo de operação. A terceira condição de operação da chave eletrônica descrita é durante o pré-aquecimento, onde é usada uma resistência como fonte suplementar de calor para a

membrana atingir a temperatura de 15°C. Após 15°C chaveia-se ciclicamente o cátodo e o ânodo até atingir-se 30°C. Apesar de este método sugerir que há um aumento na eficiência, até o presente momento não são encontradas referências bibliográficas adicionais reportando estudos relacionados aos seus efeitos sobre a vida útil da pilha.

Em [62] discute-se sobre técnicas para obter-se melhores níveis de eficiência em veículos movidos por CaCs. Como forma de melhorar a eficiência da CaC, é analisado nesta referência o uso de curtos-circuitos controlados para gerenciar o conteúdo de água. Para hidratar as membranas da CaC, a pilha é eletronicamente curto-circuitada durante 20,0ms a cada 20,0s. O curto-circuito é realizado também se a tensão da pilha é inferior a um determinado valor e é implementado através de chaves eletrônicas (MOSFETs). Supõe-se que este procedimento resulte na liberação do excesso de água acumulada nas membranas, mantendo os níveis de mistura dos reagentes adequada e a desobstrução dos poros da membrana.

Um dos principais efeitos observados com o uso do método dos curtos-circuitos periódicos é o aparecimento de um efeito “regenerador” sobre a tensão de saída, de acordo com os resultados apresentados na referência [62]. Porém, uma das desvantagens observadas refere-se à frequente interrupção parcial no nível de energia fornecida à carga. Isto é, periodicamente, a célula (ou conjunto de células) é removida da pilha em decorrência dos repetidos curtos-circuitos. Outra característica desvantajosa é relacionada aos pulsos de corrente e tensão nos terminais da pilha, decorrentes dos contínuos e, praticamente aleatórios, curtos-circuitos. Outro aspecto não estudado e avaliado nesta referência refere-se às consequências desta técnica sobre o equipamento ao qual está ligada a CaC (interface de potência e carga).

Uma das possibilidades para contornar os problemas relacionados aos curtos-circuitos pode ser através de uma reavaliação do elemento armazenador de energia ligado à saída do gerador. Além disso, a técnica usada pela referência [62] aplica curtos-circuitos sobre a pilha inteira. Como forma de evitar a remoção total do gerador, parece mais adequado o tratamento agrupado e não o concomitante das CaCs que compõem a pilha. Isto minimizaria o impacto da elevada variação de tensão nos terminais da carga. Também não são citadas ocorrências ou não de efeitos colaterais destes curtos-circuitos sobre a vida útil da pilha.

## 2.5 Eficiência das CaCs

A eficiência termodinâmica ( $\eta_{CaC}$ ) pode ser determinada como a razão entre o trabalho de saída ( $W_{bruto}$ ) e o produto do consumo e o poder calorífico inferior do  $H_2$  (*Lower Heating Value of  $H_2$  – LHV $_{H_2}$* ). Esta relação é dada pela Equação (2.31).

$$\eta_{CaC} = \frac{W_{bruto}}{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (2.31)$$

Uma vez que a tensão da pilha é determinada para uma dada corrente de saída, a potência total de saída é expressa pela Equação (2.32).

$$W_{bruto} = I_{CaC} \cdot V_{CaC} \quad (2.32)$$

A  $I_{CaC}$  é dada pela taxa de fluxo de hidrogênio ( $\dot{m}_{H_2}$ ) (Equação (2.33)).

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{I_{CaC} \cdot MW_{H_2}}{2 \cdot F} \quad (2.33)$$

Assim, a eficiência termodinâmica pode ser definida pela Equação (2.34).

$$\eta_{CaC} = \frac{2 \cdot V_{CaC} \cdot F}{MW_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (2.34)$$

Mas  $\eta_{CaC}$  pode ser obtida de maneira mais direta, pois uma CaC utiliza materiais que, normalmente, participam dos processos de reação para liberar sua energia. Desta forma, na determinação da  $\eta_{CaC}$ , é prático comparar a energia elétrica gerada com o calor produzido pela combustão da mesma quantidade do combustível utilizado. Esta quantidade de calor é definida pela mudança na entalpia de formação molar ( $\Delta \bar{h}_f$ ). Por

convenção, o valor de  $\Delta\bar{h}_f$  é negativo quando a energia é liberada. Assim,  $\eta_{CaC}$  é usualmente definida pela Equação (2.35).

$$\eta_{CaC} = \frac{W_{el}}{-\Delta\bar{h}_f} \quad (2.35)$$

onde  $W_{el}$  é o trabalho elétrico (energia) produzido por mol de combustível utilizado.

Há dois valores possíveis para a mudança na entalpia de formação molar ( $\Delta\bar{h}_f$ ), da Equação (2.35), para a combustão do  $H_2$ :

- para água produzida no estado de vapor:  $\Delta\bar{h}_f = -241,83$  (kJ/mol);
- para água produzida no estado líquido:  $\Delta\bar{h}_f = -284,84$  (kJ/mol);

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

Por definição, a máxima energia elétrica disponível é igual à mudança na energia livre de Gibbs [25]. Assim, a eficiência máxima possível pode ser definida na Equação (2.36). Este valor máximo é conhecido como eficiência termodinâmica.

O Quadro 2.2 apresenta valores para  $\eta_{FC_{max}}$ , relativo ao HHV, juntamente com a tensão reversível,  $E_r$ . A Equação (2.37) fornece o valor de  $E_r$ . Esta é a tensão de circuito aberto, considerando a ausência de perdas à pressão padrão de 100 kPa. Na prática existem perdas que, mesmo em circuito aberto, a tensão resultante será menor que o valor dado pela Equação (2.37), conforme detalhado na descrição da curva  $V \times I$ .

$$\eta_{CaC_{max}} = \frac{\Delta\bar{g}_f}{\Delta\bar{h}_f} \quad (2.36)$$

$$E_r = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2 \cdot F} \quad (2.37)$$

A Figura 2.12 mostra como  $\eta_{CaC_{max}}$  varia com a temperatura [31]. Embora o gráfico mostre que  $\eta_{CaC_{max}}$  é maior em temperaturas menores, as quedas de tensão são menores em temperaturas pouco mais elevadas.

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

Quadro 2.2 – Valores de  $\bar{\Delta g}_f$ ,  $E_r$  e  $\eta_{CaC_{max}}$  (referidos ao HHV) [18]

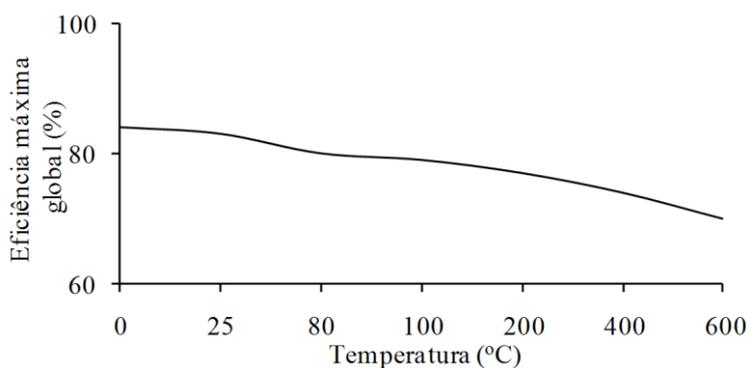


Figura 2.12 –  $\eta_{CaC_{max}}$  à pressão padrão (100kPa) referida ao HHV

No Quadro 2.2, percebe-se que há uma relação entre  $\eta_{CaC_{max}}$  e  $E_r$ . Da mesma forma, a  $\eta_{CaC}$  pode ser relacionada com  $V_{CaC}$ . Se toda a energia do  $H_2$  fosse transformada em energia elétrica,  $E_r$  seria dada pela Equação (2.38).

$$E_r = \frac{-\bar{\Delta h}_f}{2 \cdot F} \quad (2.38)$$

Utilizando os valores apresentados para a mudança na entalpia de formação molar do  $H_2$ , obtém-se, para  $E_r$  máxima a Equação (2.39).

$$E_r = \begin{cases} 1,48 \text{ V; usando o HHV} \\ 1,25 \text{ V; usando o LHV} \end{cases} \quad (2.39)$$

Assim,  $\eta_{CaC}$  pode ser definida pela razão entre  $V_{CaC}$  e  $E_r$  para um gerador ideal, calculada a partir da Equação (2.40)

$$\eta_{CaC} = \frac{V_{CaC}}{E_r} \quad (2.40)$$

Para uma definição mais abrangente de  $\eta_{CaC}$ , deve-se ainda analisar a utilização do  $H_2$  na operação da CaC. Na prática, nem todo o  $H_2$  que entra é utilizado; alguma parte atravessa a membrana sem reagir. Um coeficiente de utilização do  $H_2$ ,  $\mu_f$  pode ser definido como a relação entre a massa de  $H_2$  que participa das reações e a massa de  $H_2$  que entra na CaC. A Equação (2.41) define este coeficiente.

$$\mu_f = \frac{(m_{H_2})_{reag}}{(m_{H_2})_{ent}} \quad (2.41)$$

Assim, utilizando o valor de  $E_r$  referente ao HHV, a  $\eta_{CaC}$  do tipo PEM, pode ser definida na Equação (2.42).

$$\eta_{CaC} = \mu_f \cdot \frac{V_{CaC}}{1,48} \quad (2.42)$$

Para CaCs que operam sem recirculação de  $H_2$  (*dead-end mode*), o valor de  $\mu_f$  normalmente situa-se na faixa dos 95%. Assim, utilizando-se a relação definida pela Equação (2.42),  $\eta_{CaC}$  pode ser obtida através da medição direta de  $V_{CaC}$ .

No Anexo A é discutida a eficiência global da central geradora baseada em CaC.

## 2.6 Resumo do Capítulo

Apresenta-se neste Capítulo uma revisão bibliográfica da teoria sobre CaCs, incluindo aplicações, princípios de operação e bases para compreensão da modelagem

proposta nesta tese. São introduzidas as principais equações que governam o funcionamento de pilhas CaC tipo PEM.

O enfoque deste Capítulo é direcionado aos principais fatores que influenciam na eficiência total da pilha do tipo PEM. Demonstra-se, através de simulações para uma CaC de  $6kW$ , a influência destes fatores sobre a eficiência global da pilha verificada na curva característica  $VxI$  da CaC. Conforme o equacionamento demonstrado, uma medição da eficiência reflete-se diretamente nesta curva, constado pela medição da tensão nos terminais da pilha.

Ainda há muitas dificuldades para obtenção de modelos genéricos de CaCs. Isso se deve as características intrínsecas dos geradores relacionadas a fatores como a geometria interna e outras propriedades físico-químicas que se encontram de posse de fabricantes e grandes centros de pesquisas na área. Por outro lado, inadvertidamente, nem todos os fenômenos eletroquímicos envolvidos no funcionamento do gerador são conhecidos, tornando nebuloso o completo conhecimento de sua operação.

Observa-se, na literatura, que os modelos sugeridos para CaCs tem dificuldades para representar os efeitos do conteúdo de água na membrana. A umidade presente na membrana é fator crítico sobre a eficiência, mas ainda não é bem traduzido algebricamente nos modelos simplificados. Em geral, as referências preferem assumir o nível de umidificação como sendo 100% (ideal).

Pelas análises feitas, verifica-se que a operação do gerador em sua região linear, quando em regime permanente, é mais vantajosa do ponto de vista da eficiência. Nesta região, é possível transitar-se entre os vários níveis de eficiência desejados, modificando-se parâmetros como a temperatura de operação, fluxo de ar, nível de umidade e pressão do combustível. A operação do gerador na região onde as perdas por concentração são mais intensas não garante um ganho desejável do ponto de vista de aproveitamento de combustível. Também, através dos gráficos apresentados, pode-se ver que, no extremo inferior da curva, apesar do nível de potência do gerador ser maior, a controlabilidade e a estabilidade pode não ser mais totalmente garantida, devido às influências mais intensas dos sobre-potenciais nestes pontos. Portanto, para propósitos de controle do nível de eficiência, a região linear de operação é a mais adequada.

# MODELAGEM E CONTROLE DE CaCs USANDO ALGORITMOS NEURO-FUZZY

---

## 3.1 Introdução

A revisão do Capítulo 2 sobre os elementos externos mais relevantes do funcionamento de CaCs PEM mostra que estes possuem alto grau de sofisticação matemática em sua modelagem. Isso requer uma forte demanda computacional para representar um modelo tradicional. Neste capítulo é introduzido o uso de redes neuro-fuzzy Adaptativas (*Adaptive neuro-fuzzy Inference System – ANFIS*) para simplificar a modelagem da CaC. Também são apresentados critérios para a seleção e aplicação das redes ANFIS como recurso e os detalhes destes algoritmos.

No presente capítulo propõe-se um método de controle adequado à climatização da membrana polimérica. Visa-se gerenciar a eficiência da CaC em regime permanente considerando a capacidade do controlador em manter os níveis de eficiência dentro de faixas de variação compatíveis com as limitações da fonte. Este deve atuar simultaneamente sobre grandezas distintas, tais como pressão e/ou fluxo dos reagentes ( $P_{H_2}$  e  $P_{O_2}$ ), temperatura de operação e umidade da membrana. É importante não apenas obter a maior potência possível da CaC mas também mantê-la tanto quanto possível dentro de sua região linear de operação, em condições que não causem degradação avançada da membrana polimérica em uma região na qual o nível de eficiência é satisfatório. Parte-se, como hipótese inicial, de que é possível ajustar seus parâmetros de forma a melhorar a eficiência dentro de regiões pré-definidas. Dentro da região linear

considera-se que a relação eficiência x potência de saída x consumo é operação satisfatória. Portanto, o restante deste trabalho visa otimizar o funcionamento da CaC dentro desta região da curva característica  $VxI$ .

Os fenômenos eletroquímicos presentes em CaCs sofrem a influência de muitas variáveis de complexa modelagem. Entre elas, estão as variações da temperatura e pressão ambiente, a demanda da carga, a qualidade dos produtos usados na fabricação das membranas e da pilha, grau de pureza dos reagentes e a ação dos catalisadores. Uma vez que os compensadores clássicos apresentados na literatura requerem um conhecimento matemático bastante acurado da planta a ser controlada, propõe-se o uso de um algoritmo de controle inteligente, baseado em uma estrutura de regras fuzzy. Este controlador deve manter a operação da pilha dentro das condições limites de eficiência, de forma possibilitar a obtenção de níveis razoáveis de rendimento versus consumo do gerador. O controlador deve identificar as condições de carga atuais e adequar os parâmetros de entrada para cada nova condição. Assim, toma-se como referência o nível de eficiência almejado para esta correção.

Ao longo deste capítulo apresenta-se teoricamente a metodologia para modelagem e controle, índices de aumento da eficiência e os resultados simulados obtidos de tal forma a se poder transferir tais recursos para centrais geradoras reais baseadas em CaCs. Para apresentar as metodologias de modelagem e controle propostas foi usada uma CaC de 6 kW NedStack PS6 como referência (também estudada no Capítulo 2). Neste Capítulo todos os resultados disponíveis para este gerador são obtidos por meio de simulações. O objetivo deste desenvolvimento é apresentar um método de modelagem/controlado geral, com a possibilidade de exportação destas técnicas para outros modelos de CaCs do tipo PEM.

### **3.2 Modelagem neuro-fuzzy**

Pelas razões expostas acima se considera que a resposta do gerador sob dadas condições de operação é mais relevante para o projetista de centrais geradoras à CaC do que os processos internos envolvidos. Por isto, é interessante analisar a CaC do ponto de vista de um bloco tipo “caixa-preta” (“*black-box*”) de forma relativamente desvinculada das descrições paramétricas matemáticas dos fenômenos internos correlatos.

O trabalho [63] analisa as características de uma célula PEM e usa a habilidade de aproximação e autoaprendizado de uma estrutura ANFIS, construindo um modelo baseado na temperatura para a pilha. Este modelo é usado como referência para o algoritmo de controle, ajustando-se os parâmetros modelados para compensação “on-line”. Verifica-se que o gerenciamento térmico é crítico para a melhora da eficiência e da vida útil do gerador. Aumentar a temperatura de operação reduz as limitações no transporte de massa e eleva as taxas de reações eletroquímicas. Entretanto, isso também afeta adversamente o potencial máximo da célula, face às considerações termodinâmicas, incluindo o aumento da pressão parcial do vapor d’água. O trabalho [63] considera como crítico apenas o controle da temperatura pelo controle do fluxo dos gases de entrada. Consequentemente, outros aspectos relacionados à eficiência (umidade da membrana, variações de carga e refrigeração) não são abrangidos.

A proposta [55] desenvolve um modelo dinâmico simplificado para CaCs baseado no conceito de característica instantânea de saída, relativo ao conjunto dos valores de corrente e tensão que a célula pode atingir subitamente. Nesta referência deriva-se um teorema que indica as condições sob as quais a potência de saída da célula pode (teoricamente) ser perfeitamente controlada. Os resultados obtidos são usados para demonstrar a possibilidade de variar rapidamente a potência para o seu valor máximo – considerando a temperatura instantânea, pressões parciais, envenenamento do catalisador, dentre outros fenômenos – dentro de uma ampla faixa de condições de carga. Porém, esta referência não considera a deterioração da CaC causada por transitórios. Além disso, o teorema proposto por ela é válido apenas no contexto de um determinado conjunto de valores, que definem a curva de polarização da célula.

O trabalho [53] apresenta uma alternativa de modelagem de CaCs tipo PEM utilizando um modelo eletrônico modificado que permite a análise comportamental da CaC substituindo os resultados do equacionamento tradicional por respostas de componentes eletrônicos. Isto simplifica a análise dinâmica do gerador com a transformação deste em um circuito elétrico simplificado composto de semicondutores (transistores e diodos) e outros elementos (resistores e capacitores). Por outro lado, este modelo não oferece a possibilidade de se investigar de forma mais aprofundada a eficiência da CaC e sua correlação com as condições ambientais externas.

A referência [54] apresenta um método de modelagem por meio de equações paramétricas implementadas em ambiente PSIM<sup>TM</sup>. O modelo matemático é construído

com base no equivalente elétrico simplificado da CaC, cujas equações de circuito são obtidas pela aplicação das Leis de Kirchoff. Este modelo é adequado para a avaliação comportamental do gerador quando conectado a uma interface de potência, dada sua especificação para o estudo da resposta transitória da CaC. Este modelo, porém é inadequado para avaliação das curvas de eficiência dadas as limitações construtivas e a difícil portabilidade para outras plataformas de desenvolvimento.

A referência [64] usa uma Rede Neural Artificial (RNA) para modelar uma CaC tipo PEM e deriva um modelo empírico não paramétrico incluindo variações de processos para estimar o desempenho das CaCs sem uso massivo de computação. A RNA é treinada para aproximar experimentalmente dados obtidos de uma única CaC operando com  $H_2$  e ar, com dois tipos distintos de Nafion<sup>TM</sup> (Nafion<sup>TM</sup> 115 e Nafion<sup>TM</sup> 1135). Os modelos levam em conta não somente a densidade de corrente, mas também as variações de pressão dos gases, temperatura, umidade e utilização, cobrindo importantes fatores que determinam o real desempenho da CaC. Para demonstrar a aplicação da RNA, o modelo integra e simula um gerador completo, incluindo seus periféricos. O simulador atua como um componente que usa a CaC como gerador sendo uma ferramenta disponível para projeto e análise em sistemas de potência. Entretanto, neste trabalho não são conduzidos experimentos para se atingirem melhores desempenhos do gerador. Também não são testados os efeitos da interface de potência sobre a CaC e o comportamento do modelo sob condições transitórias de carga.

Como visto nesta tese, as características do potencial da célula em relação à corrente apresentam três quedas representativas que são: as perdas de ativação, as perdas ôhmicas e as perdas de concentração. Sob dadas situações físicas estas perdas dependem das condições de operação, como temperatura da célula, umidade, pressão dos reagentes e concentração bem como da corrente de carga que podem ser estimadas. Matematicamente, duas aproximações principais podem ser usadas para estimar estas variáveis das CaCs: a paramétrica e a não paramétrica. A aproximação paramétrica baseia-se em modelos pré-determinados, derivados a partir do conhecimento científico. A abordagem não paramétrica é baseada em modelos mais generalistas, treinados para estimar o comportamento de uma planta usando conjuntos de dados suficientemente significativos.

Em geral, as abordagens paramétricas têm sido usadas para elaborar equações empíricas para CaCs do tipo PEM e são variações de um esquema de regressão geral

[32,33,41,43,44]. Modelos empíricos considerando a teoria eletroquímica, incluindo a ativação, perdas ôhmicas e transferência de massa são usadas para ajustar dados experimentais sobre a faixa de variação da densidade de corrente com maior precisão. Entretanto, para usar estas equações empíricas apropriadamente, diferentes parâmetros devem ser derivados para ajustar as curvas  $V \times I$  para diferentes condições. Sob dadas condições do processo, não é difícil derivar-se uma equação empírica com parâmetros fixos. Entretanto, não é tão simples determinar modelos paramétricos multidimensionais para as variações dos processos sobre toda a faixa de operação, desde que os parâmetros empíricos são altamente dependentes da temperatura da célula, pressões dos reagentes, da umidade e das taxas do fluxo de gases.

A Tabela 3.1 compara as vantagens e desvantagens das principais alternativas de modelagem estudadas nesta tese. Esta Tabela apresenta os critérios adotados para selecionar a opção de modelagem mais adequada ao trabalho proposto aqui.

Tendo em vista os critérios apresentados na Tabela 3.1, testes adicionais com diversas técnicas de modelagem e a revisão bibliográfica, opta-se nesta tese pela modelagem da CaC utilizando algoritmos neuro-fuzzy. Um modelo baseado em RNAs pode ser relativamente simples, uma vez que pode ser tratado como uma técnica não paramétrica capaz de capturar características não lineares de uma planta. As RNAs têm propriedades muito úteis para identificação de processos. Elas podem portar processos não lineares por meio de informações obtidas a partir de dados adquiridos da planta real e fornecidos para treinamento da rede. Assim, uma RNA pode ser usada como modelo empírico para estimar características eletroquímicas, incluindo as variações nos processos, sem requerer cálculos extensos.

Modelos de CaCs baseados em ferramentas matemáticas convencionais (por exemplo, equações diferenciais), podem não ser totalmente adequados no que se refere às incertezas e indefinições. Em contraste, um sistema de inferência neuro-fuzzy empregando regras do tipo premissa-conseqüência (se-então – “*if-then-else*”) pode modelar aspectos qualitativos do conhecimento e do raciocínio humano sem empregar análises quantitativas precisas. A modelagem fuzzy ou identificação fuzzy é inicialmente explorada de forma sistemática por Takagi e Sugeno [65]. Posteriormente, utiliza-se esta abordagem em aplicações práticas de controle, predição e inferência. Porém, alguns aspectos desta técnica devem ser relevados. Mais especificamente:

1. Não existem métodos padronizados para transformar o conhecimento ou a experiência humana em um conjunto de regras e uma base de dados para um Sistema de Inferência fuzzy (SIF);
2. São necessários métodos mais efetivos para ajuste das funções de pertinência (FPs), minimização do erro de saída medido ou maximização dos índices de desempenho.

Nesta perspectiva [67], propõe uma rede chamada *Adaptive-Network-based fuzzy Inference System* ou, simplesmente, *ANFIS*. Esta pode servir como base para construir um conjunto de regras fuzzy com as apropriadas FPs, gerando pares de entrada e saída estipulados. Um dos principais objetivos da ANFIS é integrar as características dos algoritmos fuzzy e das redes neurais artificiais. Da lógica fuzzy vem a representação do conhecimento prévio em um conjunto de variáveis (topologia de rede) visando otimizar o espaço de procura. Das RNAs vem a adaptação da retro-propagação para uma rede estruturada, automatizando o ajuste paramétrico da estrutura fuzzy. Uma introdução teórica as redes ANFIS é dada no Apêndice A, incluindo construção, equacionamento geral e outras características.

Assim, por opção, e considerando os fatores avaliados na Tabela 3.1, nesta tese, aplica-se uma estrutura ANFIS para modelar as CaCs.

Inicialmente, para avaliar a abordagem de construção do modelo estudado, são consideradas como variáveis de entrada da rede a corrente de carga  $I_{CaC}$ , a pressão dos reagentes ( $P_{H_2}$  e  $P_{O_2}$ ) e a temperatura de operação da CaC. A tensão terminal  $V_{CaC}$  é tratada como a variável de saída da rede. A Figura 3.1 apresenta o modelo utilizado.

As metodologias de modelagem e controle são apresentadas e testadas, para confirmar a hipótese inicial da tese, cujo foco é o aumento da eficiência do gerador.

Tabela 3.1 – Tabela comparativa dos diversos modelos de CaC

| Modelo                                | Vantagens  | Desvantagens   |
|---------------------------------------|--|--|
| Paramétrico/clássico [28-33,43,44,46] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidado na literatura;</li> <li>• Bastante difundido;</li> <li>• Resposta bastante próxima;</li> <li>• Permite resposta estática e dinâmica</li> <li>• Utiliza equacionamento sofisticado e preciso;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta dependência de variáveis empíricas, tais como <math>\xi_i</math>, <math>\psi</math>, <math>\lambda</math>, <math>\eta</math> dentre outras de difícil obtenção;</li> <li>• Requer conhecimento avançado do equacionamento;</li> <li>• Requer domínio sobre as reações eletroquímicas;</li> </ul> |

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
|                             |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende grandemente dos efeitos da dupla camada de carga;</li> </ul>   |
| Eletrônico [51, 53]         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reproduz condições de inicialização</li> <li>• Não requer conhecimento de equações avançadas da eletroquímica;</li> <li>• Simplicidade para implementação em simuladores de circuitos;</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vinculado ao uso em simuladores específicos (Orcad<sup>TM</sup>);</li> <li>• O dimensionamento dos componentes não está bem definido ainda;</li> <li>• Depende altamente dos capacitores que simulam os efeitos de carga/descarga da dupla camada de carga;</li> </ul> |
| PSIM <sup>TM</sup> [52, 54] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulação simplificada pelo uso de equações de circuitos;</li> <li>• Permite a simulação dinâmica;</li> <li>• Simples implementação;</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados obtidos ainda não são precisos para a resposta dinâmica</li> <li>• Mais adequado para aplicações em projetos de interfaces de potência;</li> <li>• Efeitos da dupla camada tem grande influência sobre o resultado final;</li> </ul>                        |
| neuro-fuzzy [63,64,65]      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende, basicamente, apenas das características das funções de entrada e saída;</li> <li>• Pode ser construído por usuário não especializado;</li> <li>• Pode ser portado para várias linguagens de programação;</li> <li>• Trata a CaC como uma “caixa-preta”;</li> <li>• Emula o comportamento da CaC real, sem a necessidade de equações sofisticadas ou a procura de parâmetros para fixação de curvas;</li> <li>• Emula o padrão comportamental da CaC de forma adequada, se os dados de entrada forem significativos o bastante para permitir um treinamento adequado, permitindo refletir a resposta da planta.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende da qualidade dos dados de treinamento;</li> <li>• Estes modelos ainda não são amplamente difundidos;</li> <li>• Depende de dados reais coletados a partir de ensaios para o treinamento da rede.</li> </ul>  |

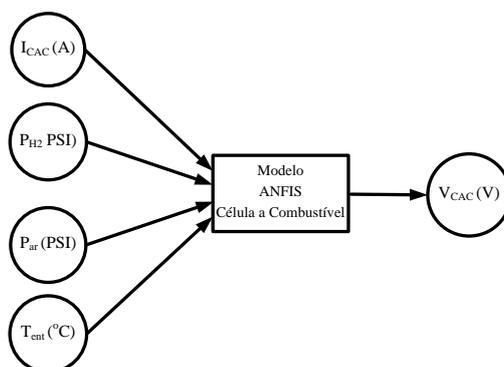


Figura 3.1 – Diagrama geral do modelo de CaC

### 3.2.1 Construção do modelo ANFIS para a CaC

A base experimental de dados para construir o modelo utilizado neste Capítulo provém da CaC dada em [45]. O estudo comportamental desta CaC é apresentado no Capítulo 2, juntamente com a avaliação teórica do gerador, incluindo os efeitos da pressão dos reagentes, variação da temperatura e aumento da carga sobre a eficiência.

Para teste do método de modelagem, os dados da CaC de 6kW são obtidos teoricamente a partir do modelo comercial de CaCs disponibilizado no programa Matlab/Simulink<sup>TM</sup>, através da ferramenta *SimPowerSystems*<sup>TM</sup>. Assim, os dados de entrada/saída são coletados de forma utilizável para treinamento e teste da rede ANFIS.

Para treinar a rede ANFIS, são utilizados vetores de dados organizados conforme a matriz apresentada na Equação 3.1. As quatro primeiras colunas são as entradas do vetor de treinamento e a última coluna ( $V_{CaC}$ ) é a saída do modelo. Para o caso aplicado aqui, com o objetivo de exemplificação do método, são selecionados dados representativos que caracterizem o comportamento do gerador em estudo.

$$\begin{bmatrix} I_{CaC1} & P_{H21} & P_{O21} & T_1 & \vdots & V_{CaC1} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \vdots & \downarrow \\ I_{CaCn} & P_{H2n} & P_{O2n} & T_n & \vdots & V_{CaCn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde  $n$  é o índice do vetor de dados usados e  $n = 1 \dots 7$

A seleção dos dados para treinamento considera as seguintes condições:

- a) Para o primeiro caso ( $n = 1$ ), a corrente de carga é variada de 0 até seu valor máximo (225 A), mantendo os valores nominais das outras características:  $P_{H_2} = 21,76PSI$ ,  $P_{O_2} = 14,50PSI$  e  $Temperatura = 64,85^\circ C$ . Estes dados são obtidos a partir da folha de especificações da CaC.
- b) Para  $n = 2 \dots 3$ ,  $P_{H_2}$  é variada em  $\pm 20\%$  do seu valor nominal, com os demais valores constantes;

- c) Para  $n = 4...5$ ,  $P_{O_2}$  é variada em  $\pm 20\%$  do seu valor nominal, com os demais valores constantes;
- d) Para  $n = 6...7$ , a temperatura é variada em  $\pm 20\%$  do seu valor nominal, com os demais valores constantes;

O conjunto de dados para treinamento (*training data*) é determinado através de um vetor com  $98 \times 5$  elementos. Os dados de checagem (*checking data*) constituem um vetor de  $84 \times 5$ . O tempo de amostragem para obtenção destes valores é de  $2s$ . Para este caso, esta amostragem é considerada suficiente para adquirir uma representação numérica significativa das diversas curvas características  $V_{xI}$  da CaC.

Geralmente, nos casos práticos, os dados de treinamento da rede podem ser coletados com ruídos proveniente das medições e podem não ser representativos para todas as características dos dados a serem apresentadas ao modelo. Quando os dados de treinamento são apresentados ao ANFIS, bem como os dados de checagem, o modelo neuro-fuzzy é ajustado para ter seus parâmetros associados (fator de aglutinação, faixa de influência, taxa de aceitação e taxa de rejeição) com um erro mínimo em relação aos dados de treinamento do modelo.

Um conjunto adicional de dados de teste (*testing data*) é usado para avaliar a capacidade de generalização do SIF resultante e a habilidade de emulação do modelo. Este grupo adicional de vetores de dados de teste é usado para validar o modelo ANFIS. Estes dados adicionais são adquiridos para diferentes condições de operação da CaC para confirmar a eficácia do modelo e sua capacidade de emulação sob condições diversas. Neste trabalho, dois vetores adicionais de dados de testes foram construídos: um com as variáveis operacionais da CaC variando em torno de  $\pm 10\%$  ( $178 \times 5$ ) dos valores nominais e outro com estas grandezas oscilando em  $\pm 15\%$  ( $178 \times 5$ ) dos valores nominais. A Tabela 3.2 apresenta as configurações utilizadas para construir, treinar, avaliar e validar a estrutura ANFIS que modela a CaC de 6 kW.

Para o treinamento da rede ANFIS utilizada neste trabalho usa-se a ferramenta “*anfisedit*”, presente no programa MatLab<sup>TM</sup>. Para compor o modelo ANFIS no MatLab<sup>TM</sup>, segue-se o fluxograma resumido da Figura 3.2.

Para gerar o SIF aplica-se o método de clusterização (ou agrupamento) subtrativa (*subtractive clustering*). Este método gera um modelo inicial para o treinamento ANFIS pela aplicação da clusterização dos dados apresentados à rede.

Segundo [50], algoritmos de clusterização são usados extensivamente, não somente para organização de dados, mas também para compressão de informações e construção de modelos. A descrição teórica deste método, incluindo parâmetros de cálculo e configuração, é dada no Apêndice B.

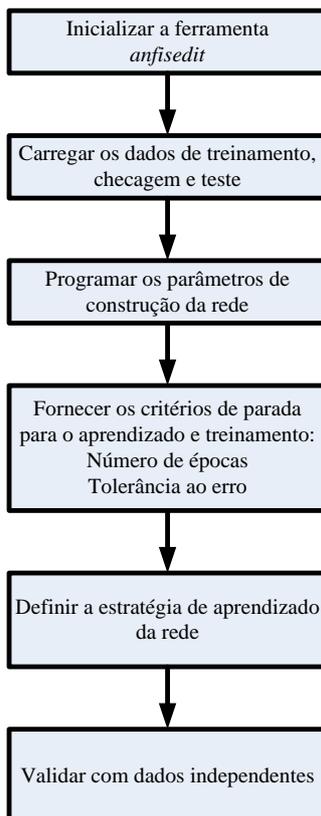


Figura 3.2 – Diagrama de fluxo para treinamento do modelo ANFIS

O método de aprendizado adotado para o treinamento e otimização do sistema de inferência da rede ANFIS é chamado de método de aprendizado híbrido [66]. O aprendizado híbrido é uma abordagem que leva a uma regra híbrida de aprendizado que combina dois métodos: o método do gradiente (ou *Method of Steepest Descent – SD*) e um estimador quadrático (*Least-Squares Estimator – LSE*). A vantagem desta técnica de geração de rede e aprendizado consiste na rápida identificação dos parâmetros da rede, permitindo a obtenção de um modelo mais preciso, com conversão mais rápida que as técnicas convencionais, tais como particionamento da grade (*grid*) e o algoritmo de

retro-propagação (*back-propagation*). Uma revisão destes métodos é apresentada no Apêndice C desta tese.

A configuração de rede para o modelo usado neste Capítulo resulta de uma bateria de testes utilizando os dados disponíveis. Estes testes visam avaliar a melhor opção para estruturar o modelo por meio de diversos ensaios, combinando diferentes técnicas de geração/aprendizado/teste de erros. As tabelas resultantes e as avaliações destes testes são apresentadas no Apêndice D. A Tabela 3.2 apresenta as configurações de rede e resultados obtidos a partir destas baterias de testes e considerados mais adequados para o modelo usado nesta tese. Para determinação do modelo final a ser usado considera-se como compromissos o número de regras, os menores erros, o menor número de funções de pertinência e o tempo de geração do modelo.

Tabela 3.2 – Arquitetura ANFIS e parâmetros de treinamento

| Arquitetura                                 | Parâmetros de treinamento    |
|---|------------------------------|
| Numero de entradas                          | 4                            |
| Número de saídas                            | 1                            |
| Número de regras                            | 43                           |
| Dimensão do vetor de treinamento            | 98 x 5                       |
| Dimensão do vetor de checagem               | 84 x 5                       |
| Dimensão do vetor de teste $\pm 10\%$       | 178 x 5                      |
| Dimensão do vetor de teste $\pm 15\%$       | 178 x 5                      |
| Tipo de modelo fuzzy                        | Sugeno                       |
| Tipo de função de pertinência das entradas  | Gaussiana                    |
| Método de otimização (regra de aprendizado) | Método de otimização híbrida |
| Tolerância ao erro (programada)             | 0,05                         |
| Época de treinamento (programada)           | 20                           |
| Faixa de influência (programada)            | 0,2                          |
| Fator de aglutinação (programada)           | 1,25                         |
| Taxa de aceitação (programada)              | 0,8                          |
| Taxa de rejeição (programada)               | 0,2                          |
| Erro de treinamento (programada)            | 0,05                         |
| Erro médio de treinamento (atingido)        | 0,048592                     |
| Erro médio de checagem (atingido)           | 0,36284                      |
| Erro médio de teste $\pm 10\%$ (atingido)   | 0,4118                       |
| Erro médio de teste $\pm 15\%$ (atingido)   | 0,46225                      |
| Época de treinamento de parada (atingido)   | 11                           |
| Tempo para geração do modelo final          | < 1 minuto                   |

A construção do modelo e as simulações efetuadas aqui são desenvolvidas e testadas em um computador AMD Turion™ 64 X2 Mobile Technology TL-58 1,90 GHz, 4Gb RAM.

A Figura 3.3 apresenta a estrutura do modelo ANFIS gerada no MatLAB<sup>TM</sup>. Esta figura mostra a arquitetura esquemática da rede ANFIS baseada no modelo fuzzy Sugeno. Nesta figura observam-se as cinco camadas (*layers*) que compõem o modelo neuro-fuzzy utilizado característico de uma rede ANFIS. As camadas de entrada de dados (1), de particionamento das variáveis de entrada (2), de blocos das regras (inferência fuzzy) (3), de consequentes das regras (4) e de saída (5) têm seus esquemas apresentados nesta figura. A associação das camadas (3) e (4) constituem o motor de inferência fuzzy.

A Figura 3.4 apresenta de forma sintetizada a estrutura do modelo ANFIS criado para a CaC de 6 kW onde se vê uma simplificação da estrutura em camadas da Figura 3.3, com o SIF acomodado no bloco central. A saída em tensão ( $V_{CaC}$ ) é resultado da função desta máquina de inferência que associa as quatro grandezas de entrada.

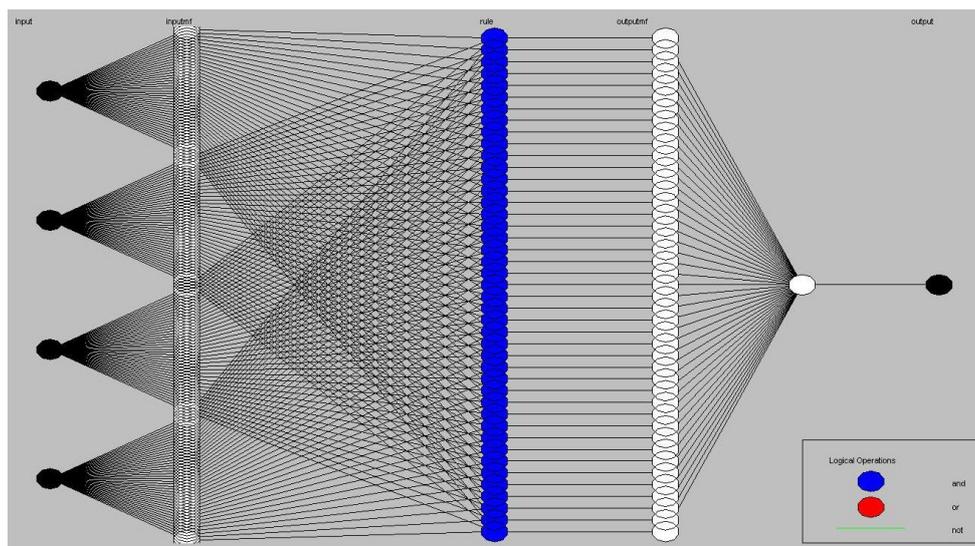
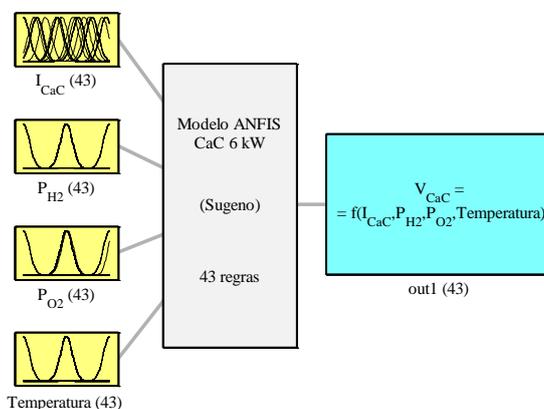


Figura 3.3 – Estrutura do modelo ANFIS gerado para a CaC de 6kW



Sistema do modelo ANFIS para CaC 6 kW: 4 entradas, 1 saída, 43 regras

Figura 3.4 – Estrutura do modelo ANFIS para a CaC 6 kW

A Figura 3.5 ilustra os gráficos das funções de pertinência das entradas, incluindo suas faixas de variação. Estes gráficos representam os agrupamentos (*clusters*) dos dados das variáveis de entrada ajustados conforme a configuração determinada na etapa de geração do SIF para a rede utilizada.

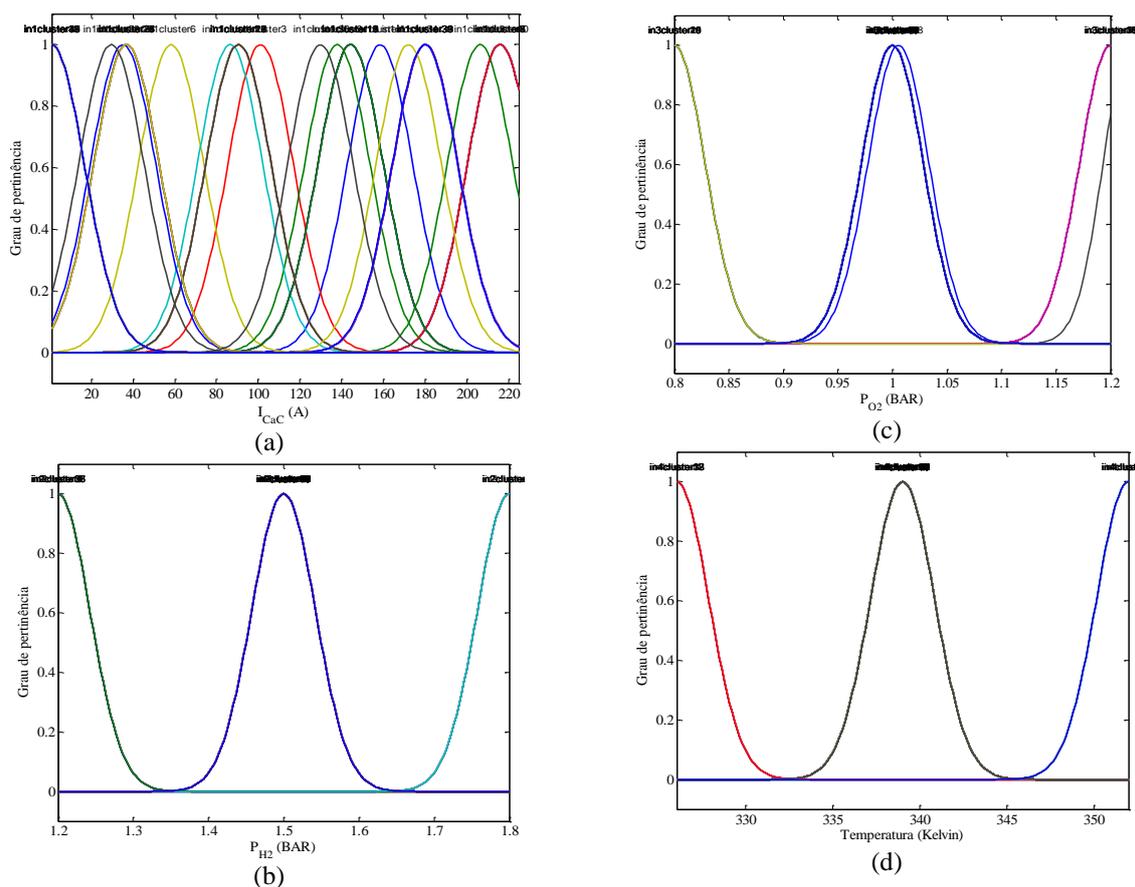


Figura 3.5 – Gráficos das funções de pertinência das entradas: agrupamentos da (a) corrente da CaC, (b)  $P_{H_2}$ , (c) da  $P_{O_2}$  e (d) temperatura de entrada

A Figura 3.6 mostra as relações das influências existentes entre as entradas sobre a saída do modelo ANFIS. As figuras são apresentadas sob a forma de gráficos de superfície, que permitem uma melhor visualização dos efeitos das combinações de cada função de entrada sobre a saída de tensão modelada pela rede neural para a CaC de 6 kW. Observa-se que os gráficos apresentam certa regularidade em seus formatos. Isso se deve ao fato de os dados para a geração da rede ANFIS ser proveniente dos valores obtidos a partir de resultados de modelo. Na prática estas superfícies comportam-se de

forma mais irregular devido a ruídos nas medições, oscilações das leituras adquiridas, variações na operação das CaCs e assim por diante. Isto demanda maior cuidado no momento da criação do modelo pelo aumento da probabilidade de ocorrência de erros de modelagem.

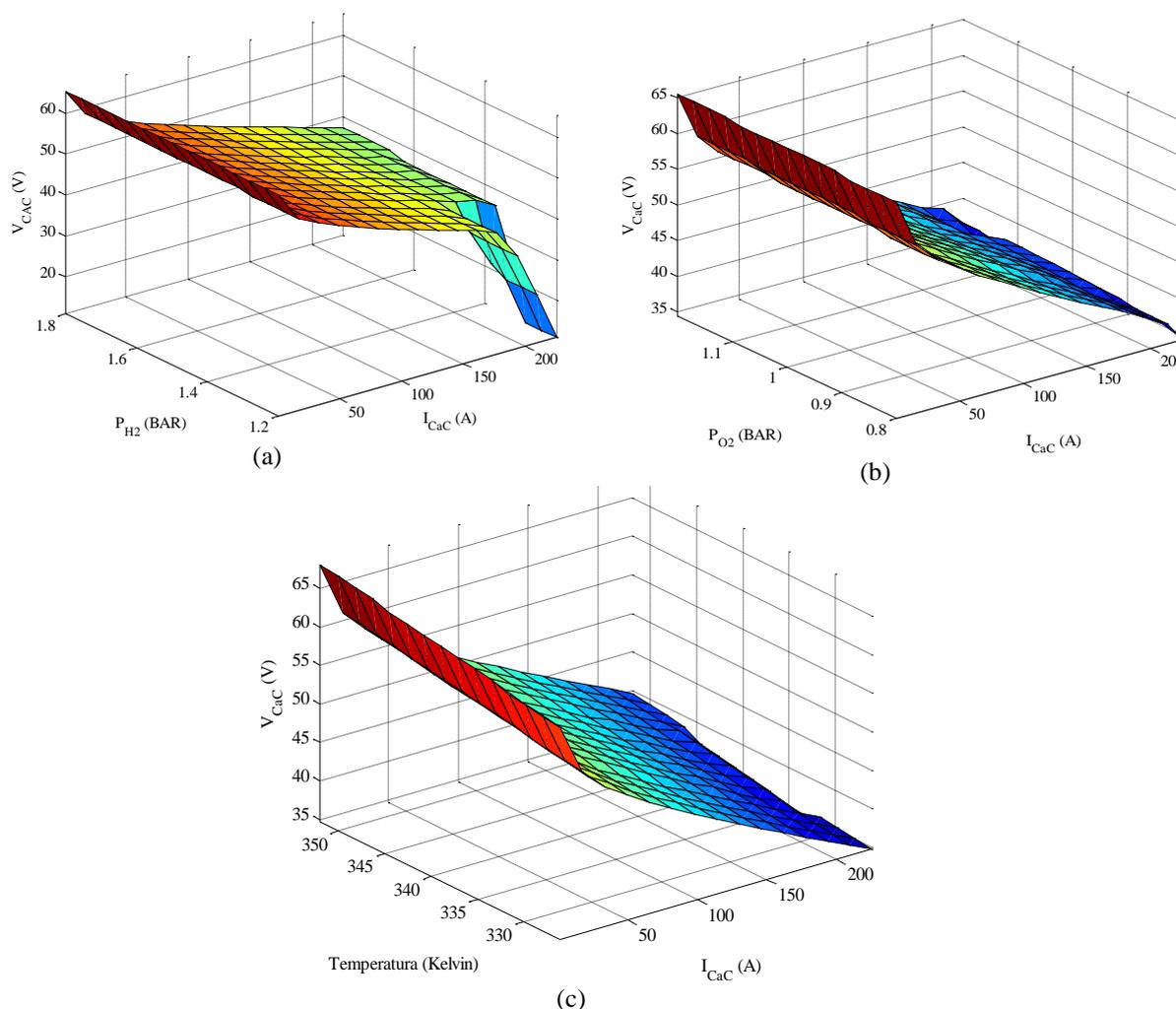


Figura 3.6 – Superfícies das correlações entre as entradas e saída.

A Figura 3.7 mostra o simulador ANFIS da CaC 6 kW implementado em Matlab/Simulink<sup>TM</sup>. O código-fonte com as informações do gerador criado com a ferramenta *anfisedit* é carregado no Simulink<sup>TM</sup> por meio do bloco *fuzzy Logic Controller*, renomeado nesta figura como “Modelo ANFIS CAC 6 kW”. Cabe ressaltar que o código-fonte gerado pela ferramenta do Matlab<sup>TM</sup>, permite a exportação para outras linguagens de programação, como #C, por exemplo. Isso permite que a

arquitetura ANFIS que simula a CaC não fique confinada apenas ao ambiente proprietário do Matlab<sup>TM</sup>. Além disso, são apresentadas em [66-69] o equacionamento para desenvolver o modelo ANFIS e as técnicas de geração e aprendizado.

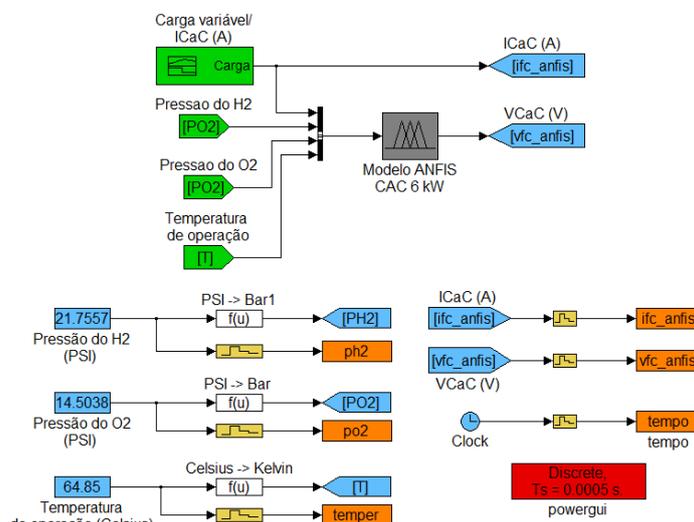


Figura 3.7 – Simulador da CaC ANFIS implementado em MatLab/Simulink<sup>TM</sup>

A Figura 3.8 mostra uma comparação entre os resultados originais obtidos e simulados para a rede ANFIS da CaC quando operando em condições nominais. Visualmente, os dados apresentam um bom grau de concordância, na ordem de  $\pm 3,1 \cdot 10^{-4}$ , conforme ilustrado nos gráficos da Figura 3.8.

A Figura 3.9 apresenta os resultados simulados comparando as variações de  $P_{H_2}$  e mantendo as outras grandezas constantes. Os sinais "+" e "-" nos gráficos indicam que os valores encontram-se acima ou abaixo do valor nominal. As Figuras 3.9 (a) e (b) indicam que a rede ANFIS apresenta uma aproximação com erros inferiores a  $\pm 0,05\%$  com relação aos valores originais.

A Figura 3.10 mostra os resultados simulados para a variação de  $P_{O_2}$  e suas consequências sobre a característica  $V \times I$ . No caso desta figura, para todas as simulações, os erros apresentaram-se inferiores a  $\pm 0,07\%$ .

Na Figura 3.11 os resultados simulados para a variação da temperatura são apresentados, com margens de erro variando em torno de  $\pm 0,075\%$ , quando comparados com os valores originais. Uma vez que o comportamento da CaC de 6kW frente as

variações das grandezas principais é avaliado no Capítulo 2, os gráficos das Figuras 3.9 a 3.11 não são discutidos aqui sob o ponto de vista eletroquímico.

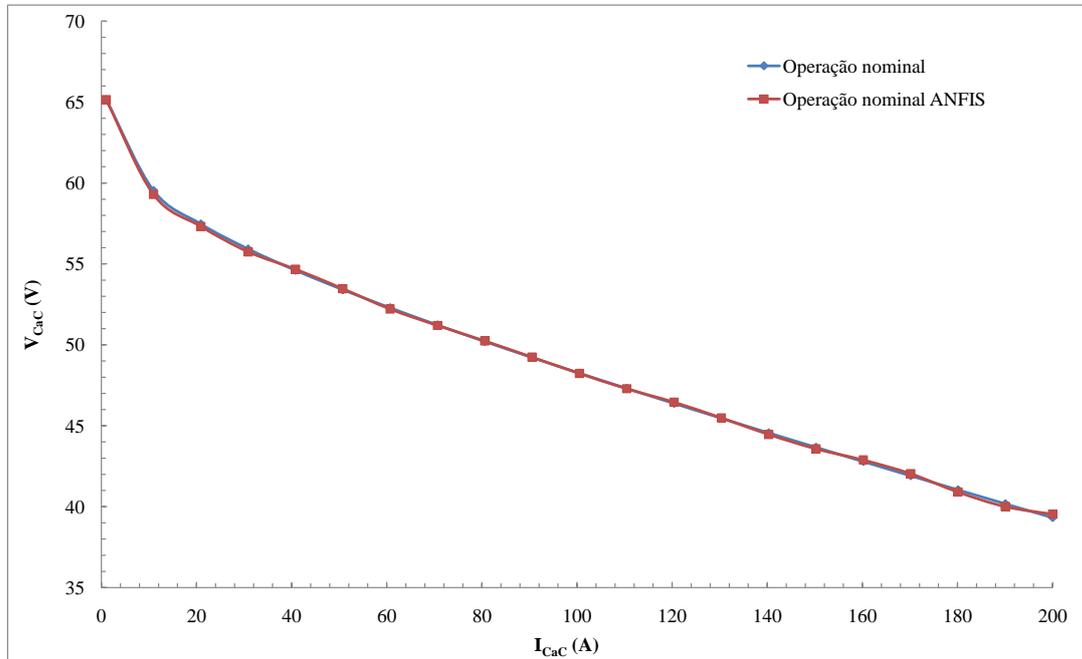
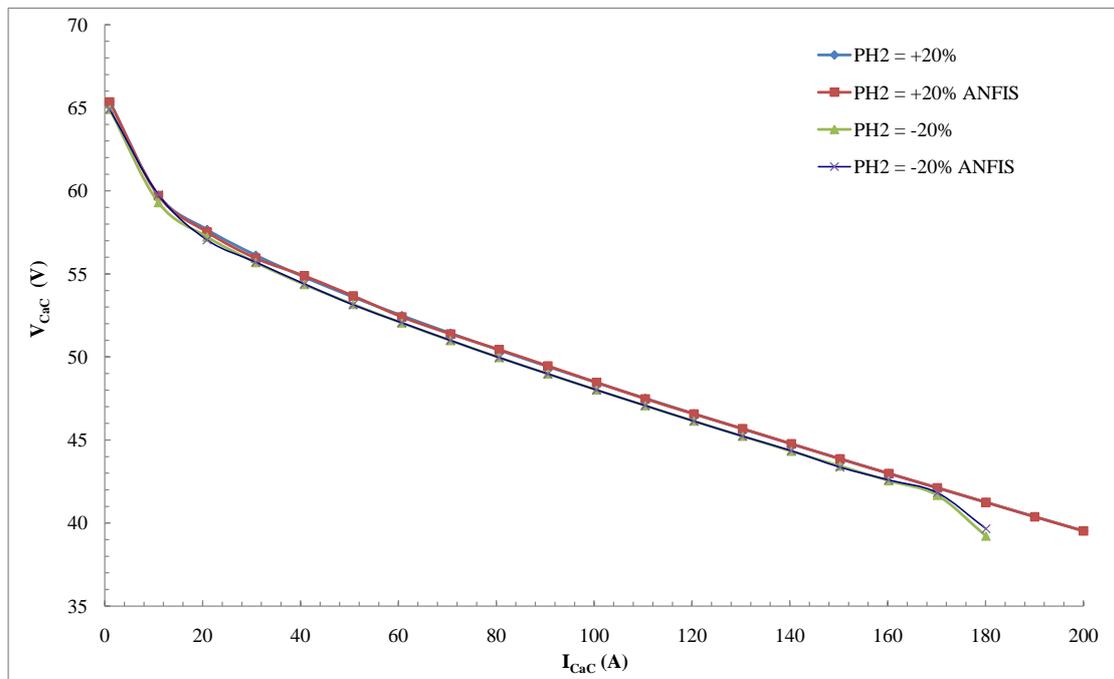
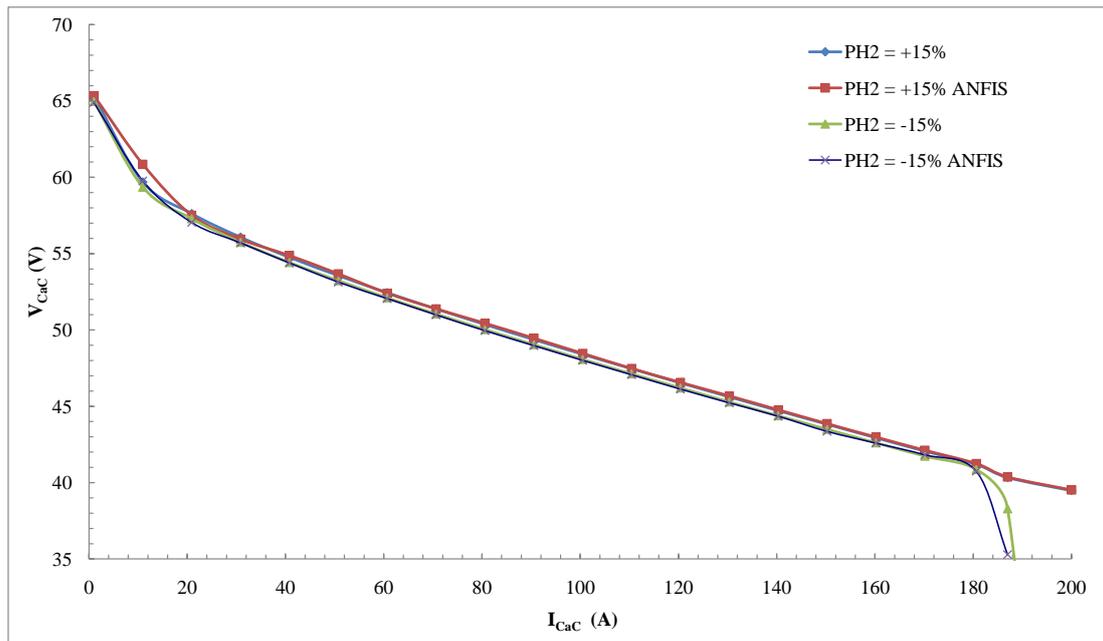


Figura 3.8 – Comparação entre os valores nominais, original e simulado



(a)



(b)

Figura 3.9 – Resultados simulados para (a)  $\pm 20\%$  de variação e (b)  $\pm 15\%$  de variação da  $P_{H_2}$

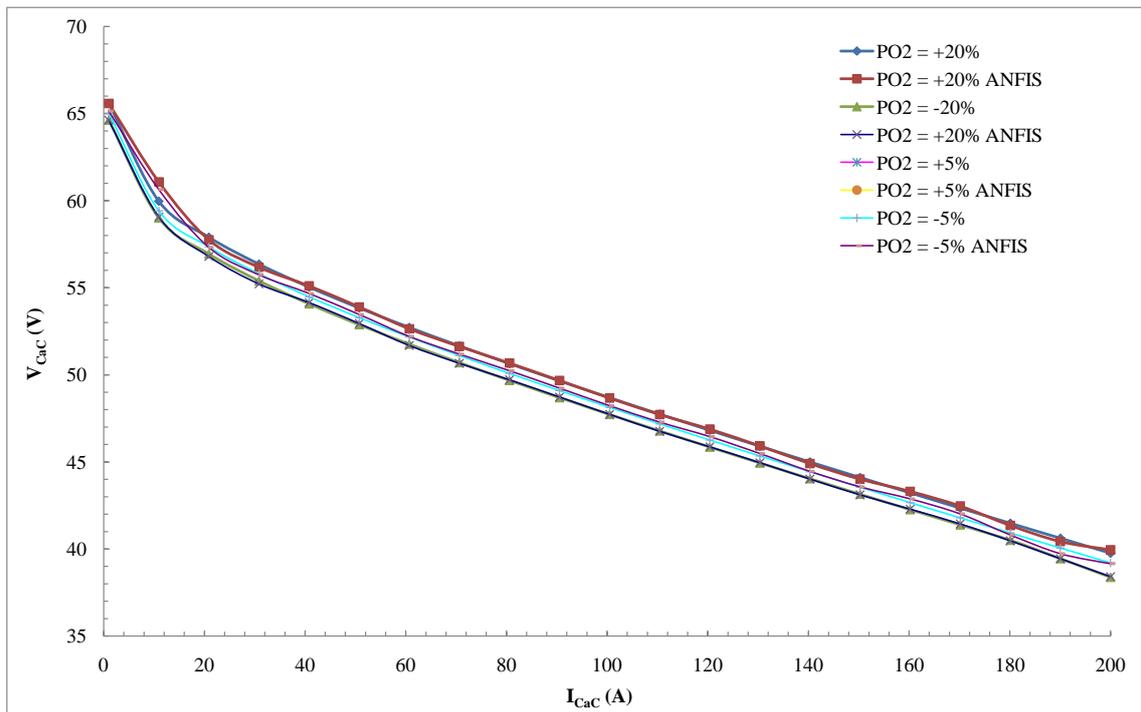


Figura 3.10 – Resultados simulados para  $\pm 20\%$ ,  $\pm 15\%$  e  $\pm 5\%$  de variação de  $P_{O_2}$

As Figuras 3.9 a 3.11 comprovam que a rede ANFIS emula adequadamente o comportamento da CaC quando submetida a variações em suas grandezas operacionais, com margens de erro bastante baixas, frequentemente inferiores a  $\pm 0,08\%$  em relação

aos valores originais. Deve-se lembrar de que o modelo neuro-fuzzy somente reproduz os padrões comportamentais das características de entrada e saída, sem a necessidade de equacionamento matemático adicional. Esta característica é útil para modelagem complexa onde o conhecimento matemático acerca do processo não é extremamente fundamental. Isto implica também na possibilidade de adicionarem-se outras variáveis (tal como a umidade) ao modelo desde que se tenham dados disponíveis para o treinamento e validação da rede neuro-fuzzy.

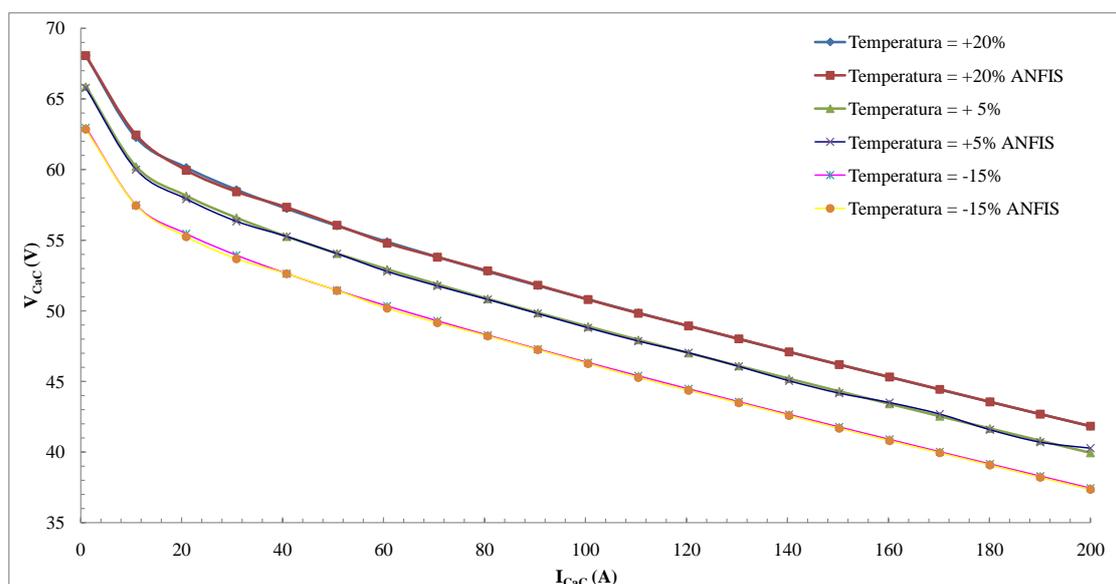


Figura 3.11 – Resultados do modelo para a variação da temperatura de operação

A partir daqui, nesta tese, o modelo ANFIS é aplicado como metodologia de modelagem e controle da CaC. Neste contexto, é focado que este método de projeto de gerenciamento da central geradora permita um ajuste multivariável no sentido de se obter níveis de eficiência desejados do gerador sem comprometer o consumo e a vida útil da pilha. Assim, de posse do modelo ANFIS pode-se desenvolver o controlador que permite o gerenciamento simultâneo das principais variáveis climáticas que afetam o rendimento da central.

### 3.3 Controle fuzzy

Como visto no Capítulo 2, a operação de geradores baseados em CaCs tipo PEM é bastante complexa, pois a produção de energia depende de uma série de fatores

externos e internos. Os fatores internos incluem as características construtivas do material, a geometria interna dos dutos de distribuição de reagentes, o formato de empacotamento da pilha, o acúmulo de água na membrana e/ou o ressecamento da mesma por consequência de um processo umidificador inadequado e assim por diante. Como fatores externos, pode-se citar a pressão e/ou fluxo dos reagentes, a temperatura do ar de entrada (ou a temperatura de operação do gerador), a umidade relativa do ar de entrada, dentre outros elementos climáticos diversos.

Do ponto de vista do projetista que define as condições operacionais do gerador, uma plataforma de controle multivariável, flexível e que permita alterações em suas condições de ajuste é bastante adequado. Isto se deve ao fato de que muitos dos fatores internos não podem ser facilmente modificados.

Levando-se em conta a possibilidade de operação autônoma da CaC, como é o caso da ocorrência de um ilhamento da rede local, se uma das fontes primárias desta rede é baseada em CaCs, torna-se interessante a possibilidade de o compensador atuar no sentido de, simultaneamente, elevar a potência de saída disponível e não comprometer a eficiência da geração elétrica. Além de aumentar a autonomia da base geradora, a confiabilidade da pequena matriz energética local também recebe um acréscimo.

Uma estratégia de controle eficiente para CaCs deve ser baseada no uso do menor número de componentes periféricos. Por exemplo, umidificadores e dispositivos de refrigeração a água não são muito interessantes para uma central geradora de baixo custo e de complexidade reduzida. Em alguns casos, o controle da umidificação também pode ser realizado através da manutenção do fluxo do ar de reação. O balanceamento da temperatura em função do tipo de pilha pode ser conduzido de forma mais eficaz mantendo o gerador operando na região linear. Também se pode traduzir o uso mínimo de periféricos como sendo economia de energia.

Em [70] é apresentada uma abordagem de controle fuzzy para uma pilha de CaCs. Seu principal objetivo é estudar a otimização energética da pilha. O trabalho visa o gerenciamento do compressor de ar, responsável por boa parte do consumo de um gerador PEM. Considera-se que até 40% da energia total produzida são consumidos pelo equipamento auxiliar. Dois controladores fuzzy são propostos: um para o compressor e outro para o restante dos dispositivos. Em [70] é levado em conta que a estratégia de controle deve responder à dinâmica requisitada pelas variações elétricas,

para evitar a redução da vida útil da pilha e, talvez, de toda central geradora. Entretanto, apesar de procurar a otimização energética de forma a manter as condições da célula adequadas, segundo a carga demandada, não há a preocupação em obter maior eficiência do gerador dentro de uma faixa operacional onde o desperdício de  $H_2$  possa ser melhor controlado e reduzido. Além disso, estudos adicionais com base em resultados experimentais em um gerador real não são apresentados.

O trabalho de [71] utiliza controle fuzzy para gerenciar a operação de uma CaC. Resultados de simulações são apresentados como forma de validar a eficácia do compensador fuzzy proposto. O foco é a manutenção da tensão de saída da pilha dentro de níveis adequados conforme varia-se a carga. Como variáveis de entrada, são consideradas a corrente solicitada, temperatura da pilha e pressões do anodo e catodo. Comprova-se neste trabalho, que um algoritmo inteligente é mais hábil para gerenciar o conjunto da CaC (altamente não linear). Porém, o esquema de gerenciamento proposto não busca a eficiência energética ou maximizar a vida útil do gerador.

O trabalho apresentado por [72] realiza estudos experimentais para referentes ao suprimento de  $H_2$  a CaC. Estes estudos são feitos por meio de comparações entre dois tipos de compensadores: fuzzy e PID. Os resultados experimentais demonstram que a eficiência da pilha, quando esta é controlada com algoritmos fuzzy é de 37% e, significativamente, excede aquela obtida pela aplicação do compensador PID: apenas 14,67%. Dessa forma, muito menos  $H_2$  é desperdiçado. Então, o custo para geração de eletricidade usando a CaC é menor. Mais ainda, o controlador fuzzy não necessita de um longo período de resposta quanto o PID para realizar a estimativa e teste das variáveis. Este resultado demonstra que controladores inteligentes oferecem vantagens frente aos controladores clássicos em certas aplicações.

Em [73,74] um dos objetivos é desenvolver um modelo dinâmico para CaC capaz de caracterizar os efeitos do fluxo de gás, pressão e umidade. Posteriormente, controladores multivariáveis, lineares e não lineares, são projetados para controlar a vazão de ar e fluxo de  $H_2$ . O foco do modelo é a obtenção de um desempenho transitório da relação estequiométrica de ar, pressão de entrada no catodo e a correta diferença de pressões entre o anodo e o catodo. Verifica-se que o relacionamento entre a tensão da pilha e o transporte de água é significativo para a estimação da umidade e a operação de purga. Observa-se que, comparados com os controladores PI, os

controladores multivariáveis melhoram a resposta transitória e mostram maior capacidade de rejeição de distúrbios. Porém, este trabalho não busca aprimorar o controlador para elevar a eficiência energética ou manter a pilha operando dentro de condições otimizadas quando em regime permanente.

Uma estratégia de controle desejável deve levar em conta o comportamento da pilha, durante variações da carga, tomando em consideração o consumo de potência, eficiência da pilha e a regulação das principais variáveis operacionais externas. Na prática, os problemas durante a operação de uma CaC ocorrem durante uma mudança na potência de carga. Normalmente, o aumento da corrente drenada faz com que o gerador transite, ao longo da curva característica  $VxI$ , para a região onde as perdas de difusão são mais intensas e a eficiência se torne bastante reduzida. Um dos efeitos disso, por exemplo, após uma variação da carga, consiste no aumento da taxa de produção de água no lado do catodo, reduzindo a condutividade iônica, com prejuízo direto às reações eletroquímicas.

Em [75] uma estratégia de controle fuzzy é apresentada para controlar o gerenciamento do conteúdo de água na membrana de CaCs tipo PEM portáteis. É concluído que o controle da estequiometria por meio da regulação do circuito de fornecimento do ar pode ajustar de forma adequada o nível de umidade na membrana. Uma variação de até 10% na potência da célula pode ser obtida apenas pelo gerenciamento da umidade. Observa-se que os níveis mais altos de potência são atingidos em temperaturas mais altas. Porém, este trabalho foca apenas o aspecto da umidificação da membrana e procura verificar os máximos níveis de potência da CaC – que ocorrem na região final da característica  $VxI$ . Não há preocupações referentes à integridade do gerador em regime permanente e os problemas decorrentes de sua operação fora da região linear da curva característica, onde as perdas por difusão são mais significativas. Inclusive, o baixo rendimento nesta região, com relação ao consumo do combustível não é tratado neste trabalho.

Em [76] é realizada uma revisão e discussão teórica sobre modelagem, análise e síntese de estruturas de algoritmos de controle fuzzy multivariável. Mostra-se que é possível associar múltiplos blocos funcionais fuzzy de forma a interagirem entre si oferecendo uma solução para o controle de duas ou mais variáveis simultaneamente.

A referência [77] apresenta um estudo referente a estruturas de controle fuzzy multivariável, baseadas na modelagem qualitativa de um processo. Em geral, muitas

aplicações dos algoritmos fuzzy para solução de problemas de controle são frequentemente relacionadas a sistemas de única entrada/única saída (*single input-single output* - SISO). Esta referência apresenta duas alternativas de projeto do controlador multivariável: uma estrutura descentralizada e o design de um controlador global. A primeira alternativa é relativamente simples, podendo ser aplicada a processos que possuem pequenos efeitos de acoplamento. A segunda opção de projeto é uma extensão da primeira, porém levando em consideração as múltiplas interações entre os processos. A desvantagem observada na segunda alternativa de projeto refere-se ao fato de que é projetado um único bloco de regras para controle, nas quais devem ser previstos os efeitos das diferentes variáveis e suas interações. Esta alternativa é interessante para o projeto de controladores com até duas variáveis de entrada. Entretanto, acima disso, observa-se que a determinação de um bloco de regras passa a ser bastante complexo.

Para esta tese a solução de controle das variáveis que mantém a operação da CaC consiste na aplicação de blocos fuzzy paralelos, descentralizados, atuando sobre cada variável de forma semi-independente. A intersecção dos blocos de controle se dá pela resposta da própria CaC. A realimentação da malha de controle permite aos blocos funcionais o reajuste dos valores instantâneos de pressão, fluxo, temperatura e outros elementos envolvidos. A Figura 3.12 representa esta associação de blocos fuzzy de forma simplificada. Cada bloco fuzzy da Figura 3.12 representa um bloco de regras equivalente a cada variável (pressão, fluxo, temperatura e assim por diante). Os blocos de regras são realimentados pelos valores de tensão e da corrente de saída da própria CaC.

Para a construção do diagrama de blocos multivariável apresentado na Figura 3.12 o projetista escreve primeiro um conjunto de equações fuzzy baseadas na descrição linguística do comportamento de cada variável. Então, agregam-se os blocos descritivos sob a forma de um único bloco funcional. Finalmente, os elementos devem ser integrados através dos pontos de ramificação com o bloco de intersecção (CaC), completando o diagrama geral. É necessário observar-se que, neste processo, duas etapas devem ser preenchidas:

1. A construção singular de um bloco de regras independente para cada variável: cada bloco de regras é otimizado conforme a necessidade requerida para o comportamento da CaC;

2. Revisão dos blocos de regras quando blocos fuzzy são agregados: as regras produzidas na etapa anterior são revistas e adequadas para comportarem-se de forma harmônica com as demais.

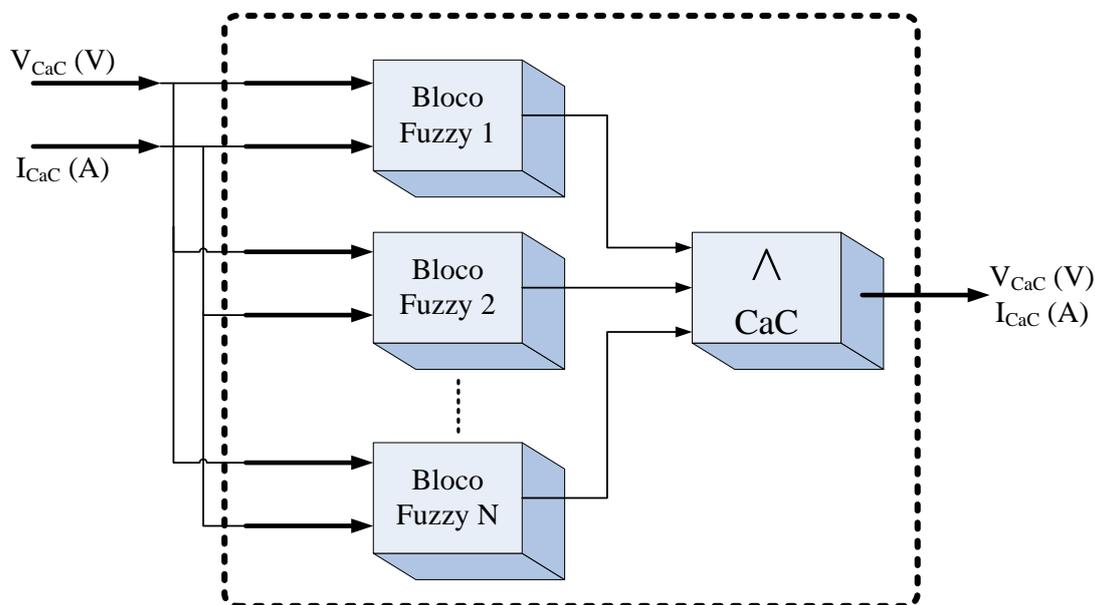


Figura 3.12 – Estrutura do controlador fuzzy multivariável

Em ambas as etapas torna-se evidente a necessidade de um simulador como o apresentado na seção anterior. Neste caso, quanto mais variáveis de entrada o simulador for capaz de processar, melhor será a análise do comportamento da CaC. Isso permite uma descrição mais eficiente (ou conveniente) das regras do SIF.

A abordagem do processamento dos SIF em paralelo e em duas etapas de revisão de regras se dá pelo fato de se considerar que um único bloco de regras agregando todas as grandezas apresenta complexidade elevada dadas as mútuas interferências entre as variáveis de controle. Além disso, a construção deste bloco único e multi-interativo aumenta a probabilidade de erros na tomada de decisões.

Como hipótese, esta tese assume ser possível ajustar as variáveis de entrada da CaC de modo que a eficiência do gerador possa ser corrigida dentro de uma região específica. Como visto na análise comportamental da CaC do Capítulo 2, ao alterar-se as variáveis de entrada isoladamente, as consequências são visualizados diretamente sobre a curva característica  $V \times I$  da CaC, que é um espelho da eficiência da pilha. Assume-se que operar a CaC fora da região linear apresenta sérias desvantagens, tais

como: 1) baixa corrente (baixa potência disponível na saída, conseqüentemente) no caso da CaC operar na região de ativação e 2) eficiência drasticamente (em termos de consumo de  $H_2$ ) reduzida na região de concentração (apesar de potência mais alta estar disponível). Neste contexto, considera-se que a operação da CaC na região linear é a mais adequada. Por conseqüência, assume-se que o controlador multivariável deve atuar de forma a favorecer o aumento da eficiência nesta região.

A Figura 3.13 apresenta uma curva de polarização teórica estimada para o processo de elevação da carga de uma pilha. Naturalmente, ao aumentar-se a carga da CaC, o caminho indicado pela seta 2 é seguido. Isto leva a pilha a operar na região onde as perdas por difusão predominam. A vantagem deste processo é a obtenção de uma potência de saída maior, representada por  $P'$ . Porém, a principal desvantagem é a tensão de saída extremamente baixa (eficiência drasticamente reduzida).

A área delimitada pelos seguimentos  $\overline{AA'BB'}$  na Figura 3.13 representa a faixa de atuação do controlador fuzzy a ser definido nesta tese, pois dentro desta área transita-se aproximadamente dentro da região linear de operação da CaC, onde as perdas são mais balanceadas. O objetivo da metodologia do controle de eficiência apresentado nesta tese consiste em manter-se a CaC operando na faixa de corrente definida entre  $I_A$  e  $I_B$  (região mais linear da curva). Os compensadores devem regular os níveis de eficiência de forma a ajustar a tensão de saída da CaC. Isso faz com que a pilha tenha sua característica deslocada no sentido da seta 1. Portanto, a eficiência deve ser acrescida pela variação dos valores de tensão modificados de  $V_{AB}$  para  $V_{A'B'}$ .

O deslocamento da curva característica no sentido da seta 1, permite aumentar a potência de saída ainda dentro da região linear (seta 1'), atingindo o ponto de potência  $P'$ . Assim, a potência de saída do gerador será maior, sem necessidade de se comprometer a eficiência. Esta forma de atuação permite que a diferença  $\Delta P = P' - P$  seja reduzida. Portanto, a CaC pode suprir potências mais elevadas, considerando o compromisso de se mantê-la dentro de uma zona mais eficiente de operação.

Uma vez que a dinâmica real da CaC não permite respostas ideais, tais como as apresentadas nas curvas da Figura 3.13, estima-se que a resposta dos compensadores ofereçam uma curva de eficiência aproximadamente similar àquela mostrada na Figura 3.14. Nesta figura é possível observar que a área definida pelos seguimentos  $\overline{AA'BB'}$  não é totalmente preenchida. Isso evidencia que há diferenças entre os ganhos de



Para construir as tabelas dos blocos de regras, observam-se diferentes regiões de interesse (Figura 3.16) quando da programação dos algoritmos fuzzy. Na Figura 3.16 evidencia-se que o projetista deve considerar a representação da curva característica dentro do bloco de regras. É observado que, na diagonal principal da tabela, há uma reprodução da curva característica  $V \times I$  da CaC, incluindo a transição entre as regiões principais. É dentro desta diagonal principal que devem ser dispostas as regras mais criteriosas pertinentes ao comportamento desejado para a CaC. Isso implica em que, no centro da tabela mostrada na figura, é encontrado o conjunto dos valores que representam a região da operação linear. Nesta região, as regras são estabelecidas e distribuídas de forma mais criteriosa. Já nas periferias da faixa de operação principal, encontram-se as zonas onde as coincidências da característica  $V \times I$  tornam-se mais improváveis. Por exemplo, pela análise da curva de polarização, constata-se que dificilmente é obtido um valor de corrente alta para um alto valor de tensão terminal e vice-versa.

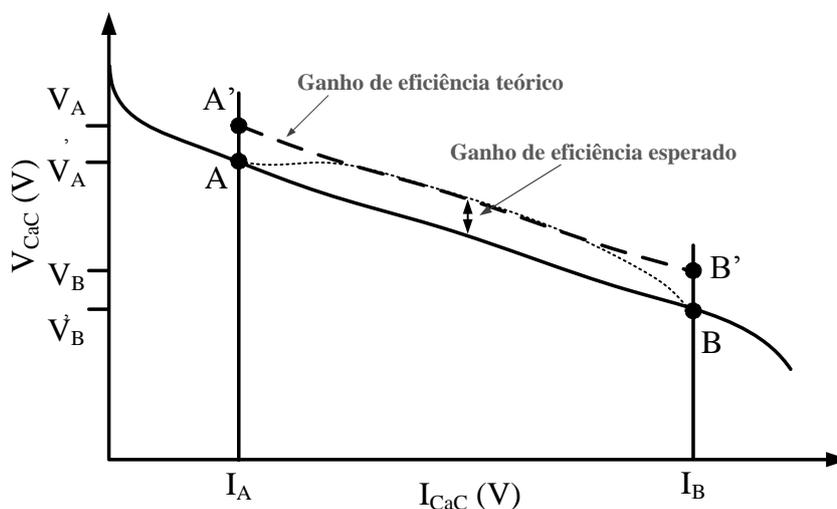


Figura 3.14 – Diferenças esperadas entre os ganhos de eficiência real e teórico

Essa improbabilidade pode ser tratada de três formas no bloco de regras: (a) pelo não preenchimento das regras nesta região, (b) pela aplicação da regra da vizinhança (a regra não preenchida tem valor de saída igual ao último valor nas proximidades) ou (c) o preenchimento voluntário das regras improváveis. Neste caso, considera-se a terceira alternativa como a mais indicada. Isso se deve ao fato de que, na prática, a ocorrência de

desvios (ou falhas, tais como ruídos) na aquisição de dados é possível. Assim, se todas as regras forem pré-definidas, o projetista pode ganhar uma “margem de erro” quanto a segurança do controlador.

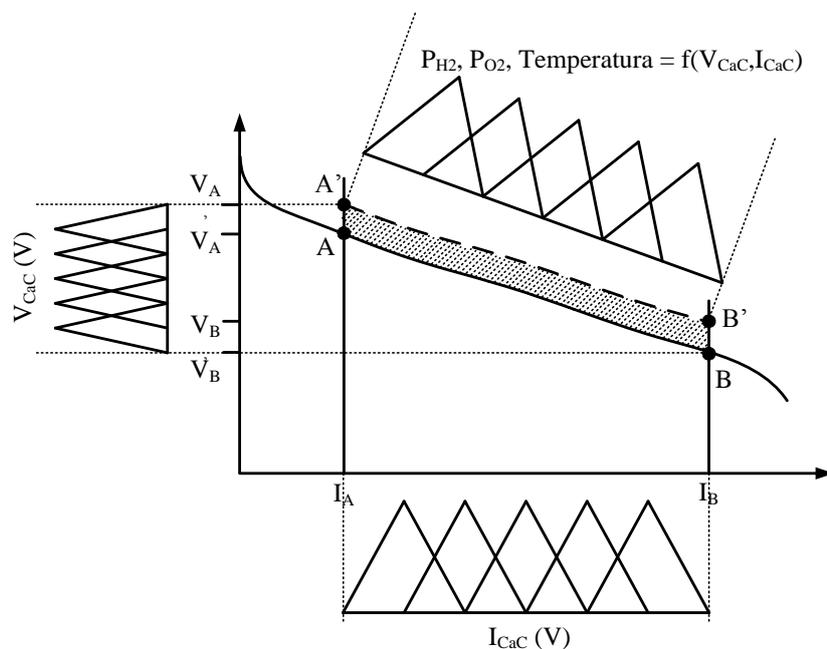


Figura 3.15 – Diagrama geral para a interface fuzzy de correlação entradas/saídas

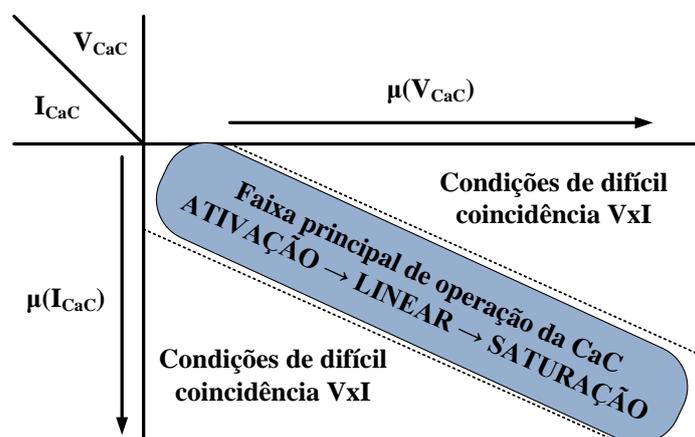


Figura 3.16 – Tabela genérica para a construção dos blocos de regras fuzzy

### 3.3.1 Programação dos controladores fuzzy

Nesta seção são apresentados os resultados simulados para a teoria referente à melhoria das eficiências. As simulações para a CaC de 6kW são conduzidas em

Matlab/Simulink™. A faixa de variação da carga é de 0 a 220 A em intervalos de 10 A. Os dados para este gerador são fornecidos no Capítulo 2.

As variáveis de controle são  $P_{H_2}$  e  $P_{O_2}$  e a temperatura de operação. Os compensadores são realimentados com  $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$ , conforme a Figura 3.12.

Para o projeto dos reguladores fuzzy para  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  e temperatura, são implementados controladores baseados na lógica de Mamdani. O compensador de Mamdani descreve os estados de um processo usando variáveis lingüísticas como entradas, que servem para controlar as regras. O método do raciocínio nebuloso de Mamdani é baseado em operadores de inferência MAX-MIN. A vantagem do raciocínio de Mamdani é a independência das equações lineares durante o processo de defuzzificação das variáveis de controle, diferente do que ocorre com o raciocínio Takagi-Sugeno-Kang (TSK), no qual os conseqüentes das regras do controlador combinam as variáveis com sistemas de equações lineares. O Apêndice C apresenta uma introdução teórica a respeito de algoritmos fuzzy baseados na lógica de Mamdani.

Para avaliar a eficácia da aplicação dos controladores fuzzy no gerenciamento da eficiência, três diferentes arquiteturas são testadas para cada controlador isolado:

- a) Blocos de 9 regras, com as entradas ( $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$ ) e saídas ( $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  e temperatura) particionadas de forma homogênea em três funções triangulares de pertinência,
- b) Blocos de 25 regras, com as entradas ( $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$ ) e saídas ( $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  e temperatura) particionadas de forma homogênea em cinco funções triangulares de pertinência e
- c) Blocos de 49 regras, com as entradas ( $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$ ) e saídas ( $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  e temperatura) particionadas de forma homogênea em sete funções de pertinência triangulares.

A lógica fuzzy permite uma vasta gama de configurações de arquitetura das máquinas de inferência. Nesta tese, opta-se pelo uso das estruturas simplificadas, de aplicação mais frequente na literatura. Pode-se, por exemplo, usar outros formatos para as funções de pertinência, tais como as curvas gaussianas, sigmóides,  $\cos^2(x)$ , *S-shape*,

dentre outras. Porém, as formas mais retilíneas, como é o exemplo das funções triangulares, são de simples implementação, tanto em microcontroladores comuns (oito bits, por exemplo) quanto em DSP's mais sofisticados, dado seu equacionamento computacional não oneroso. Além disso, os blocos de regras utilizados permitem simples implementações do tipo varredura-de-tabela (*look-up table*).

Segundo [78] um número prático de conjuntos fuzzy linguísticos é algo entre 2 e 7. Em geral, conforme se aumenta o número das funções de pertinência, aumenta-se a precisão, mas a demanda computacional também é significativa. Por exemplo, em [78] afirma-se que uma mudança de 5 para 7 conjuntos triangulares aumenta a precisão em torno de 15%, aproximadamente. Acima de sete, as melhorias deixam de ser significativas. O formato das funções linguísticas pode ser variado ou alterado conforme desejado. Se houver necessidade de respostas mais suaves do controlador pode-se, por exemplo, aplicar-se funções gaussianas ou outros formatos de contornos suaves como alternativas. Como forma de padronização, para a avaliação dos resultados, o número máximo de regras a serem usadas nesta tese será de 49 para funções triangulares de pertinência.

Outros fatores observados para a construção dos blocos de inferência fuzzy são os graus de superposição entre as funções de pertinência. Busca-se o compromisso de manter as superposições na faixa dos 25 a 75% como forma de compromisso razoável.

A Figura 3.17 apresenta as construções dos compensadores testados no Simulink<sup>TM</sup>. Nestas simulações, as estruturas neuro-fuzzy para o controle e para o modelo são carregadas da área de trabalho (*workspace*) do Matlab<sup>TM</sup> pelos blocos “Controlador” e “Modelo ANFIS”, respectivamente. Esta figura apresenta os simuladores usados na primeira etapa do projeto, onde as variáveis a ser controladas são apresentadas isoladamente. Esta figura demonstra que, no início do processo de projeto, cada controlador é especificado e ensaiado isoladamente, sendo a variável de controle monitorada e as demais mantidas constantes.

A Tabela 3.3 apresenta um exemplo da forma geral das grades de distribuição de regras utilizadas para o dimensionamento textual e disposição linguística das variáveis fuzzy envolvidas. Nesta tabela a região sombreada corresponde a mesma região de interesse, observada na Figura 3.16.

A Tabela 3.4 apresenta as características dos controladores fuzzy utilizados. Como critério de simplificação, para otimizar e ajustar os controladores optou-se por

manter as diversas estruturas fuzzy com características similares entre si. Estes são elaborados, avaliados e ajustados por meio da ferramenta “fuzzy” disponível no Matlab/Simulink™.

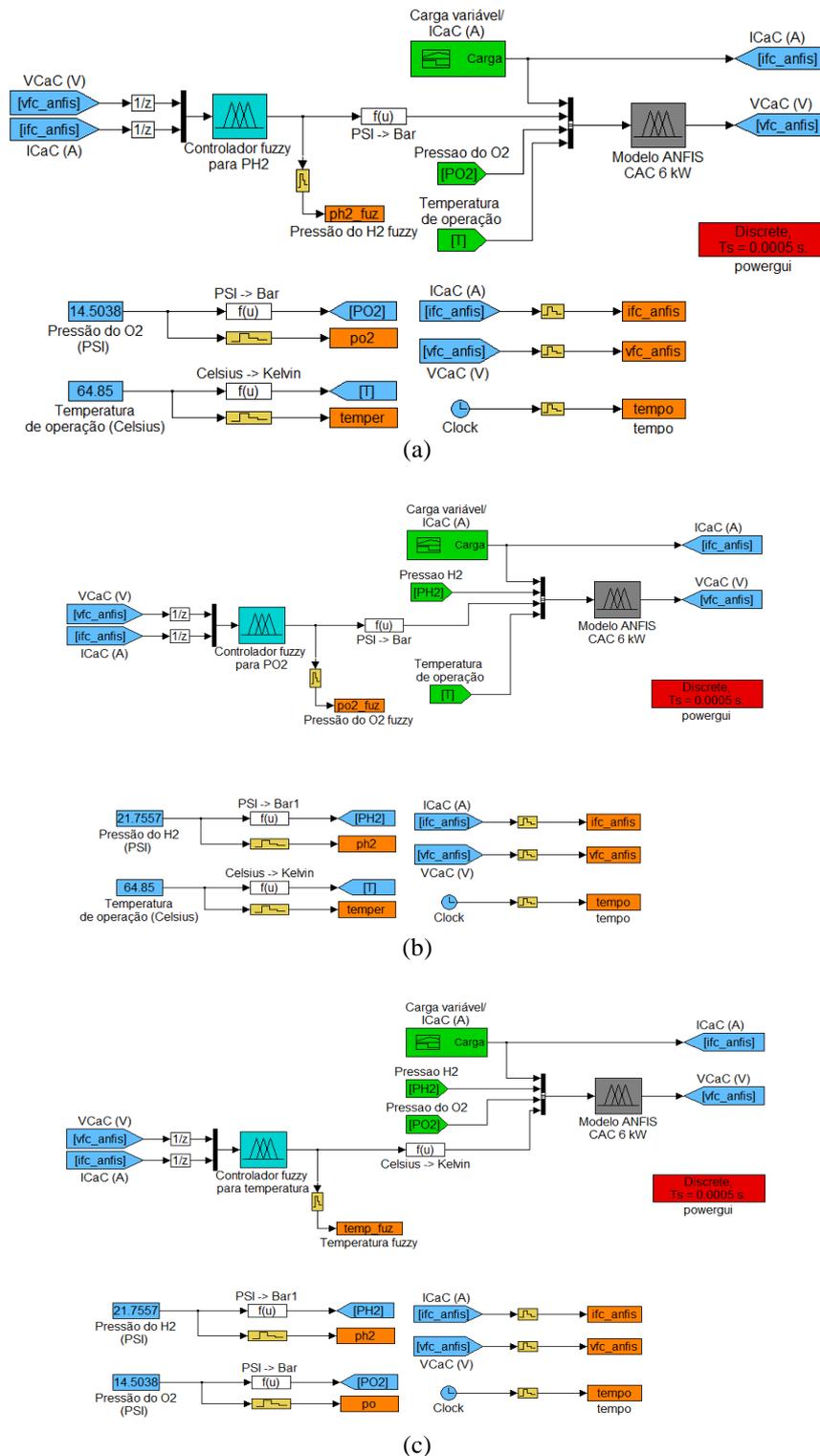


Figura 3.17 – Compensadores e modelos usados para simular os controladores sobre a (a)  $P_{H_2}$ , (b)  $P_{O_2}$  e (c) temperatura de operação

Tabela 3.3 – Tabela geral para programação dos blocos de regras

| $V_{CaC}$ \ $I_{CaC}$ | A  | PA | PMA | M  | PMB | PB | B  |
|-----------------------|----|----|-----|----|-----|----|----|
| B                     | 1  | 2  | 3   | 4  | 5   | 6  | 7  |
| PB                    | 8  | 9  | 10  | 11 | 12  | 13 | 14 |
| PMB                   | 15 | 16 | 17  | 18 | 19  | 20 | 21 |
| M                     | 22 | 23 | 24  | 25 | 26  | 27 | 28 |
| PMA                   | 29 | 30 | 31  | 32 | 33  | 34 | 35 |
| PA                    | 36 | 37 | 38  | 39 | 40  | 41 | 42 |
| A                     | 43 | 44 | 45  | 46 | 47  | 48 | 49 |

Tabela 3.4 – Características gerais dos algoritmos fuzzy utilizados

|   | Estrutura 1                | Estrutura 2                | Estrutura 3                |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Arquitetura                                   | Parâmetros                 | Parâmetros                 | Parâmetros                 |
| Tipo  | Mamdani                    | Mamdani                    | Mamdani                    |
| Método de inferência                          | Máx-Mín                    | Máx-Mín                    | Máx-Mín                    |
| Método de Implcação                           | Mínimo                     | Mínimo                     | Mínimo                     |
| Método de Agregação                           | Máximo                     | Máximo                     | Máximo                     |
| Método de Defuzzyficação                      | Centro da área (Centróide) | Centro da área (Centróide) | Centro da área (Centróide) |
| Entradas                                      | 2                          | 2                          | 2                          |
| Saídas  | 1                          | 1                          | 1                          |
| Número de regras                              | 9                          | 25                         | 49                         |
| Formato das funções de pertinência            | Triangular                 | Triangular                 | Triangular                 |
| Número de funções de pertinência das entradas | 3                          | 5                          | 7                          |
| Número de funções de pertinência das saídas   | 3                          | 5                          | 7                          |
| Mínima sobreposição utilizada                 | 25%                        | 25%                        | 25%                        |
| Peso de cada regra                            | 1                          | 1                          | 1                          |

Para simplificar o tratamento das funções de pertinência e o desenvolvimento dos blocos de regras, são usadas as mesmas denominações linguísticas para todas as variáveis, conforme a lista de nomenclaturas da Tabela 3.5. Cada regra tem peso unitário em virtude de buscar-se a avaliação do impacto de cada uma sobre o controlador final. Isto também reduz a complexidade da tarefa de ajuste das regras.

A Figura 3.18 apresenta a distribuição das funções de pertinência para as entradas de tensão ( $V_{CaC}$ ) e corrente ( $I_{CaC}$ ). Nesta figura são apresentadas as partições das entradas das três arquiteturas fuzzy onde Observa-se a obediência à distribuição simétrica dos conjuntos fuzzy de entrada. Isto não é uma regra obrigatória, pois estas funções de pertinência permitem um elevado grau de liberdade para serem modificados. Isso favorece consideravelmente a otimização das respostas dos controladores.

Tabela 3.5 – Nomenclatura das funções de pertinência

| Sigla | Definição         |
|-------|-------------------|
| B     | Baixo             |
| PB    | Pouco-Baixo       |
| PMB   | Pouco-Médio-Baixo |
| M     | Médio             |
| PMA   | Pouco-Médio-Alto  |
| PA    | Pouco-Alto        |
| A     | Alto              |

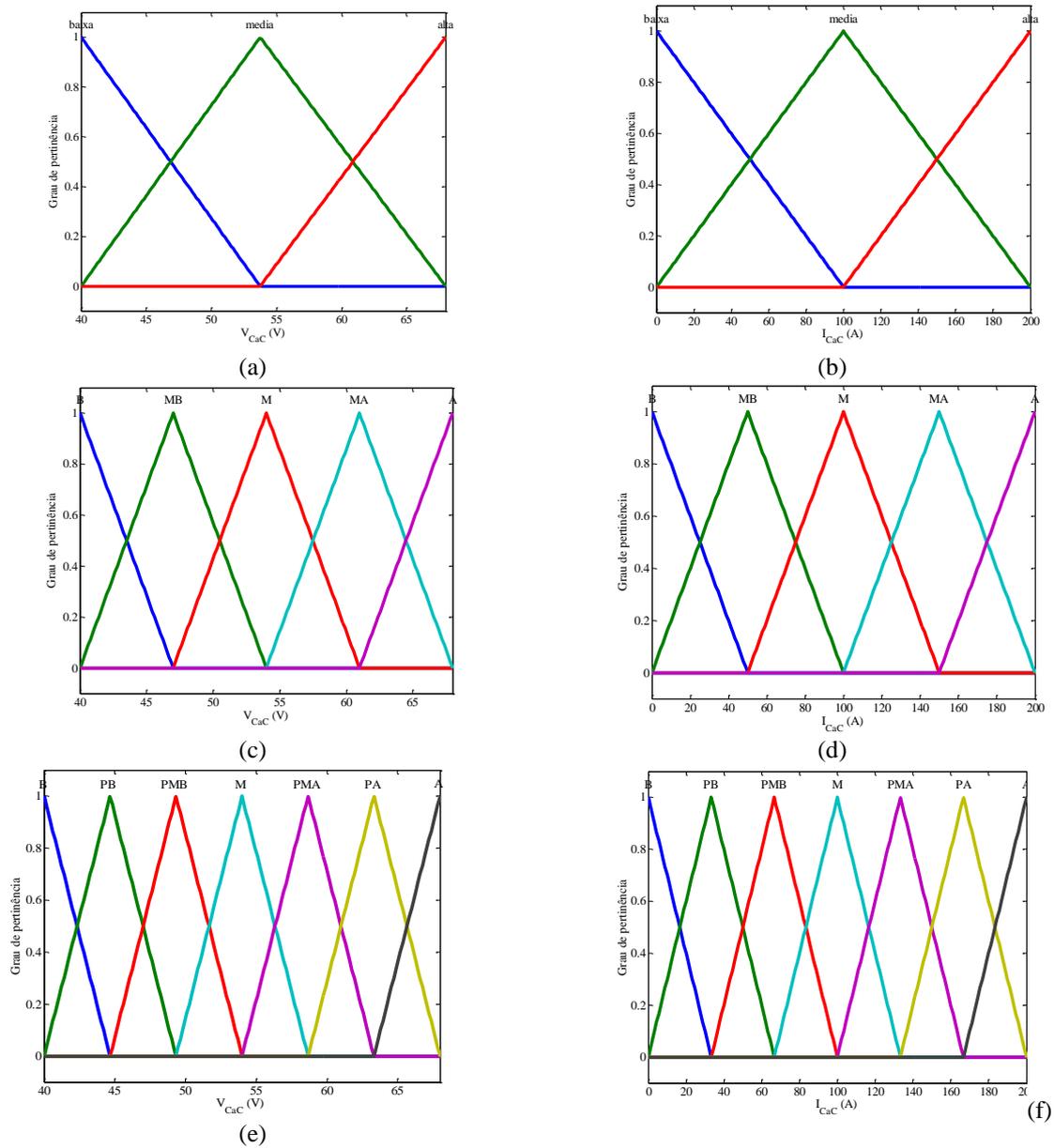
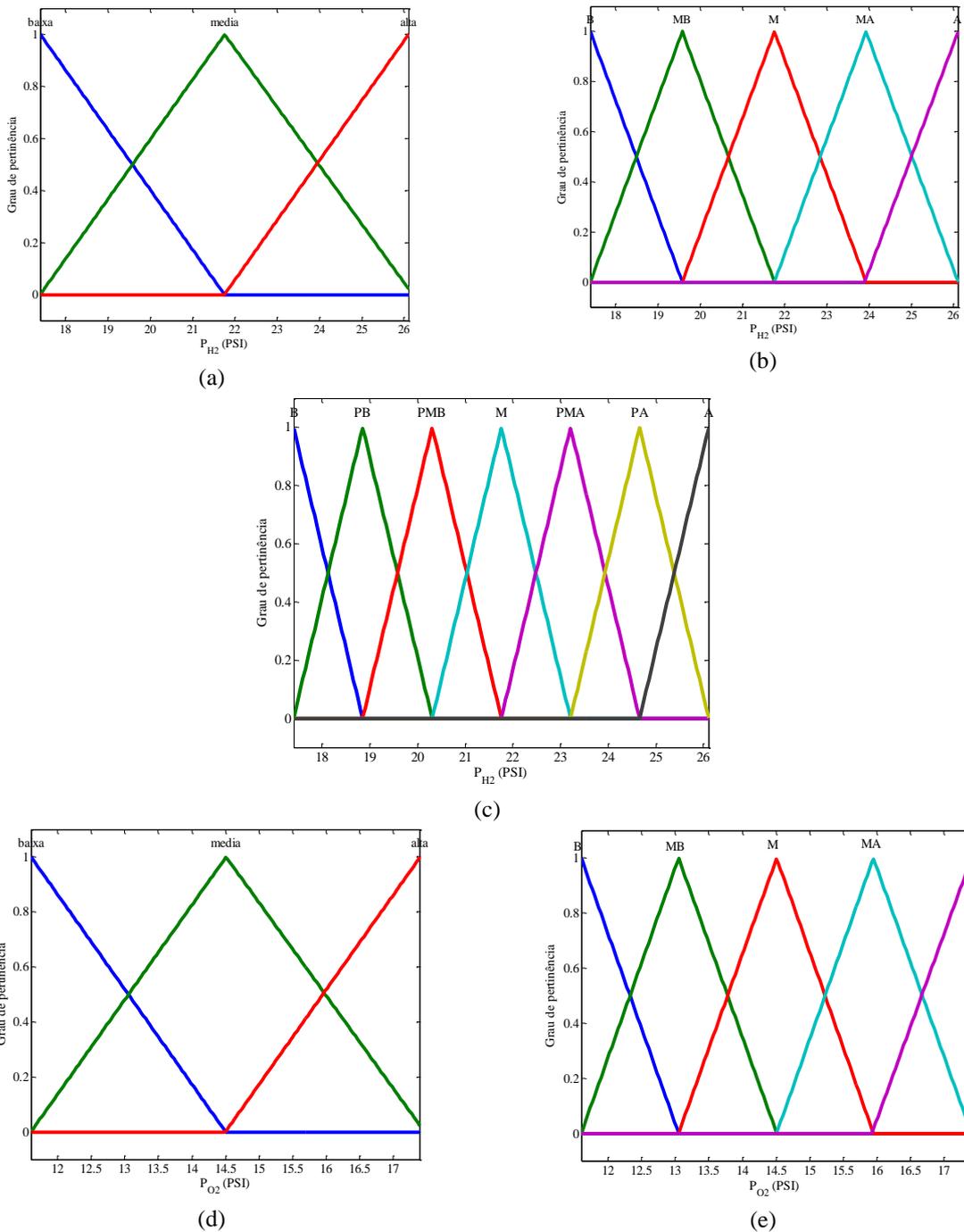


Figura 3.18 – Particionamento das variáveis de entrada dos controladores para 3 (a) e (b), 5 (c) e (d) e 7 (e) e (f) funções de pertinência

Na Figura 3.19 são mostradas as partições das saídas dos controladores que gerenciam  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  e temperatura. A partir destas funções de saída, são construídos os valores de ajuste dentro dos quais se definem as condições ótimas de operação da CaC 6 kW. Para outras CaCs pode-se adicionar, modificar ou redimensionar as funções de pertinência de forma a obter-se respostas mais eficientes ou customizadas conforme critérios do projetista.



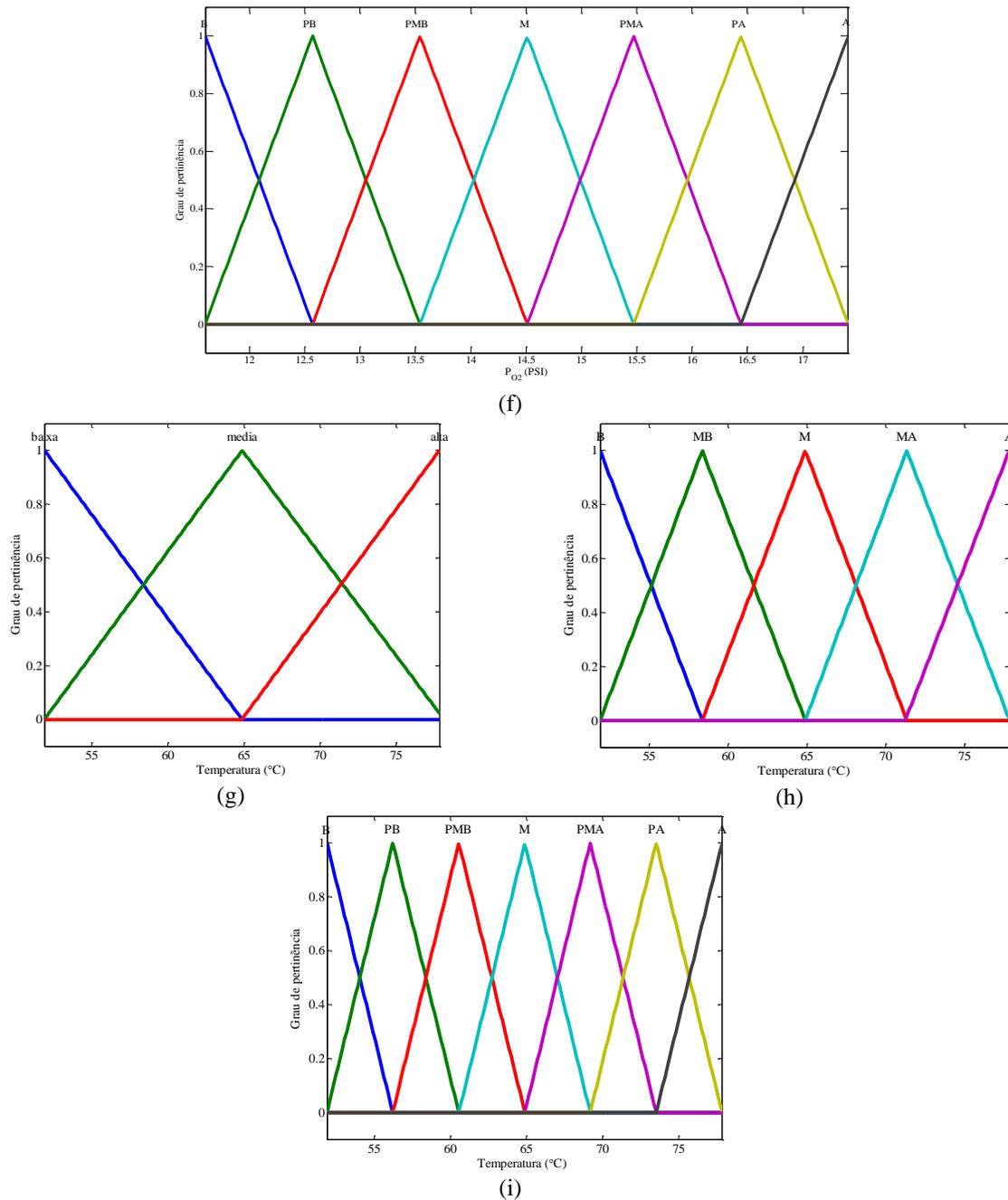


Figura 3.19 – Partições das variáveis de saída para  $P_{H_2}$  (a, b e c),  $P_{O_2}$  (d, e e f) e temperatura de operação (g, h e i) em 3, 5 e 7 funções de pertinência

A Figura 3.20 apresenta as estruturas para 49 regras em diagrama de blocos dos controladores de pressão dos reagentes e de temperatura. Com exceção dos números de regras estes diagramas são os mesmos para os demais conjuntos.

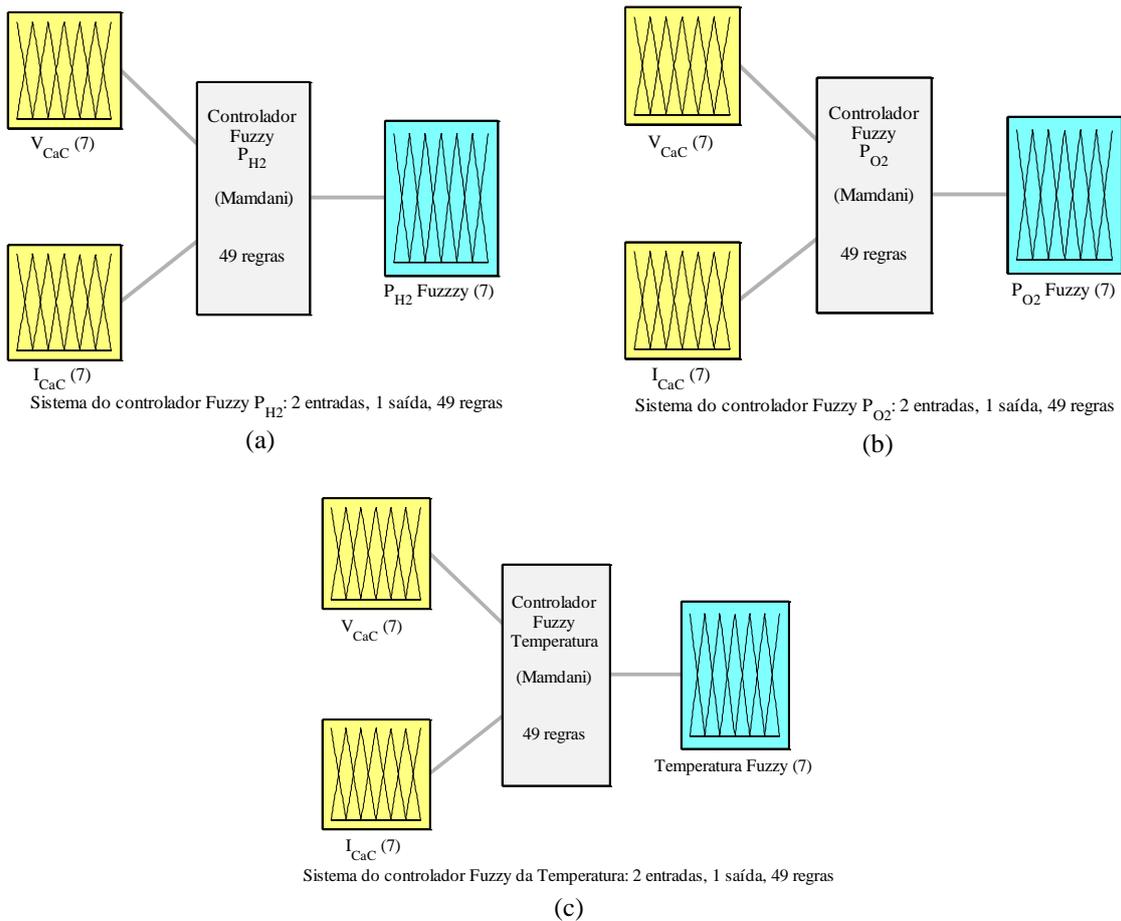


Figura 3.20 – Diagramas de blocos dos controladores fuzzy para (a)  $P_{H_2}$ , (b)  $P_{O_2}$  e (c) temperatura

Na primeira etapa de projeto, um protótipo do algoritmo de inferência fuzzy serve como suporte ao desenvolvimento inicial dos blocos de 9, 25 e 49 regras isolados. As Figuras 3.21 a 3.23 apresentam os gráficos de superfície de cada um dos controladores projetados para esta etapa para os blocos de 9, 25 e 49 regras, respectivamente. A Figura 3.21 mostra as regras criadas para o controle de  $P_{H_2}$ . Na Figura 3.22 têm-se as regras definidas para controlar  $P_{O_2}$  e na Figura 3.23 a definição do controlador de temperatura. Observa-se aí que, para todas as figuras, conforme aumenta-se o número de funções de pertinência e o número de regras no SIF a resolução dos controladores também é elevada – efeito esperado por definição da teoria fuzzy. Outro aspecto a ser considerado no desenvolvimento das regras para os controladores das Figuras 3.21 a 3.23 é a preferência pela otimização das variáveis de controle na região linear de operação do gerador. As figuras mostram um aspecto montanhoso, cujos “picos” são mais acentuados na região central de operação, coincidente com a área

de interesse (Figura 3.16 e Tabela 3.3). Fora das regiões de interesse, observa-se que as grandezas de saída têm seus valores reduzidos. Isso implica em duas consequências principais: redução do desperdício de reagentes além da área de operação desejável e limitação no gasto energético do equipamento auxiliar (compressores de ar, elementos de aquecimento, dentre outros).

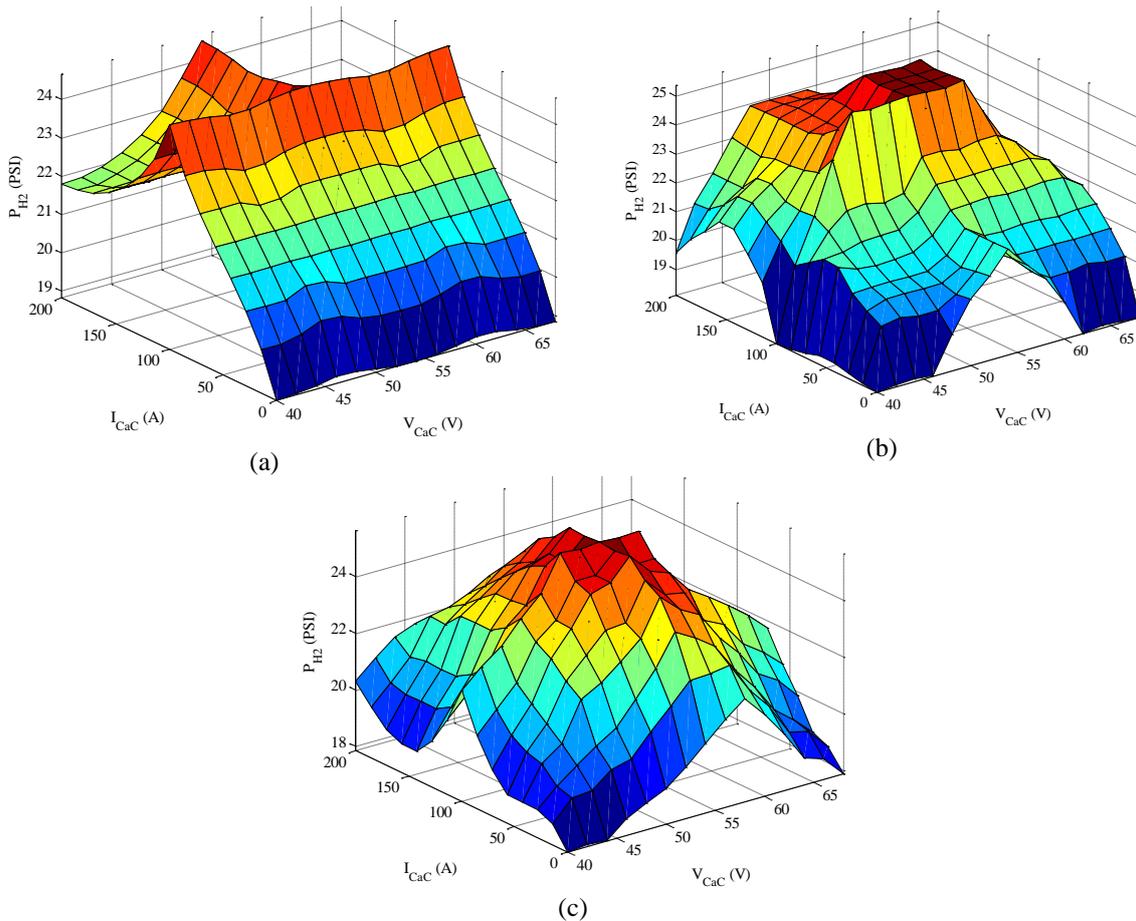
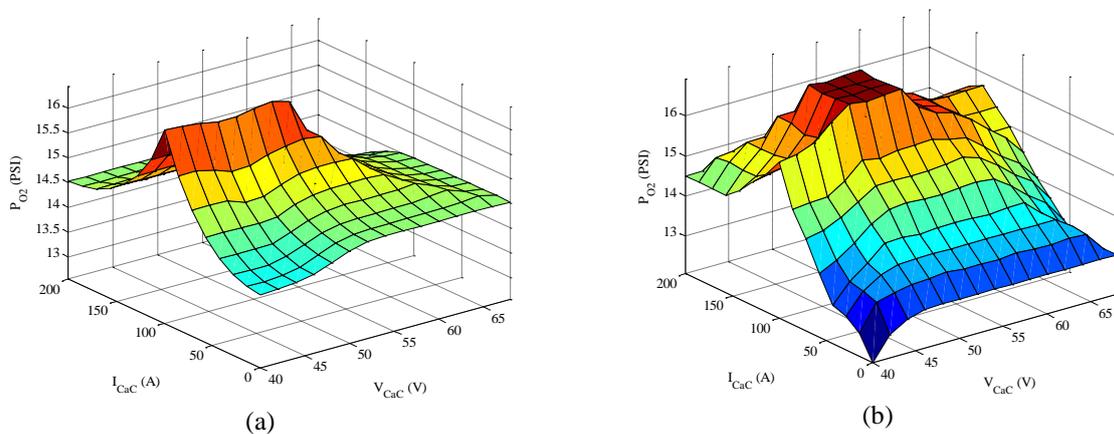


Figura 3.21 – Gráficos de superfície iniciais de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de  $P_{H_2}$



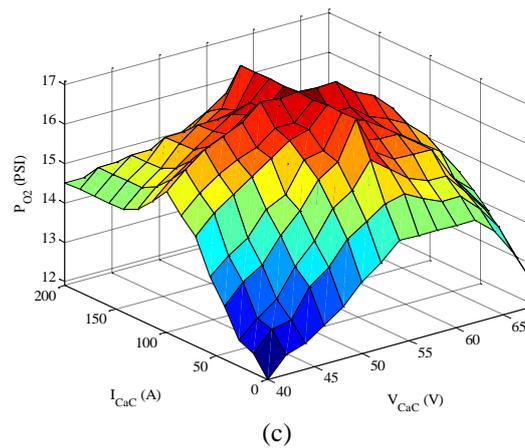
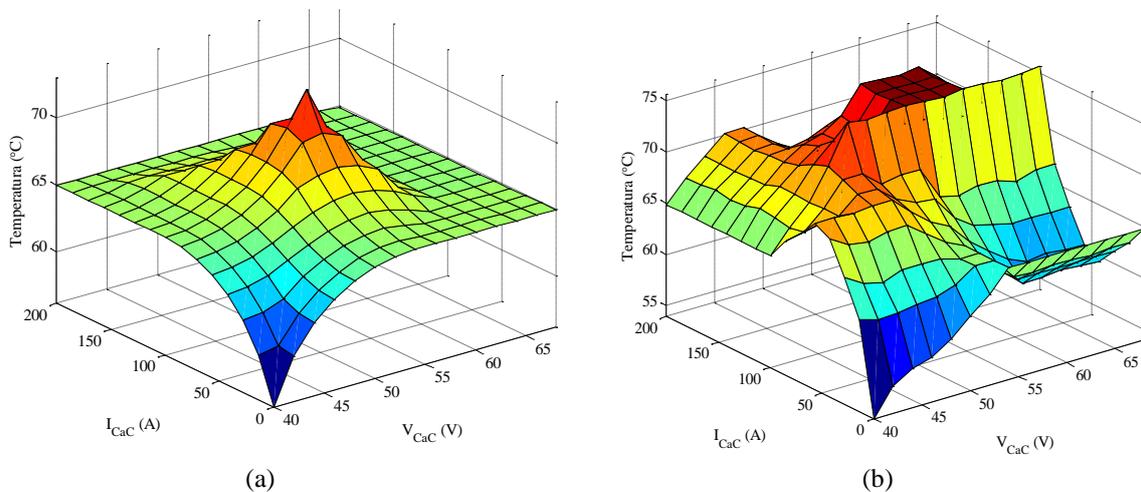


Figura 3.22 – Gráficos de superfície iniciais de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de  $P_{O_2}$

Para o controlador integrado, isto é, usando todos os SIF simultaneamente, as regras inicialmente construídas são redimensionadas (revistas). Estas revisões constituem a segunda etapa de aperfeiçoamento dos controladores. Durante as simulações, se os blocos originais são simplesmente agregados com sua concepção original, observa-se que os resultados atingidos apresentam oscilações indesejáveis com resposta errônea e em não conformidade com o esperado (Figura 3.14). Esta segunda revisão permite “harmonizar” o funcionamento dos compensadores fuzzy. Com isso, o diagrama da Figura 3.12 pode ser constituído e o controle multi-variável da CaC pode ser aplicado.



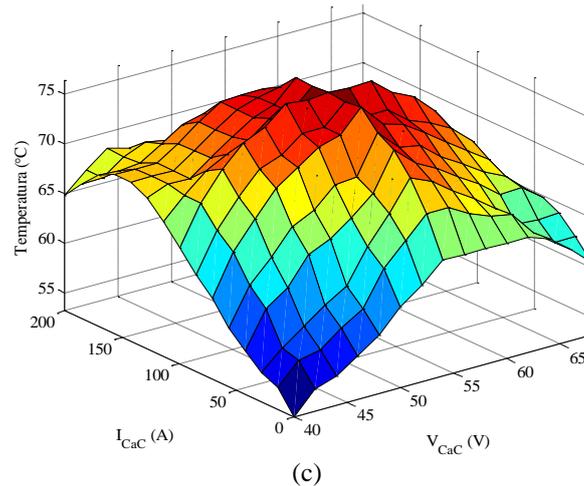


Figura 3.23 – Gráficos de superfície iniciais de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de temperatura

A Figura 3.24 mostra a implementação em Matlab/Simulink™ da Figura 3.12. Como é visto na Figura 3.24, os controladores fuzzy são realimentados pela tensão e pela corrente de saída da CaC, tal qual esboçado na Figura 3.12. Assim, para fins de controle, o diagnóstico das condições de operação do gerador se dá pela avaliação da característica  $VxI$ .

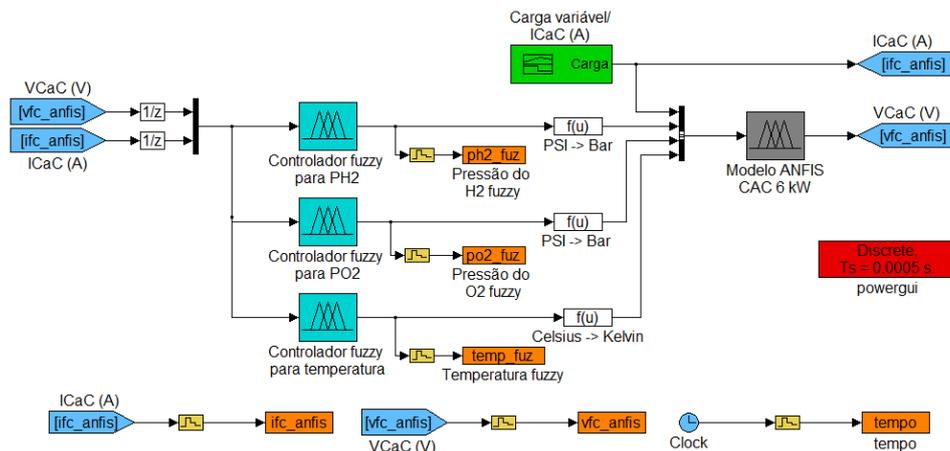


Figura 3.24 – Integração em Matlab/Simulink™ dos controladores fuzzy

Com a revisão dos blocos de regras, os gráficos de superfície são atualizados. As Figuras 3.25 a 3.27 mostram a nova configuração destes gráficos. Comparando-se as Figuras 3.21 e 3.25 observa-se que  $P_{H_2}$  tem novos pontos de ajuste, com prioridade para

a região central da curva característica. Esta variável apresenta agora um “ajuste fino” bem mais próximo de um valor desejável. Com isso, considera-se que  $H_2$  será fornecido de maneira mais adequada ao gerador, reduzindo o consumo com prioridade para a eficiência energética na região de interesse.

Para o  $O_2$  e a temperatura de operação (Figuras 3.22, 3.23, 3.26 e 3.27), as linhas de raciocínio quanto à determinação das máquinas de inferência fuzzy seguem os mesmos princípios. Entretanto, para estes dois últimos casos, duas considerações são feitas no momento de manutenção dos blocos de regras que são (a) elementos críticos no funcionamento da CaC devido a promoção das reações eletroquímicas e (b) a questão da manutenção do calor e a remoção do conteúdo de água da membrana que assumem proporções significativas sobre a eficiência.

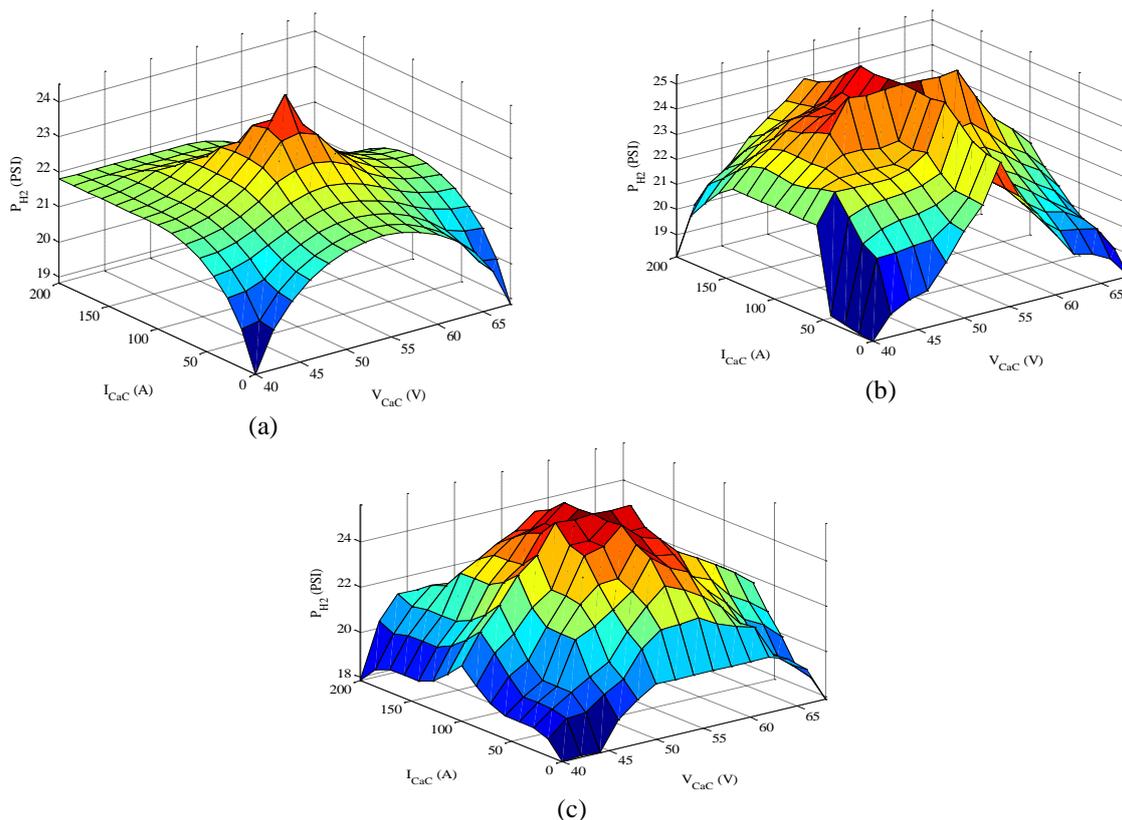


Figura 3.25 – Gráficos de superfície atualizados de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de  $P_{H_2}$

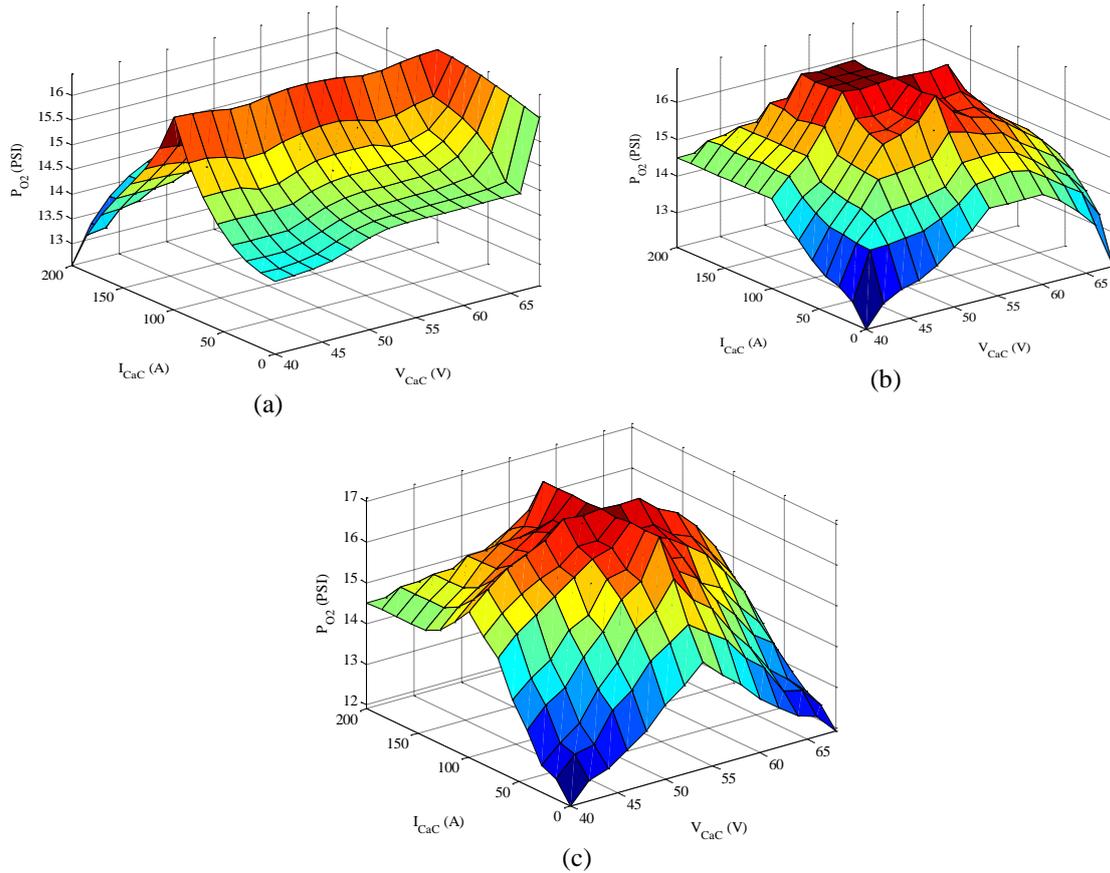


Figura 3.26 – Gráficos de superfície atualizados de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de  $P_{O_2}$

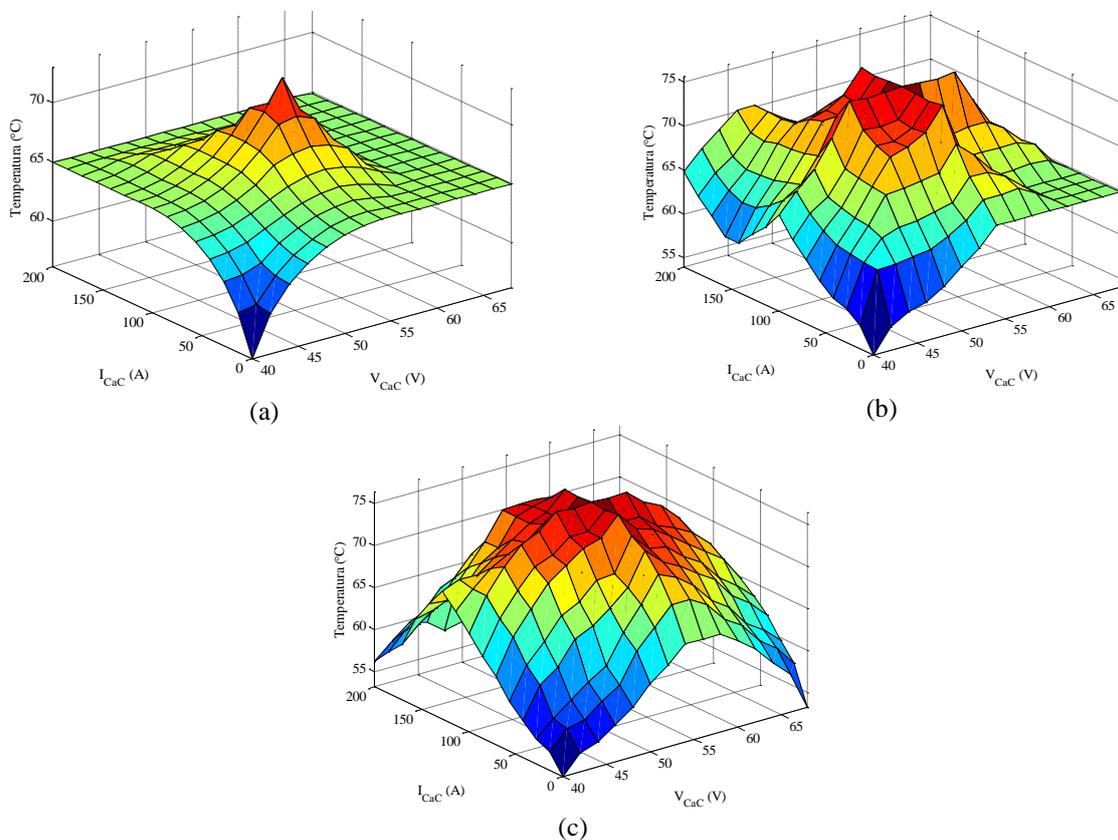


Figura 3.27 – Gráficos de superfície atualizados de (a) 9, (b) 25 e (c) 49 regras para controle de temperatura

A Figura 3.28 mostra os resultados dos controladores fuzzy aplicados à compensação da  $P_{H_2}$ . Conforme demonstrado para este gerador no Capítulo 2, as variações de  $H_2$  apresentam baixo impacto sobre a eficiência final da CaC. Isso torna os formatos das curvas muito próximos um do outro. Observa-se que, para valores muito baixos de  $P_{H_2}$ , a CaC não é capaz de atingir um nível mais alto de corrente de carga. Para a CaC de 6 kW, a região linear foi considerada dentro da faixa de 40 a 150 A (aproximadamente). Isso permite calcular, de forma aproximada, os ganhos de eficiência com o uso dos controladores fuzzy. Neste caso, por meio de uma média calculada dentro da região de interesse, observa-se que os ganhos de eficiência em relação a curva  $V \times I$  nominal são: de 9, 25 e 49 regras, respectivamente: 0,098 %, 0,10% e 0,22% para os controladores. As diferenças entre os ganhos para os controladores de 9 e 25 regras apresentam-se muito próximos. Por outro lado, o controlador de 49 regras permite obter um ganho mais elevado (0,22%). O SIF de 49 regras, além de favorecer um melhor “ajuste fino” dos consequentes, atinge valores muito mais próximos daqueles obtidos caso a CaC operasse com  $P_{H_2}$  20% acima do nominal, onde o ganho de eficiência na região linear chega a 0,38% – porém, com desperdício de reagente nas regiões de ativação e difusão. Na Figura 3.29, encontram-se os efeitos da variação da potência disponível pela CaC.

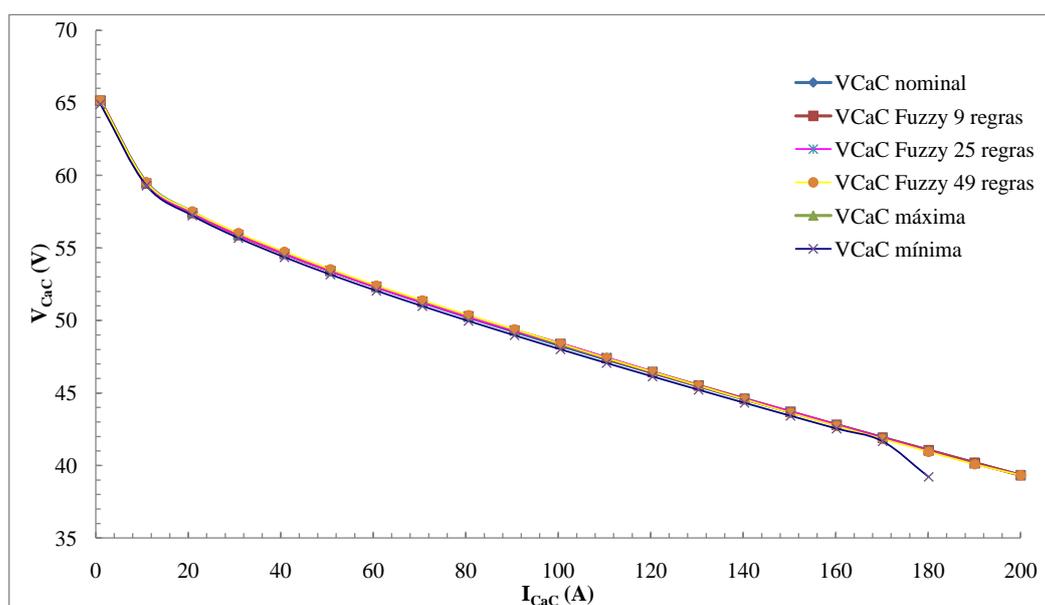


Figura 3.28 – Resposta dos controladores fuzzy para a compensação da  $P_{H_2}$

A Figura 3.30 mostra a atuação dos compensadores sobre os valores de  $P_{H_2}$ , em consequência da variação de carga. Esta Figura demonstra que o controlador de 49 regras permite atingir uma resolução muito maior no ajuste da variável de controle. Isso é bastante vantajoso uma vez que na faixa central  $P_{H_2}$  é muito mais próximo do seu valor máximo. Isto permite obter um ganho de eficiência mais elevado nesta região. Conforme os gráficos da Figura 3.30 indicam, para fora da região de interesse de operação da CaC, o  $H_2$  demandado é deliberadamente reduzido. Isso minimiza o desperdício de combustível nas regiões de ativação onde as perdas por difusão predominam.

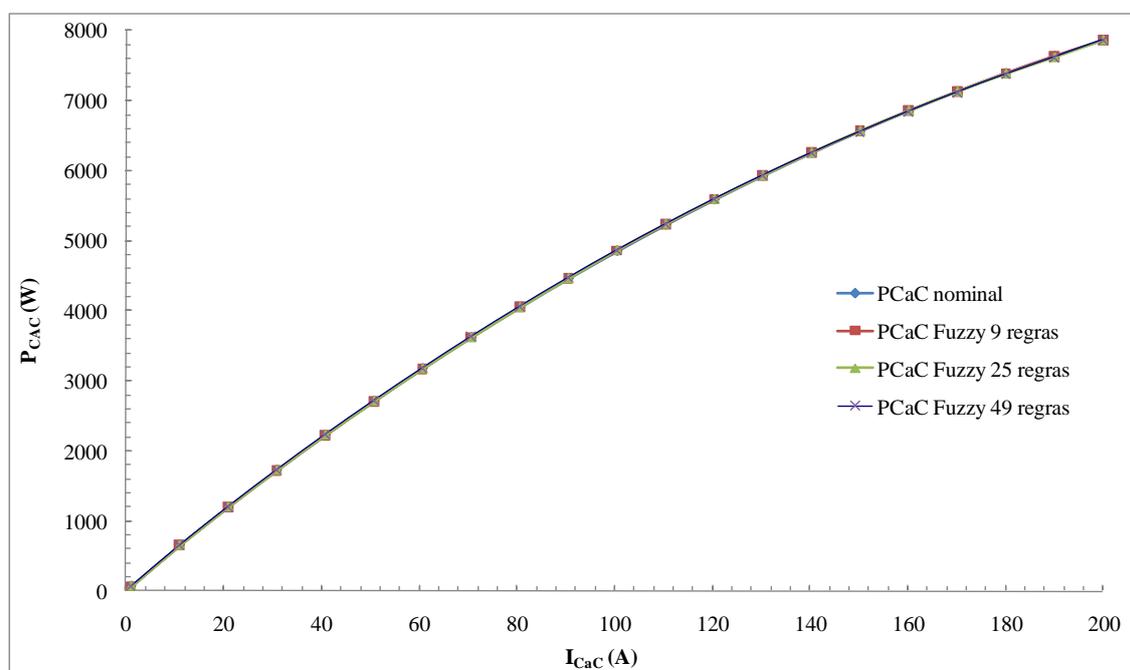


Figura 3.29 – Efeito da compensação da  $P_{H_2}$  sobre a curva de potência

A Figura 3.31 apresenta os testes com os efeitos da compensação do  $P_{O_2}$  sobre a característica  $VxI$ , com a variação da eficiência. Neste caso, os ganhos médios de eficiência calculados para os blocos de 9, 25 e 49 regras são, respectivamente: 0,227%, 0,393% e 0,562% (valores aproximados). O ganho obtido para o valor de  $P_{O_2}$  20% acima de seu valor nominal é de 0,879%. Novamente, observa-se que os efeitos do

compensador fuzzy de 49 regras resultam em um nível maior de eficiência, de forma similar ao que ocorre ao controle de  $P_{H_2}$ .

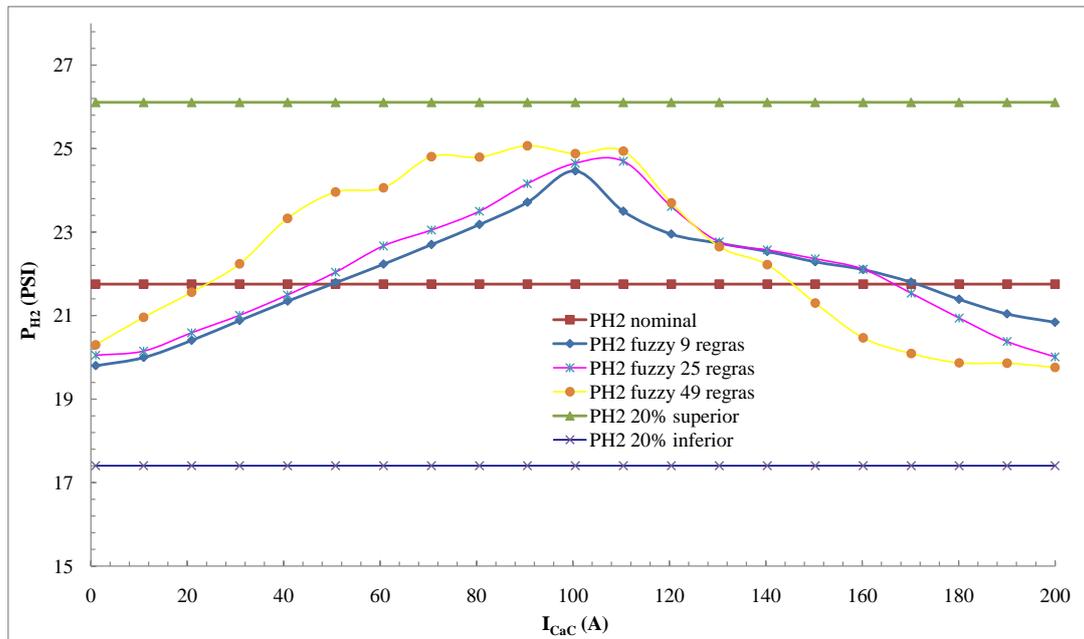


Figura 3.30 – Compensação fuzzy de  $P_{H_2}$

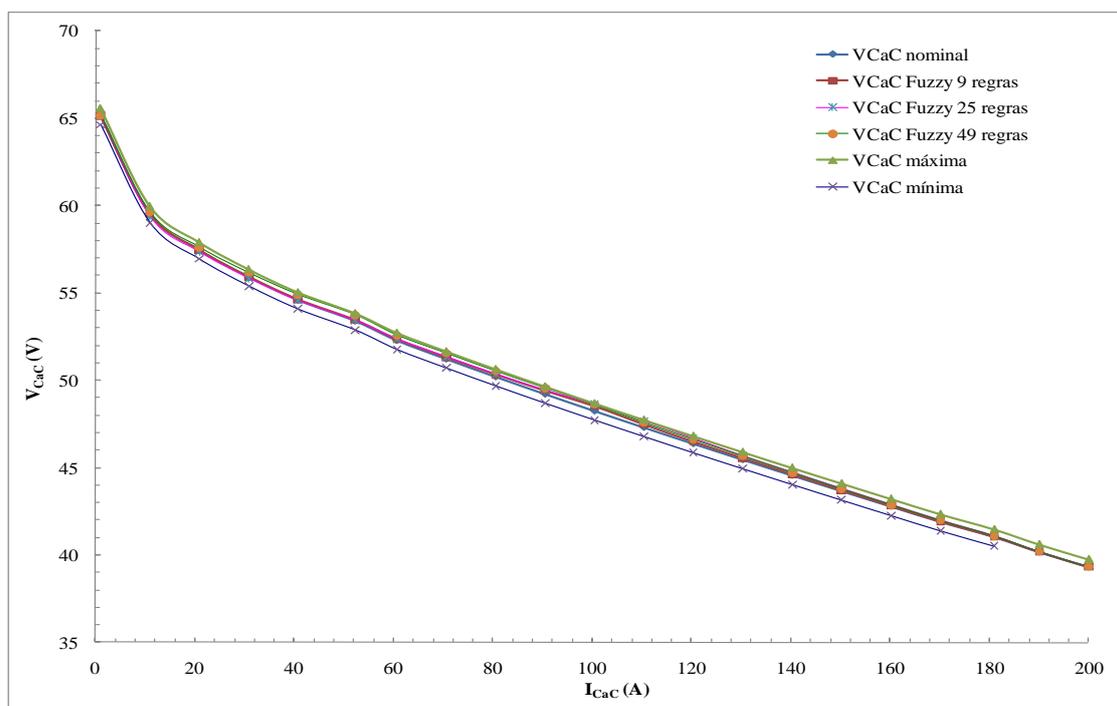


Figura 3.31 – Resposta dos controladores fuzzy para a compensação de  $P_{O_2}$

A Figura 3.32 fornece os gráficos para a variação da potência em função do gerenciamento de  $P_{O_2}$ . De forma análoga ao que ocorre para  $P_{H_2}$ , as variações na potência de saída são de difícil visualização gráfica, devido às baixas amplitudes dos ganhos obtidos.

A Figura 3.33 mostra a atuação dos compensadores sobre  $P_{O_2}$  em resposta à variação de carga. As observações feitas para o compensador de  $P_{H_2}$  em relação ao gerenciamento e estratégias adotadas para a programação dos blocos de inferência fuzzy são igualmente válidas. A prioridade para otimizar as regras encontra-se dentro da região linear de operação. Fora das regiões de interesse a quantidade suprida de reagente é reduzida. Se o  $P_{O_2}$  é mantido por meio de um compressor alimentado pela própria central da CaC, nas regiões onde as perdas de ativação e difusão são mais significativas, a potência drenada por este compressor pode ser controlada. Isso implica em não ser necessário manter-se o compressor operando em seu valor máximo o que minimiza as perdas neste periférico.

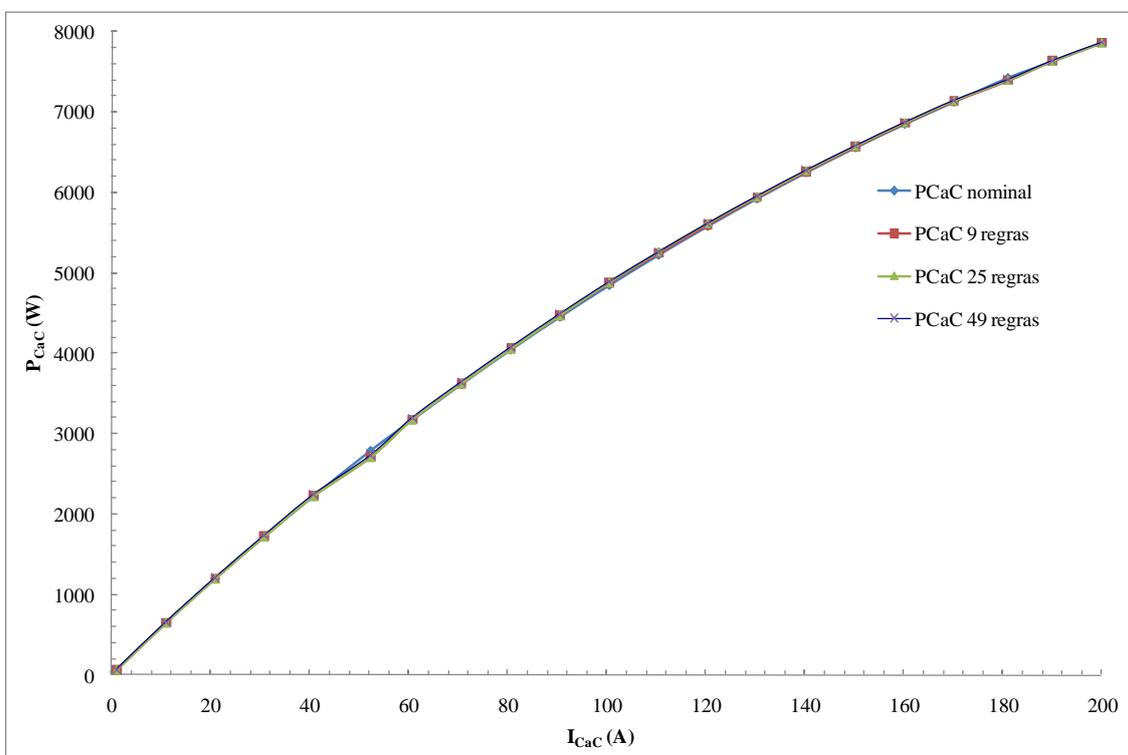


Figura 3.32 – Efeito da compensação de  $P_{O_2}$  sobre a curva de potência

A Figura 3.34 apresenta o controle da eficiência pelo gerenciamento da temperatura. Neste caso, os ganhos de eficiência, em relação à característica nominal desta CaC são 1,30%, 2,75% e 4,13%, aproximadamente, para os compensadores de 9, 25 e 49 regras, respectivamente. O ganho desta CaC para temperatura de operação 20% acima do nominal é de 5,26%. Na Figura 3.34, os ganhos são visualmente notáveis, uma vez que a temperatura é um dos fatores mais influentes sobre a eficiência.

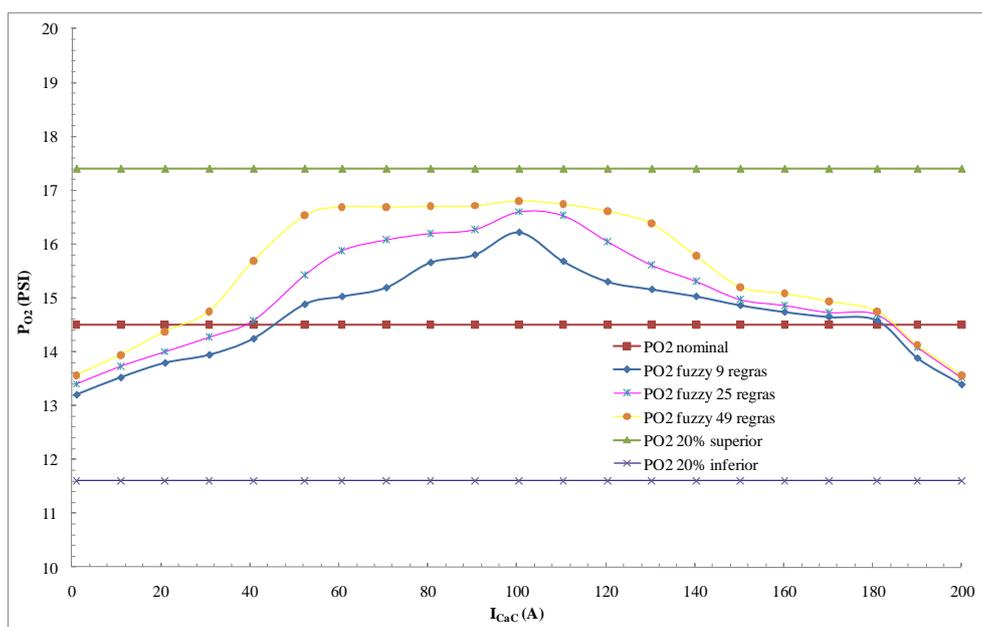


Figura 3.33 – Compensação fuzzy de  $P_{O_2}$

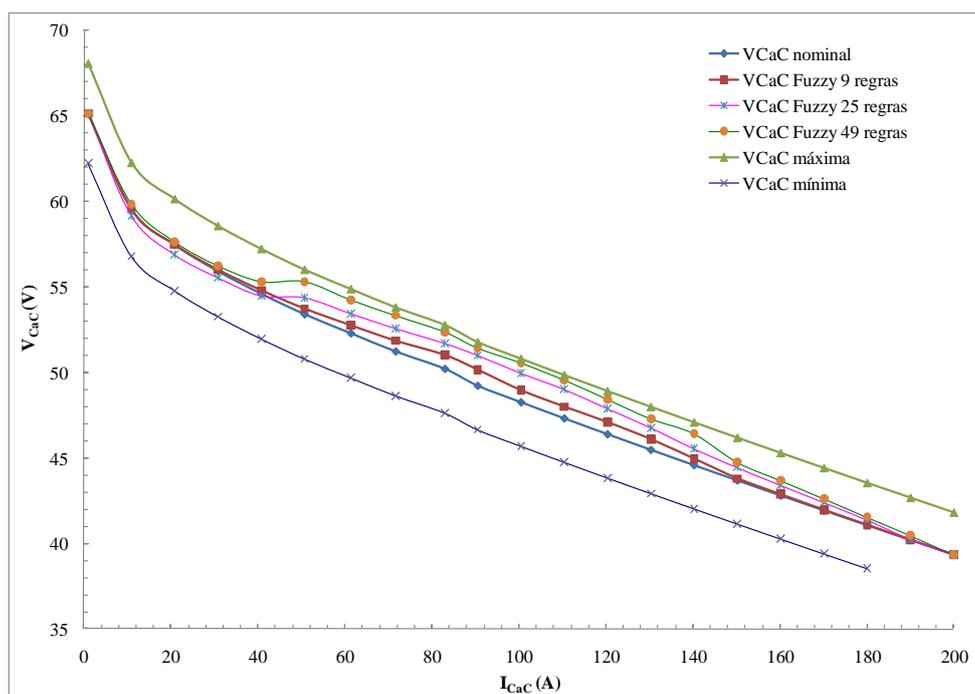


Figura 3.34 – Resposta dos controladores fuzzy para a compensação de temperatura

A Figura 3.35 mostra a resposta na curva de potência disponível, quando apenas a temperatura é controlada. No caso desta figura, na região linear, é possível atingir-se um pico de potência de 6,5 kW (em 140 A/46 V) quando usado o compensador fuzzy de 49 regras.

Caso nenhum compensador fosse aplicado para gerenciar a temperatura de operação, a potência disponível seria de 6,25 kW, para a mesma corrente (140 A/44,5 V, aproximadamente). Na região final da curva, a máxima potência disponível é de 7,8 kW (200 A/39,3 V). Se a temperatura for mantida em seu máximo valor durante todo o tempo de operação da CaC, a potência atingida em 140 A é de 6,6 kW (140 A/47 V). Porém, neste último caso, deve-se considerar que a CaC é permanentemente aquecida (ao longo de toda a sua característica  $V \times I$ ). Isto favorece as reações químicas que tomam lugar no interior da CaC. Por outro lado, o custo energético deste aquecimento permanente torna-se alto, principalmente, se um elemento de aquecimento adicional faz parte do serviço auxiliar da CaC.

Também, no caso de uma CaC real, o controle de umidade demanda um cuidado adicional no sentido de contrabalançar o efeito secante das altas temperaturas. Deve-se lembrar de que (neste momento) é utilizada uma CaC teórica, com umidificação ideal (100%).

A Figura 3.36 mostra a compensação de temperatura. Comparando-se os gráficos da Figura 3.34 com os da Figura 3.36 nota-se, de forma mais clara, que a dinâmica da eficiência de saída da CaC acompanha a dinâmica de variação da temperatura. Este é um efeito esperado, considerando-se as relações matemáticas existentes entre a temperatura e a tensão de saída apresentadas no Capítulo 2.

Como em todos os casos precedentes, observa-se que os SIFs com 49 regras apresentam os melhores resultados em termos de ganhos. Os blocos de 49 regras permitem níveis de potência mais elevados como, por exemplo, em 140 A, onde se tem 6,25 kW, 6,5 kW e 6,7 kW – para a condição nominal com o controle de 49 regras e para a operação máxima, respectivamente – conforme a Figura 3.38 mostra.

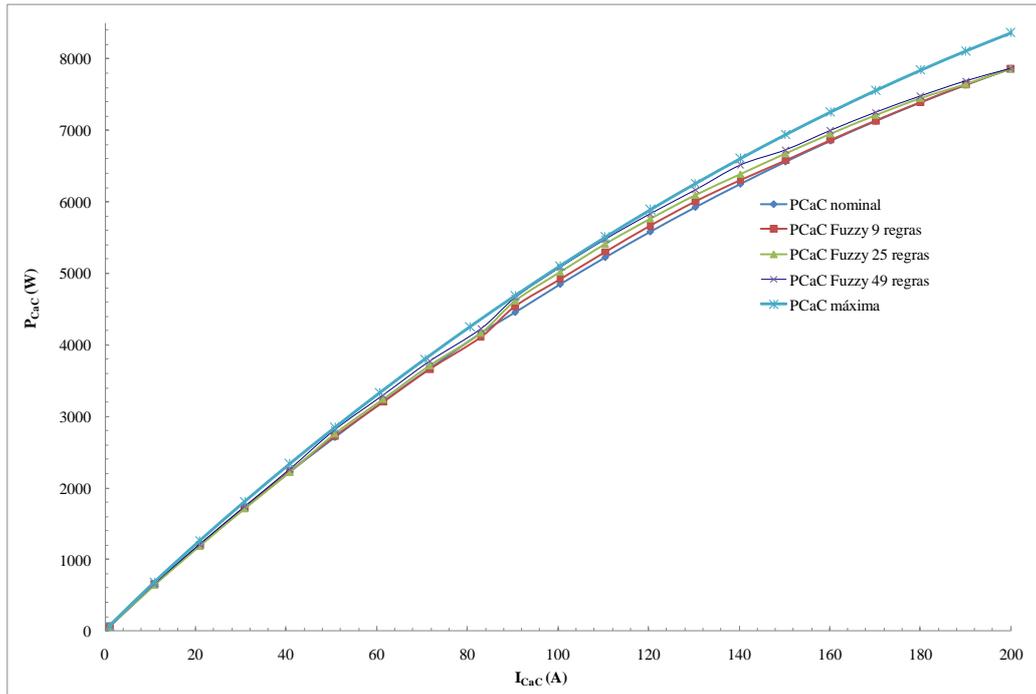


Figura 3.35 – Efeito da compensação da temperatura sobre a curva de potência

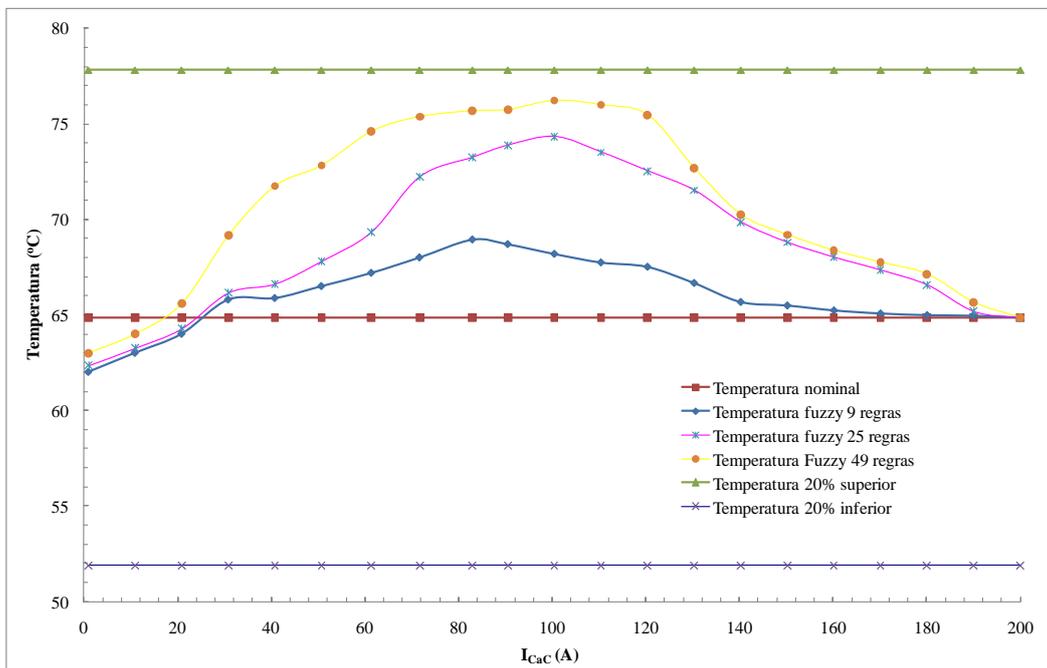


Figura 3.36 – Compensação fuzzy da temperatura de operação

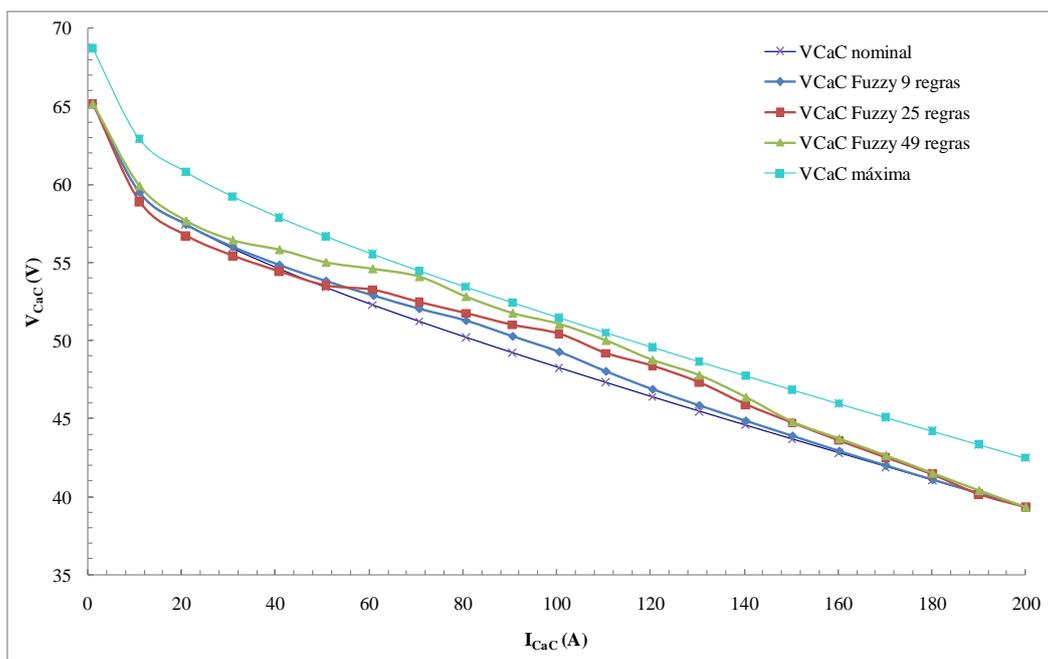


Figura 3.37 – Ganho de eficiência para os compensadores integrados

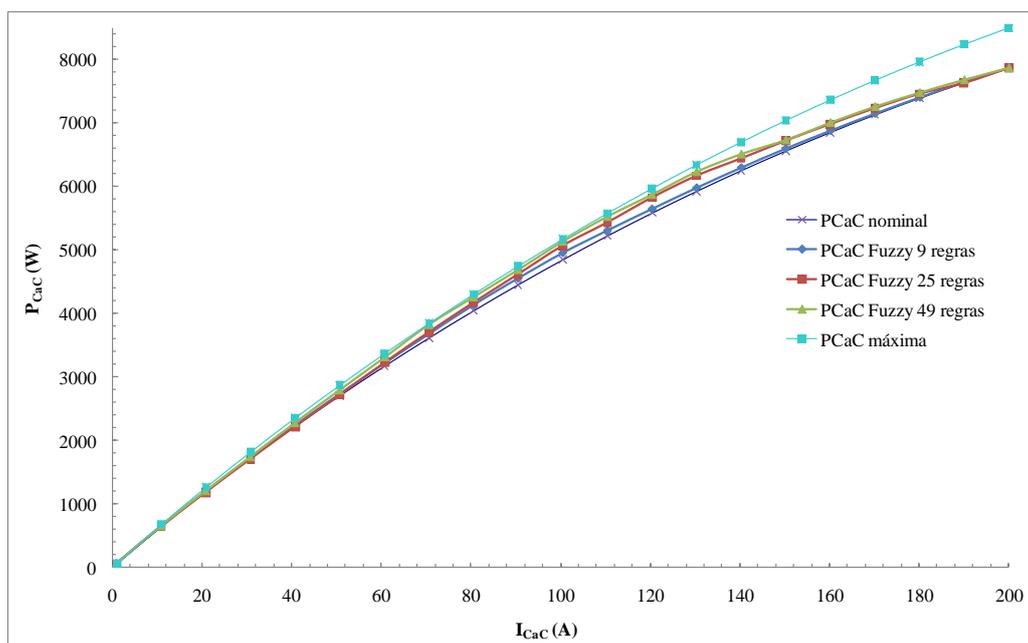


Figura 3.38 – Ganho de potência para os compensadores integrados

A Tabela 3.6 apresenta uma síntese dos resultados dos ganhos de eficiência relativos à característica nominal, obtidos pela aplicação de cada um dos compensadores e sua integração final. Cabe lembrar que estes ganhos são calculados aproximadamente para a pilha operando em sua região linear onde são ajustados os controladores fuzzy.

Tabela 3.6 – Comparativo dos ganhos de eficiência em porcentagem de  $V_{CaC}$ 

|                  |        | Controlador fuzzy |               |                 |               |
|------------------|--------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|
|                  |        | $P_{H_2}$ (%)     | $P_{O_2}$ (%) | Temperatura (%) | Integrado (%) |
| Número de regras | 9      | 0,098             | 0,227         | 1,30            | 1,40          |
|                  | 25     | 0,10              | 0,393         | 2,75            | 3,07          |
|                  | 49     | 0,22              | 0,562         | 4,13            | 5,11          |
|                  | Máximo | 0,38              | 0,879         | 5,26            | 6,55          |

Pela Tabela 3.6 pode-se concluir que a integração de múltiplos controladores fuzzy, conforme a Figura 3.15, permite a obtenção de níveis mais elevados de eficiência, sem levar a CaC a operar fora de sua região linear. Além disso, nesse caso, os conjuntos de inferência com 49 regras se mostram os mais favoráveis para dimensionamento dos compensadores fuzzy. Na Tabela 3.6 o item “máximo” refere-se ao ganho de eficiência obtido no caso de estabilização da variável de controle acima de seu valor nominal. Apesar do ganho ser maior, não há compensação da grandeza. Portanto, manter as variáveis em seus valores máximos incorre em um maior desperdício de reagentes e de energia.

Como considerações principais deste Capítulo, pode-se inferir que a hipótese para aumentar a eficiência da CaC, operando dentro de sua região linear é, teoricamente, verdadeira. Esta conclusão é corroborada pelos resultados simulados obtidos até aqui. Outra consideração adicional é que a eficiência da CaC pode ser manipulada em torno de seus valores nominais, tanto pela atuação isolada sobre cada variável de controle quanto pela ação integrada. Portanto, as formas aproximadas das curvas características  $VxI$  hipotéticas das Figuras 3.13 e 3.14 são passíveis de ser obtidas em simuladores.

Outro fato comprovado é de que, a aplicação de controladores fuzzy, tal qual mostram as Figuras 3.15 e 3.16 permite o controle da operação da CaC dentro de uma área pré-definida. Além disso, a estrutura de controle apresentada na Figura 3.12 e utilizada como referência para a construção dos modelos em Simulink<sup>TM</sup> habilitando o projetista a definir heurísticamente os controladores a serem aplicados.

Finalmente, o uso de um modelo neuro-fuzzy para modelar a CaC e projetar os compensadores simplifica consideravelmente os testes em simuladores. Entretanto, esta técnica requer do usuário duas atividades adicionais: o reconhecimento comportamental

do gerador frente às variações das grandezas de controle (conhecimento especialista) e a aquisição de dados significativos que permitam a configuração, treinamento e teste da rede neural que emula o gerador. Por outro lado, desde que as variáveis coletadas representem de forma adequada o comportamento da saída, podem-se utilizar mais grandezas do modelo, permitindo que o mesmo possua maior grau de precisão em sua resposta. Por exemplo, pode-se incluir a influência da umidade do ar de entrada como variável adicional. A umidade relativa do ar de entrada é um importante fator de impacto sobre a eficiência. Como visto na literatura, a maioria dos modelos assume que a membrana está sempre idealmente hidratada, o que não corresponde à realidade, tendo em vista os efeitos do fluxo do ar, das altas temperaturas e outros.

Os controladores propostos aqui têm suas estruturas fixas e simplificadas, constituídos de funções triangulares de pertinência simples. Apesar da Lógica fuzzy apresentar uma gama muito maior de alternativas, supõe-se que a forma aplicada aqui é suficiente para corroborar a hipótese desta tese. Porém, estudos com geradores práticos devem ser realizados de forma a validar na prática as afirmações teóricas aqui feitas.

### **3.4 Resumo do Capítulo**

Este Capítulo faz uma revisão bibliográfica sobre o uso potencial de algoritmos inteligentes para modelagem e controle de CaCs. Observa-se que o uso da estrutura ANFIS pode representar a característica  $VxI$  de forma bastante satisfatória, com baixa margem de erro. Além disso, o modelo ANFIS pode englobar vários parâmetros diferentes, bastando treinar a rede neural com as informações comportamentais características do gerador.

No sentido de obter uma otimização energética da central geradora, este capítulo propõe uma estratégia de gerenciamento baseada em controlador lógico fuzzy. A escolha do controlador fuzzy é feita em função desta fornecer uma metodologia sistematizada para o desenvolvimento de uma estratégia de gerenciamento energético baseado em regras e premissas do tipo *SE...ENTÃO*. Observa-se que na literatura, em geral, as estratégias de controle propostas visam apenas a manutenção das condições operacionais da pilha. Assim, nestes trabalhos, raramente são abordadas as vantagens de

se manter a CaC em pontos otimizados de operação durante o regime permanente. Esta customização da eficiência é apresentada como hipótese central desta tese.

Para construir-se blocos de regras adequados ao controlador fuzzy como proposto nesta tese, outros exames mais detalhados de um gerador real devem ser conduzidos. Apesar das CaCs do tipo PEM poderem ser aproximadas de forma geral, cada caso deve ser avaliado isoladamente para a construção do controle mais adequado. Isto se dá devido às características pertinentes a cada gerador, tais como a geometria interna dos canais e da membrana, diâmetro dos dutos de alimentação de gás e ar, formas de refrigeração, dentre outros. Por este motivo, ressalta-se que o uso de algoritmos fuzzy é mais apropriado para esta aplicação, pois permite traduzir os fenômenos observados em variáveis linguísticas capazes de reproduzir de forma adequada o pensamento humano do operador.

As hipóteses apresentadas neste capítulo são validadas por meio de simulações, onde se comprova que podem ser aplicados blocos fuzzy em paralelo para administrar a eficiência da CaC. Como visto neste capítulo, um número de regras mais elevado é mais adequado para esta tarefa. No caso apresentado aqui, blocos com 49 regras podem permitir ganhos acima de 5% em relação aos valores nominais da CaC teórica.

# RESULTADOS

## EXPERIMENTAIS COM

### A CÉLULA A

### COMBUSTÍVEL

---

#### 4.1 Introdução

Como resultado da montagem do protótipo (Anexo H), procede-se à verificação dos efeitos das variações das principais grandezas estudadas sobre a eficiência da CaC real e demais ensaios experimentais.

Os ensaios deste capítulo visam o estudo e a coleta de dados referentes às relações entre as grandezas que afetam a eficiência da pilha. Para tanto, são avaliadas as influências sobre a curva característica  $V \times I$  com relação à variação da pressão do hidrogênio ( $P_{H_2}$ ), do fluxo ( $Q_{ar}$ ), da temperatura ( $T_{ent}$ ), e da umidade relativa ( $UR$ ) do ar de entrada. São analisadas também as características de  $P_{H_2} \times I$ , de  $T_{saída} \times I$ , de potência e de consumo como forma de avaliar os resultados destas grandezas sobre a eficiência da CaC.

#### 4.2 Avaliação comportamental da CaC

Antes de proceder a análise comportamental da CaC nos experimentos utilizados nesta tese, é necessário considerar que o manual do operador do gerador SR-12 não

especifica as condições de operação nominal do equipamento. Assim, a Tabela 4.1 apresenta as principais condições de referência estabelecidas por meio de experimentação para a avaliação dos dados obtidos.

Tabela 4.1 – Valores de referência assumidos para a CaC experimental

| Grandeza                 | Valores de referência (aproximados) |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Tensão – $V_{CaC}$ (V)   | 1,80~2,00                           |
| Corrente – $I_{CaC}$ (A) | 2,0~4,5                             |
| Potência – $P_{CaC}$ (W) | 4,20~8,10                           |
| $P_{H_2}$ (PSI)          | 7,0                                 |
| $T_{ent}$ (°C)           | ~25                                 |
| $Q_{ar}$ (L/min)         | ~540                                |
| $UR$ (%)                 | ~70                                 |

O gerador SR-12 é projetado para operar, conforme o manual, na faixa de 6,5~7,5 PSI e de 5~35°C. Os conjuntos de dados para análise comportamental são tomados por meio de variações de carga de 0,5 A a cada 20 s, conforme indicação do manual do fabricante. Isto permite um tempo médio de estabilização da tensão de saída da CaC no ponto de corrente de carga desejado.

#### 4.2.1 Variação da pressão do hidrogênio ( $P_{H_2}$ )

Como teste inicial, é avaliado o comportamento da célula sob as condições de variação de  $P_{H_2}$ . Os resultados são apresentados na Figura 4.1. Nesta situação, os parâmetros de ensaio e as respectivas margens de erro são apresentados na Tabela 4.2. Para estes testes,  $UR$  é mantida na faixa de, aproximadamente, 70 % sendo considerada constante. A temperatura  $T_{ent}$  é estabilizada em 25 °C e  $Q_{ar}$  em 540 L/min.

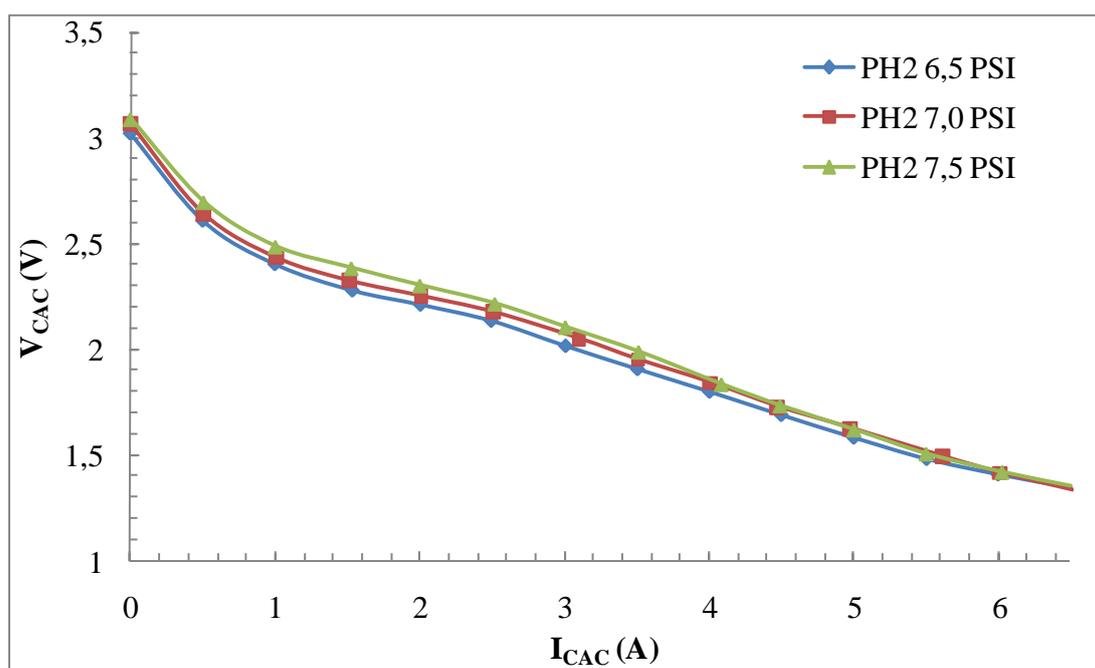
Nos gráficos da Figura 4.1, observa-se que o aumento de  $P_{H_2}$ , causa um acréscimo de tensão na pilha (diferença de tensão entre os ensaios), o que corrobora as observações teóricas dos Capítulos 2 e 3.

Tabela 4.2 – Valores adotados para a variação de  $P_{H_2}$ 

|                  | Ensaio P <sub>1</sub> | Ensaio P <sub>2</sub> | Ensaio P <sub>3</sub> |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $T_{ent}$ (°C)   | 25 ±3°C               | 25 ±3°C               | 25 ±3°C               |
| $UR_{ent}$ (%)   | 70 ±3%                | 70 ±3%                | 70 ±3%                |
| $P_{H_2}$ (PSI)  | 6,5 ±0,2 PSI          | 7,0 ±0,2 PSI          | 7,5 ±0,2 PSI          |
| $Q_{ar}$ (L/min) | 540 ±10 L/min         | 540 ±10 L/min         | 540 ±10 L/min         |

Os ganhos de tensão médios observados, dentro da região mais linear da curva desta CaC, na faixa de 2,0~4,0 A, em termos de porcentagem são:

- 1,95% quando  $P_{H_2}$  aumenta de 6,5 para 7,0 PSI e
- 1,84% quando  $P_{H_2}$  aumenta de 7,0 para 6,5 PSI.

Figura 4.1 – Curva característica para variação de  $P_{H_2}$ 

É observado que para a região mais extrema das curvas, os níveis de tensão são praticamente iguais, chegando a ocorrer uma inversão dos seus valores pelo cruzamento dos gráficos. Esta equivalência de valores se deve a influência das demais variáveis sobre a eficiência da CaC. Na região das perdas por concentração, a elevação da temperatura interna devido ao aumento de corrente provoca a redução na umidade local

da membrana, alterando a condutividade iônica do eletrólito. Além disso, o  $Q_{ar}$  de entrada constante, com  $UR$  mantida em 70%, também exerce influência sobre o conteúdo de água da membrana, bem como a indisponibilidade de ar ( $O_2$ ) suficiente para promover as reações eletroquímicas. Assim, em parte, este fenômeno deve-se à concentração dos reagentes sobre a membrana. Outro efeito concomitante a estes é a redução de  $P_{H_2}$  na linha com o aumento da demanda de carga.

Com os ensaios de variação de  $P_{H_2}$ , mantendo-se as demais variáveis estáveis, assume-se que aumentos significativos acima da pressão nominal não causam grandes impactos sobre o rendimento total da pilha. Portanto, do ponto de vista da eficiência elétrica, aumentos excessivos na pressão nominal para o qual foi projetada a CaC, não incorreriam necessariamente em ganhos mais altos de eficiência (maiores que 2%, por exemplo) sem que as demais grandezas também tenham seus valores compensados. Pelo contrário, um aumento demasiado de  $P_{H_2}$ , pode resultar em desperdício, pelo fato de o gerador não realizar totalmente a conversão energética do volume excedido de gás.

#### 4.2.2 Variação da temperatura

O próximo teste é relacionado ao impacto da variação da temperatura da CaC (com as demais grandezas estabilizadas). Para estes experimentos, a  $P_{H_2}$  é mantida aproximadamente constante, em torno de 7 PSI. Nestes ensaios, a referência para o cômputo dos ganhos de eficiência é o ensaio da temperatura  $T_2$ , com a temperatura na faixa de 25°C (temperatura selecionada como nominal). Os valores de ensaio são dados pela Tabela 4.3. A temperatura de entrada  $T_{ent}$  de 40°C é definida como limítrofe em virtude das condições nominais especificadas pelo fabricante e da capacidade térmica dos componentes do protótipo.

A Figura 4.2 apresenta as variações na eficiência para os diferentes níveis de temperatura. Para a faixa de interesse (região linear) da curva, entre 2 e 4 A, os ganhos médios de eficiência em relação à curva com temperatura de 25°C nestes ensaios são, aproximadamente, os seguintes:

- 6,8% quando  $T_{ent}$  varia de 19 para 25°C ( $\Delta T = 24\%$ ),
- 1,4% quando  $T_{ent}$  varia de 25 para 32°C ( $\Delta T = 28\%$ ) e
- 4% quando  $T_{ent}$  varia de 32 para 40°C ( $\Delta T = 60\%$ ).

Tabela 4.3 – Valores adotados para os ensaios de variação de  $T_{ent}$ 

|                  | Ensaio T <sub>1</sub> | Ensaio T <sub>2</sub> | Ensaio T <sub>3</sub> | Ensaio T <sub>4</sub> |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $T_{ent}$ (°C)   | 19 ±3 °C              | 25 ±3 °C              | 32 ±3 °C              | 40 ±3 °C              |
| $UR_{ent}$ (%)   | 70 ±3%                | 70 ±3%                | 70 ±3%                | 70 ±3%                |
| $P_{H_2}$ (PSI)  | 7,0 ±0,2 PSI          | 7,0 ±0,2 PSI          | 7,0 ±0,2 PSI          | 7,0 ±0,2 PSI          |
| $Q_{ar}$ (L/min) | 540 ±10L/min          | 540 ±10 L/min         | 540 ±10 L/min         | 540 ±10 L/min         |

Os ganhos de tensão, relativos ao valor de referência, encontram-se abaixo dos valores teoricamente esperados, conforme se eleva a temperatura de operação, mantendo-se as demais variáveis fixas. O baixo ganho deve-se, sobretudo, ao ressecamento da membrana pelo aquecimento do ar de entrada. Apesar da característica construtiva autoumidificada da membrana, esta não é capaz de compensar adequadamente a perda de água decorrente da temperatura excessiva. Mesmo mantendo-se o ar de entrada com umidificação estável (70%), localmente a membrana sofre os efeitos da desidratação e da redução de condutividade iônica, prejudicando as reações internas. Portanto, o gerenciamento do conteúdo de água da membrana demanda um recurso adicional para compensar a umidade de forma a garantir a obtenção de maiores níveis de eficiência. Em parte, o fluxo de ar também acaba por promover uma segunda ação secante sobreposta à da temperatura, tornando o controle da eficiência ainda mais complexo.

Ainda, em relação à eficiência da CaC quando sujeita a variações de temperatura, é possível observar que, para temperaturas baixas, as perdas na região de ativação são menores. Por outro lado, a temperatura de operação mais elevada permite ao gerador atingir um valor de potência maior, principalmente na região final de sua curva de operação. Na Figura 4.2, devido à ação secante, para a temperatura de 40°C, o valor final de tensão é menor que para 32°C, o que deve ser considerado para fins de projeto, no caso de a região de interesse ser especialmente o trecho final da curva.

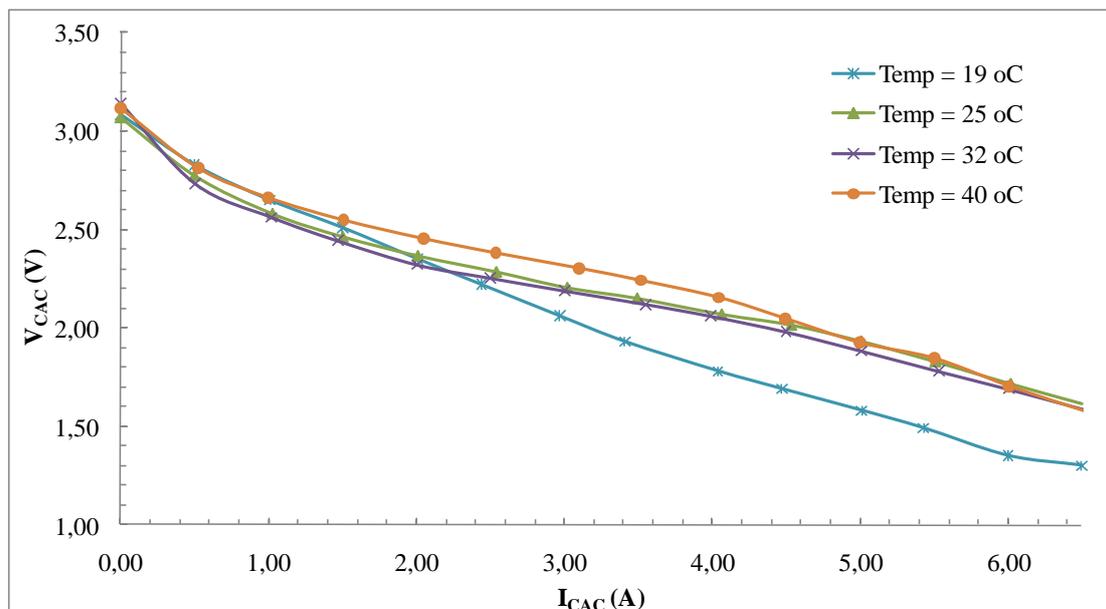


Figura 4.2 – Curva característica para variação da temperatura da CaC

Uma vantagem adicional observada com a temperatura maior é a possibilidade de uma inicialização “mais rápida” (*fast start-up*), reduzindo o tempo necessário para vencer a região onde as perdas de ativação são mais pronunciadas. Porém, isso sugere a necessidade de um elemento aquecedor inicial, com o intuito de reduzir o tempo de inicialização da pilha. Este recurso deve ser avaliado conforme o tipo de aplicação do gerador a ser usado, uma vez que isso acarreta a inclusão de um dispositivo externo adicional de pré-aquecimento conectado ao gerador, demandando mais energia e maior complexidade no equipamento.

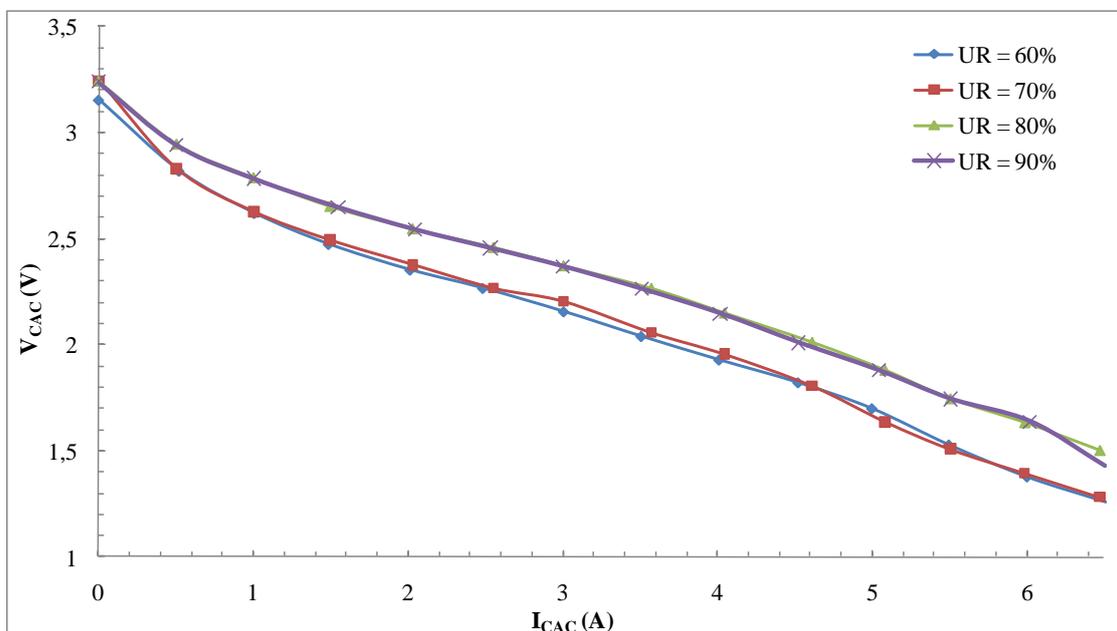
#### 4.2.3 Variação da umidade relativa ( $UR$ )

A Tabela 4.4 apresenta as condições de testes para os ensaios de variação da umidade relativa ( $UR$ ). Os resultados dos testes apresentados na Figura 4.3 referem-se aos resultados da alteração nos níveis de umidade da CaC, dentro das condições especificadas na Tabela 4.4. Observa-se que a umidade maior tende a manter a eficiência menor na região onde as perdas por ativação são mais relevantes. Isso pode ser explicado pelo fato de a tensão de ativação ser dependente do conteúdo de água na membrana, influenciado pela pressão do vapor de água saturado. Com o aumento da

pressão do vapor de água, ocorre uma elevação na pressão parcial do  $H_2$  nesta região elevando as perdas por ativação e reduzindo a tensão de saída da pilha. Uma vez que as perdas por ativação estabilizam a partir de determinada faixa de potência, sua influência tende a se reduzir. Neste ponto, a eficiência do gerador passa a ser maior. Isso se dá porque as perdas de concentração têm maior impacto sobre a tensão de saída do gerador nesta região da curva. Uma vez que o acúmulo de água na membrana afeta diretamente o transporte de cargas, as perdas por concentração são sensivelmente reduzidas pela umidade mais elevada. Entretanto, isso se dá pelo fato da umidade relativa da membrana encontrar-se abaixo de 100% (valor ideal).

Tabela 4.4 – Valores adotados para os ensaios de variação de  $UR$ 

|                  | Ensaio UR <sub>1</sub> | Ensaio UR <sub>2</sub> | Ensaio UR <sub>3</sub> | Ensaio UR <sub>4</sub> |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $T_{ent}$ (°C)   | 25 ± 3 °C              |
| $UR_{ent}$ (%)   | 60 ± 3 %               | 70 ± 3 %               | 80 ± 3 %               | 90 ± 3 %               |
| $P_{H_2}$ (PSI)  | 7,0 ± 0,2 PSI          |
| $Q_{ar}$ (L/min) | 540 ± 10 L/min         |

Figura 4.3 – Curva característica para variação de  $UR$

Uma vez que os ganhos de eficiência para os ensaios  $UR_1$ ,  $UR_2$ ,  $UR_3$  e  $UR_4$ , devem ser considerados, pode-se, quantitativamente avaliá-los da seguinte forma, tomando-se como referência  $UR = 70\%$  como valor padrão:

- 1,26% quando a  $UR$  varia de 60% para 70%,
- 8,81% quando a  $UR$  varia de 70% para 80% e
- 8,37% quando a  $UR$  varia de 70% para 90%.

Em decorrência destes ganhos de eficiência em função da  $UR$ , nesta tese opta-se por tomar 70% como o valor nominal de operação do gerador. Outra opção feita, ao longo dos experimentos é a de não se elevar a  $UR$  acima de 80%. Isto se deve ao menor ganho, como mostrado, para níveis de umidificação próximos a 90% para este gerador.

Se a membrana está saturada ( $UR > 100\%$ ) ocorre o afogamento dos canais condutores na superfície catalisadora, elevando drasticamente a tensão de concentração e reduzindo a eficiência total da pilha. Este efeito de sobre-hidratação da membrana pode ser vista no ensaio  $UR_4$ , onde o ar de entrada da CaC é submetido a 90% de hidratação. O ganho de tensão em  $UR_4$  é menor (quase próximo) ao de  $UR_3$ . Porém, seu valor médio torna-se menor que esse na região de interesse, e é menor ainda na porção final da curva.

Assim, um pobre gerenciamento da umidade afeta diretamente a condutividade iônica da membrana, dificultando as reações. Assim, de forma análoga aos ensaios para temperatura variável, a desidratação excessiva afeta significativamente as características da CaC.

#### 4.2.4 Variação do fluxo de ar ( $Q_{ar}$ )

A CaC também é ensaiada quanto à variações do fluxo de ar da entrada ( $Q_{ar}$ ). Isso é mostrado nas condições da Tabela 4.5 e Figura 4.4. Para tanto, o ventilador de ar da CaC tem seu fluxo modificado em quatro situações (Tabela 4.5).

Nestes resultados, os maiores níveis de eficiência da pilha não correspondem necessariamente ao maior valor do  $Q_{ar}$ . Isso está relacionado diretamente à remoção da

água da superfície da membrana do lado do catodo. Um fluxo reduzido ameniza o efeito “secante”, gerado por um fluxo mais elevado de ar, mantendo a umidificação da membrana dentro de níveis mais toleráveis.

Tabela 4.5 – Valores adotados para os ensaios de variação de  $Q_{ar}$

|                           | Ensaio $Q_{ar1}$    | Ensaio $Q_{ar2}$    | Ensaio $Q_{ar3}$    | Ensaio $Q_{ar4}$    |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $T_{ent}$ ( $^{\circ}C$ ) | $25 \pm 3^{\circ}C$ | $25 \pm 3^{\circ}C$ | $25 \pm 3^{\circ}C$ | $25 \pm 3^{\circ}C$ |
| $UR_{ent}$ (%)            | $70 \pm 3$ %        |
| $P_{H_2}$ (PSI)           | $7,0 \pm 0,2$ PSI   |
| $Q_{ar}$ (L/min)          | $140 \pm 10$ L/min  | $540 \pm 10$ L/min  | $900 \pm 10$ L/min  | $1200 \pm 10$ L/min |

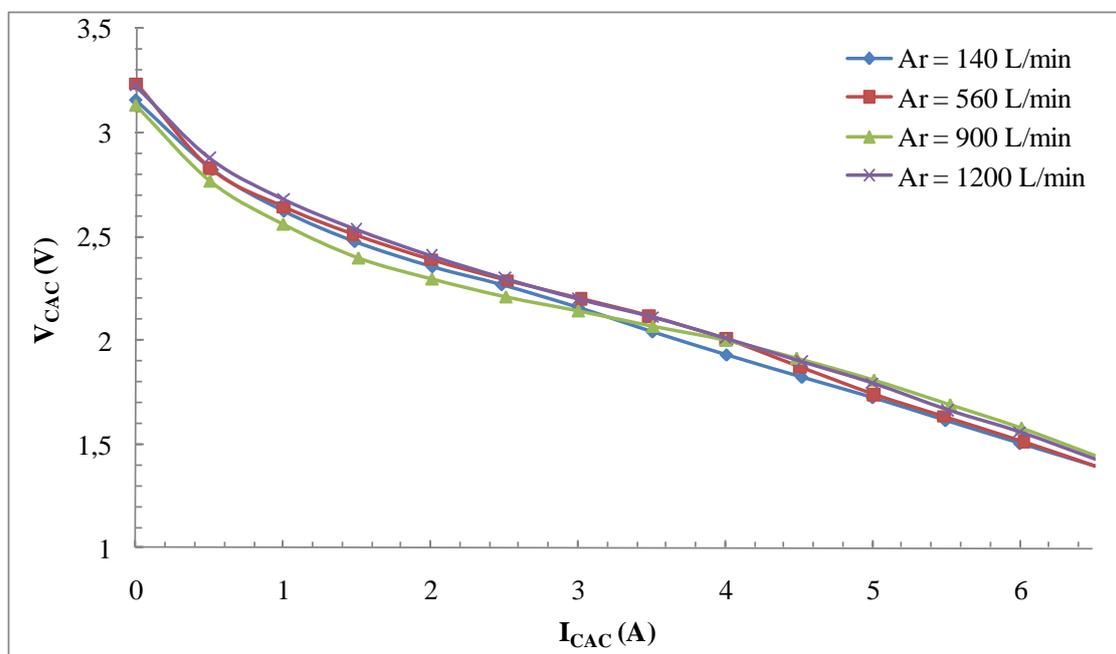


Figura 4.4 – Variação do fluxo de ar de entrada

Em contrapartida, a ventilação do ar também influencia na refrigeração da membrana, interferindo nas diferenças entre a temperatura do ar de entrada e do ar de saída. Em testes experimentais, realizados à parte, é observado que apesar de fluxos reduzidos não terem efeito “secante” excessivo (contribuindo para a manutenção da umidade), ao se operar a CaC durante transitórios, o tempo de recuperação da tensão para fluxos mais elevados mostra-se sensivelmente mais rápido. Isto se deve a uma renovação mais abundante do oxidante e à remoção do conteúdo de água em excesso da membrana. Portanto, o  $Q_{ar}$  tem efeito considerável durante variações de carga nos terminais da CaC. Como a avaliação transitória não é o escopo deste estudo, esta não

será tratada com maior detalhamento nesta tese, uma vez que as variações de carga aqui tratadas são suaves.

Os ganhos de eficiência deste ensaio são os seguintes, considerando-se 540 L/min como valor nominal (de referência), dentro da faixa de interesse (2 a 4 A):

- 1,82% quando  $Q_{ar}$  varia de 140 para 540 L/min,
- redução de 2,72% quando  $Q_{ar}$  varia de 540 para 900 L/min e
- praticamente nulo quando  $Q_{ar}$  varia de 540 para 1200 L/min.

Nos ensaios de variação do  $Q_{ar}$  observa-se que um ganho substancial na região de interesse se apresenta quando a variação do fluxo transita de 140 para 540 L/min. Acima do valor de fluxo nominal, o ganho da eficiência torna-se menor, chegando a anular-se para o valor máximo de fluxo. Por outro lado, na porção da característica  $V \times I$  acima de 4 A, a eficiência torna-se maior para os maiores valores de fluxo. Isto se explica pela elevação da taxa de consumo dos reagentes neste trecho do gráfico.

#### 4.2.5 Efeitos adicionais observados

Alguns efeitos adicionais pertinentes a outros elementos representativos do comportamento da CaC são registrados durante diversos ensaios. Um deles é o aumento da temperatura na saída da CaC em função da carga aplicada. O gráfico da Figura 4.5 demonstra um destes efeitos. Pode-se ver uma relação proporcional entre a taxa de aumento da temperatura de saída com o aumento da corrente. Este aumento é mais acentuado para correntes elevadas em virtude da liberação de energia das reações eletroquímicas envolvidas. Verifica-se que na região de máxima corrente da pilha, boa parte do  $H_2$  consumido é convertida em calor, sem haver retornos significativos em relação à conversão de energia eletroquímica em elétrica.

A análise das curvas da Figura 4.5 permite obter uma relação matemática entre o crescimento da corrente e a variação da temperatura. Esta relação é dada pela Equação 4.1. Observa-se que a taxa de variação da temperatura pode ser dada em função da corrente de carga. Esta relação é, aproximadamente, exponencial. Do ponto de vista do

formato das curvas, conclui-se que existem similaridades entre as várias taxas de variação. Levando-se em conta estas similaridades, a Equação 4.1 pode ser usada para descrever estas variações de temperatura, aproximadamente, com relação ao aumento da corrente. Se não houver nenhum elemento de pré-aquecimento, o valor de  $T_o$  pode ser escolhido como a temperatura ambiente – sendo o próprio ar de entrada o reagente. Nesta equação, o parâmetro  $K$  é uma constante para a taxa de variação da temperatura e seu valor médio é obtido por meio de ensaios. Em outros modelos de geradores, este valor deve ser recalculado para adaptá-lo ao novo projeto. O uso da Equação 4.1 permite prever o comportamento da temperatura do ar de saída (calor) produzida por esta CaC. Esta análise pode ser usada como referência em modelos teóricos de tal forma que estes modelos possam incluir mudanças de temperatura em seus resultados. Como vantagem deste recurso, o projetista pode prever, de forma simplificada, a quantidade de calor gerado pela CaC, caso haja interesse no aproveitamento deste calor na saída.

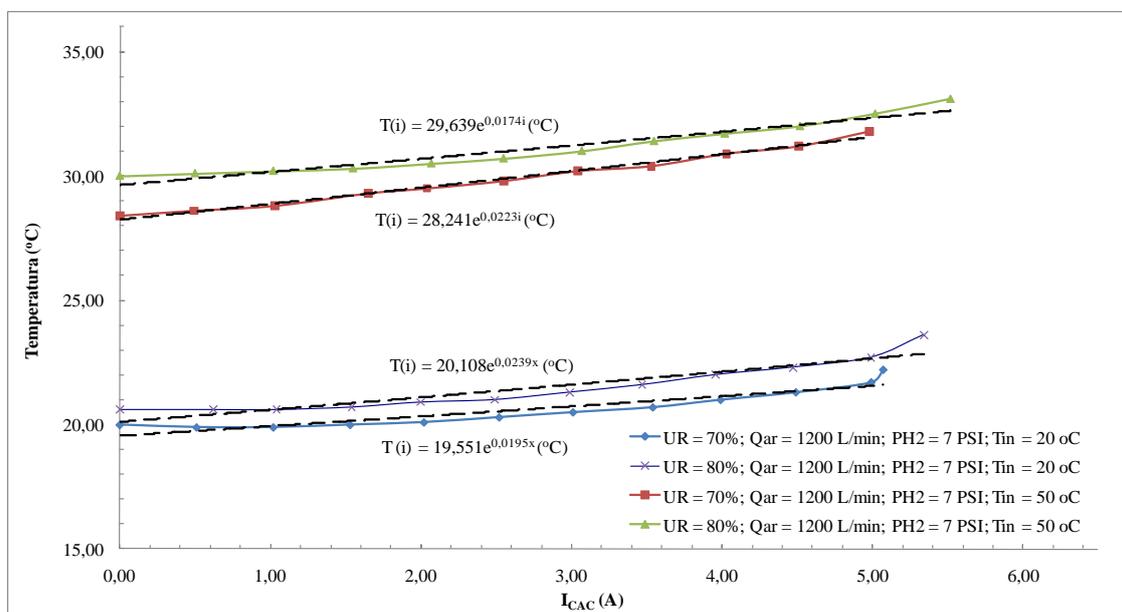


Figura 4.5 – Variação da temperatura de saída da CaC com o aumento da corrente

$$T(i) = T_o \cdot e^{K \cdot i} \quad (^\circ C) \quad (4.1)$$

onde  $T(i)$  ( $^\circ C$ ) é a temperatura instantânea (função da corrente  $i$  (A)),  $T_o$  ( $^\circ C$ ) é a temperatura inicial do ar de saída (igual à do ar de entrada, se a CaC não possuir elementos de pré-aquecimento). Neste caso  $K \cong 0,021$  (valor médio obtido das curvas).

Na Figura 4.6 é registrada a redução da  $P_{H_2}$  na linha de alimentação conforme aumenta-se a demanda de carga. Este efeito, provoca uma redução na eficiência da CaC, uma vez que a pressão pode ser reduzida em até 5% de seu valor pré-ajustado, segundo confirmações feitas durante os experimentos.

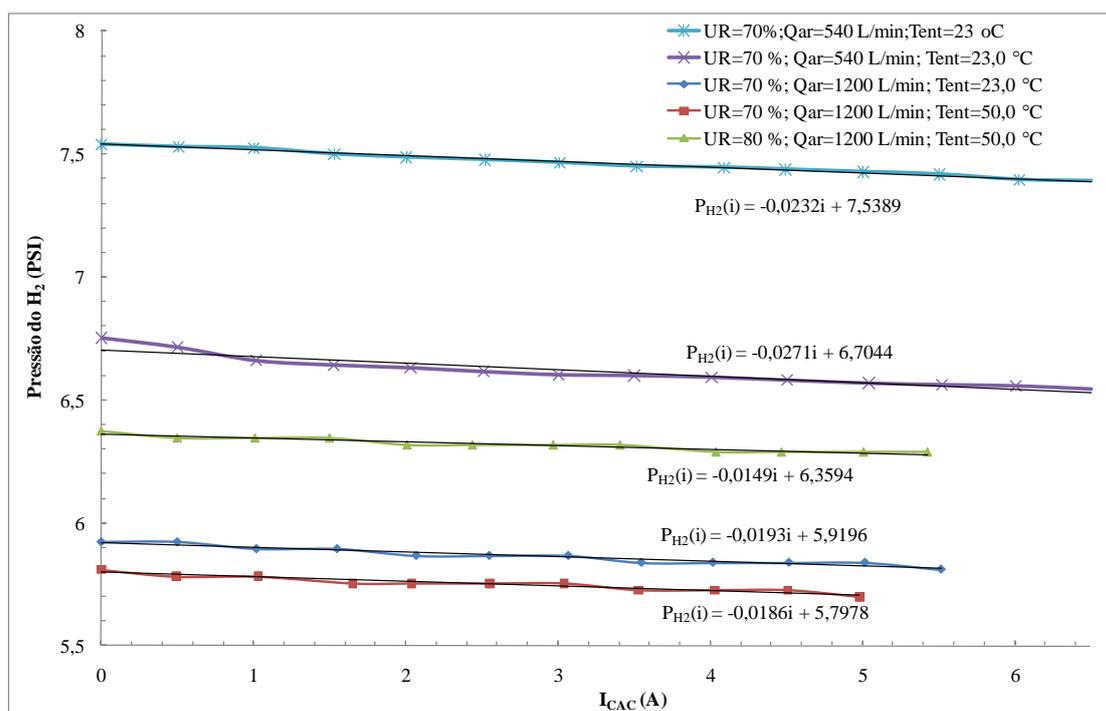


Figura 4.6 – Variação da  $P_{H_2}$  com o aumento da corrente

Observa-se, pela Figura 4.6 que esta variação de pressão é uma função (praticamente) linear da corrente de carga, mesmo para diferentes condições de operação das demais variáveis (umidade, temperatura e fluxo de ar, por exemplo). Portanto, é possível obter-se uma equação geral que descreve esta redução de pressão com o aumento da corrente. Esta expressão é dada pela equação 4.2, permitindo calcular, aproximadamente, a redução de  $P_{H_2}$  na linha, de acordo com o aumento da corrente de carga. Isto permite ao projetista um grau adicional de liberdade do ponto de vista da compensação do ponto de ajuste do combustível. Assim, compensando-se a pressão, a eficiência pode ser controlada, principalmente para cargas de maior potência. Esta análise é relevante, pois pode ser aplicada em modelos teóricos, permitindo a inclusão de mudanças na pressão do combustível expressa como:

$$P_{H_2}(i) = -b \cdot i + P_{inicial(H_2)} \text{ (PSI)} \quad (4.2)$$

onde  $P_{H_2}(i)$  é a pressão (PSI) como função da corrente instantânea  $i$  (A);  $P_{inicial(H_2)}$  (PSI) é a pressão inicial na linha de alimentação do  $H_2$ ; a constante  $b$  é um valor médio obtido após várias medições (neste caso,  $b = 0,019975$ ).

Para outras células PEM, a constante  $b$  deve ser recalculada a cada nova central geradora para ajustar e adaptar a Equação (4.2).

Como visto anteriormente, a influência da pressão do combustível para variações dentro dos valores nominais é relativamente baixa, se comparada com as demais grandezas. Conforme se observa nas simulações do Capítulo 2 e nos resultados experimentais apresentados na Figura 4.1, a  $P_{H_2}$  tem menos influência sobre a eficiência total do gerador em comparação com as outras variáveis. Em centrais de pequeno porte (abaixo de 10 kW, por exemplo) deve ser averiguada a viabilidade de periféricos para compensar esta redução de pressão. Por outro lado, para geradores potência mais elevada (na ordem de algumas centenas de kW), esta variação da eficiência torna-se significativa, dada a escala mais elevada, demandando maior atenção quanto a implementação de plantas geradoras de grande porte. Assim, o aumento da eficiência elétrica pode ser substancial com a compensação da pressão do combustível em geradores da ordem de centenas de quilowatts. Torna-se necessário recordar que, elevar a pressão a valores muito acima do nominal pode não ser vantajoso, uma vez que a membrana pode saturar, levando ao desperdício de reagentes.

A CaC PEM requer componentes auxiliares para sua operação adequada. Em particular, um compressor de ar para fornecimento do oxidante e circuitos de gerenciamento térmico e de água, para controle de nível da umidade na membrana e temperatura da pilha. A forma como estes dispositivos são gerenciados refletem sensivelmente sobre a eficiência do gerador.

Observa-se que há uma grande dependência da membrana da CaC em relação às condições climáticas. Porém, estas relações demonstram ser altamente não-lineares, uma vez que variações de pequena escala podem afetar de forma global o desempenho do gerador. Como por exemplo, os efeitos da temperatura, observados na Figura 4.2.

As características salientadas neste item devem ser levadas em conta durante o estágio de desenvolvimento do controlador mais adequado para o equipamento de gerenciamento de eficiência da CaC, quando esta opera em regime permanente.

As Figuras 4.7 a 4.9 indicam como se comporta a eficiência da CaC frente ao consumo de combustível em face da alteração dos parâmetros operacionais da CaC. Uma análise inicial mostra que a temperatura de operação, a umidade e o fluxo do ar tem efeitos críticos sobre a eficiência da CaC e, por consequência, sobre a potência máxima disponível.

No caso estudado aqui, visualiza-se que temperaturas na faixa de  $20,0^{\circ}C$  e fluxo do ar na faixa de  $1200L/min$ , com umidade relativa em torno de 80% permitem a obtenção de níveis maiores de potência (aproximadamente  $6,0W$ ) para a faixa de consumo de  $0,0015Nm^3/h$ . Assim, pode-se salientar que, para uma mesma faixa de consumo de  $H_2$  é possível atingir-se níveis mais elevados de potência, sem a necessidade de operar a célula fora da região linear de sua curva característica. Portanto, maiores níveis de eficiência para um mesmo volume consumido de combustível podem ser atingidos pela manipulação da temperatura, umidade e pressão dos reagentes.

Nas Figuras 4.7 a 4.9 observa-se que o aumento da eficiência da CaC não é necessariamente relacionado ao aumento do consumo de  $H_2$ , principalmente para as correntes de carga mais elevadas.

Apesar de serem atingidos níveis maiores de potência, a eficiência sofre reduções drásticas para correntes de carga maiores. Dessa forma, o aumento do consumo de hidrogênio com o aumento da carga causa reduções de eficiência. Portanto, consumo e eficiência possuem relações inversas em suas ordens de grandezas. Isso leva à conclusão de que valores mais elevados de eficiência podem ser atingidos com quantidades reduzidas de combustível não sendo necessário operar o gerador fora da região linear.

Estas observações corroboram, na prática, as vantagens da limitação da operação da CaC na região linear de sua curva característica  $V_{xI}$ .

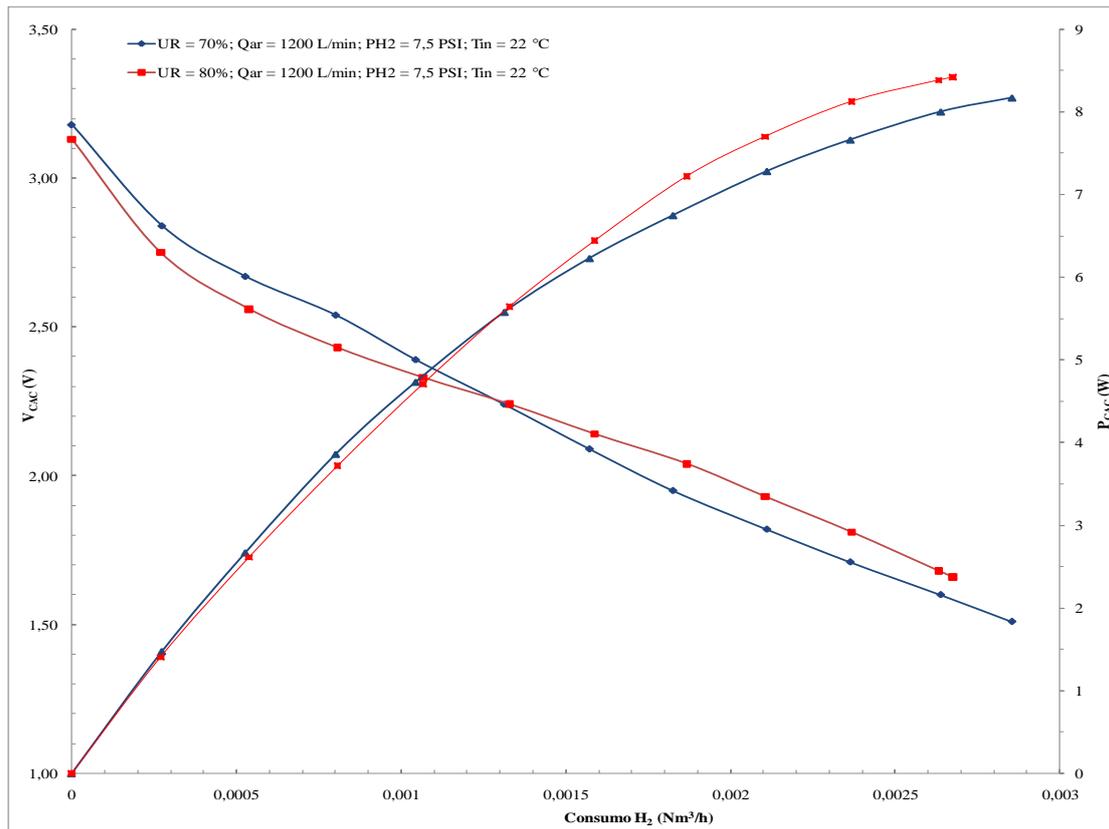


Figura 4.7 – Eficiência em função do consumo com variação da umidade

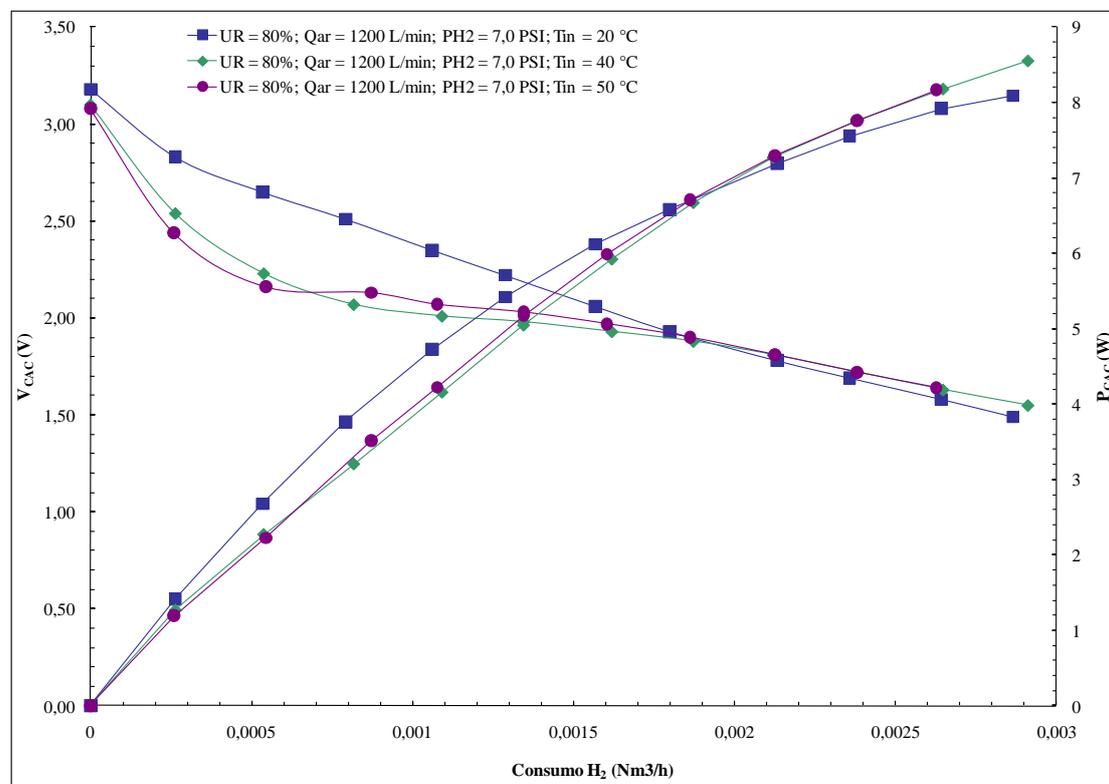


Figura 4.8 – Eficiência em função do consumo com variação da temperatura

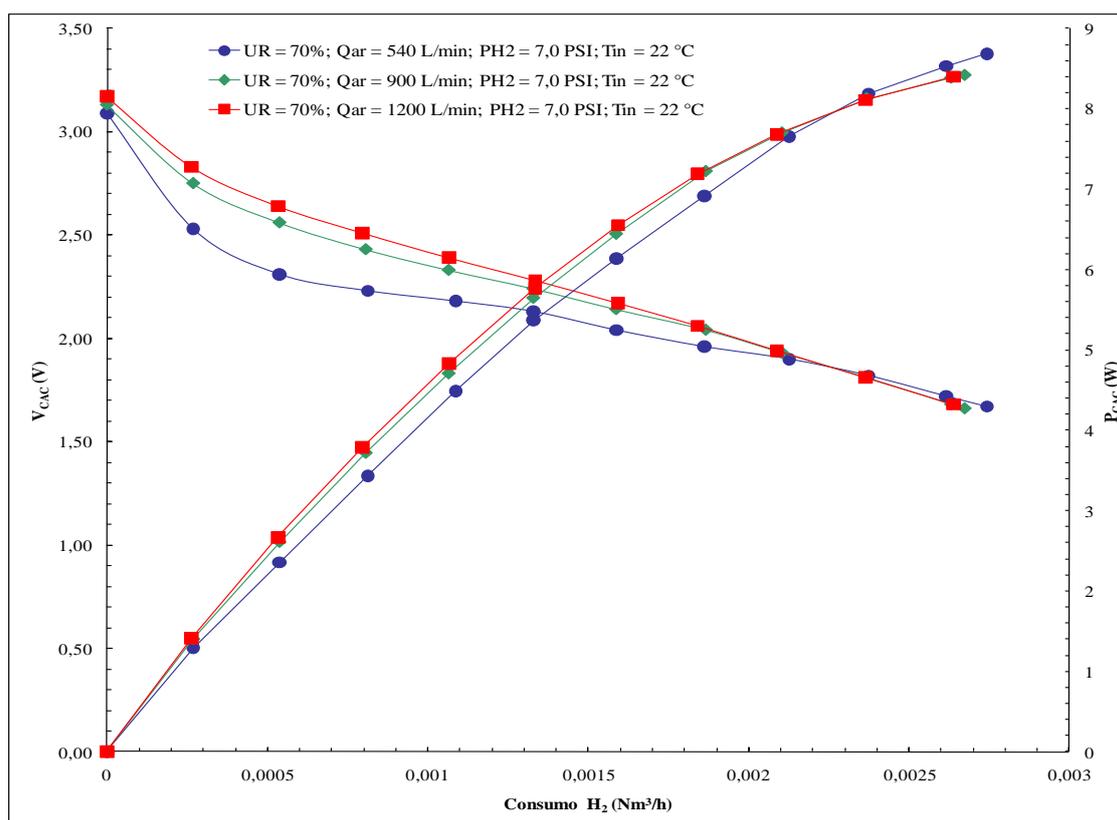


Figura 4.9 – Eficiência em função do consumo com variação do fluxo de ar

Através das Figuras 4.7 a 4.9 observa-se também que os níveis de tensão otimizados para a potência nominal devem ser determinados para cada aplicação, com base em critérios de otimização, tais como menores custos para geração de eletricidade, ou dispositivos auxiliares menos caros, ou de menor peso e tamanho.

Também, devem-se considerar parâmetros como o custo do combustível, custo da pilha, vida útil, capacidade do gerador, perfil de carga, eficiência da central geradora e assim por diante. Se a pilha é operada com carga parcial (abaixo de 20,0%, por exemplo) da potência nominal na maior parte do tempo, então a opção pelo uso da pilha em tensões mais elevadas não significa necessariamente maiores eficiências de operação.

Como mostrado nas Figuras 4.7 a 4.9, para 20% da potência nominal, não há vantagens em termos de eficiência no uso de tensões elevadas. Isto se deve à operação em baixas densidades de corrente, onde as perdas (de ativação) nesta região são significativas.

### 4.3 Resumo do Capítulo

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que a técnica de controle apropriada para a operação de uma célula a combustível é aquela capaz compensar simultaneamente os efeitos das múltiplas variáveis ambientais. Tais resultados podem ser usados para desenvolver um modelo baseado em uma estrutura ANFIS, conforme proposto no Capítulo 3. A vantagem desta estrutura para modelagem é a possibilidade de inclusão do efeito da umidade do ar de entrada. Isto se dá pelo fato de que, em geral, os modelos apresentados na literatura assumem uma hidratação de 100% (ideal). Porém, isto não corresponde totalmente à realidade, pois como visto neste Capítulo a umidade tem um grande impacto na eficiência do gerador.

No contexto da multiplicidade de fatores interferentes na eficiência da CaC, julga-se como mais adequado o desenvolvimento de um algoritmo inteligente como controlador. Esta estratégia é capaz de lidar de forma praticamente simultânea com o grande número de variáveis correlatas. Aliado a isso, se dá o reduzido poder de processamento requerido pelo conjunto de tomadas de decisão.

Portanto, os resultados analisados neste capítulo são considerados para a construção de conjuntos das regras fuzzy implementados e testados ao longo do desenvolvimento do restante desta tese. A partir desta etapa, os valores obtidos com os ensaios realizados são traduzidos e quantificados em termos de variáveis lingüísticas. Após esta etapa, um sistema de inferência para a tomada de decisões é elaborado. Esta escolha se dá pela obtenção de um regulador com capacidade de ajuste adequado, dadas as condições necessárias e desejadas de operação do gerador.

# **RESULTADOS EXPERIMENTAIS: MODELAGEM E CONTROLE DA EFICIÊNCIA DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL**

---

## **5.1 Introdução**

Como resultado dos experimentos realizados sobre o comportamento da célula a combustível conduzidos no Capítulo 4, este capítulo visa definir um modelo neuro-fuzzy e um controlador fuzzy para a CaC utilizada experimentalmente nesta tese.

A primeira etapa trata da coleta e avaliação dos dados (realizada no Capítulo 4) para a geração do modelo do cartucho de célula a combustível SR-12.

Em uma segunda etapa, conjuntos de dados adicionais são coletados para o desenvolvimento de um modelo ANFIS (*Adaptive Neuro-fuzzy Inference System*), adequado a este protótipo. Este modelo, construído e testado em ambiente MatLab/Simulink<sup>TM</sup> atua como ferramenta de apoio de projeto dos controladores fuzzy (terceira etapa do trabalho) para as múltiplas variáveis envolvidas. Este procedimento de análise, modelagem e projeto dos controladores é necessário devido ao fato de os

algoritmos fuzzy requererem conhecimento especializado para sua criação. O foco destes controladores é a capacidade de gerenciamento da energia para manter a CaC dentro das condições de eficiência pré-definidas. Para tanto, devem ser levadas em consideração a influência de cada variável de entrada sobre a eficiência. Com isso, é possível programar o algoritmo fuzzy baseado em regras para obter a resposta desejada.

A seguir (quarta etapa) os controladores fuzzy são portados para a plataforma LabVIEW™, a fim de serem avaliados em uma plataforma prática real.

Por fim (etapa final), os resultados reais são comparados com os teóricos para comprovar a eficácia das metodologias de modelagem e projeto propostas nesta tese. Também são verificados os ganhos desejados de eficiência em termos quantitativos.

## 5.2 Modelo Neuro-fuzzy CaC SR-12

A mesma metodologia usada para criar o modelo ANFIS da CaC de 6 kW (Capítulo 3) é aplicada para desenvolver um modelo para o cartucho SR-12. Neste caso, o novo modelo recebe uma informação adicional, que é a umidade relativa do ar de entrada. Na literatura, em geral, modelos matemáticos paramétricos que representem a umidade e suas influências são de difícil obtenção. O modelo SR-12 é um modelo de múltiplas entradas/única saída ANFIS. Sua estrutura geral é apresentada na Figura 5.1.

A Figura 5.1 ilustra o o modelo da pilha SR-12, composto de cinco entradas:

- $I_{CaC}$  (A) – corrente de carga;
- $P_{H_2}$  (PSI) – pressão do  $H_2$ ;
- $Q_{ar}$  (L/min) – fluxo do ar;
- $T_{ent}$  (°C) – temperatura do ar de entrada;
- $UR$  (%) – umidade relativa do ar de entrada.

A saída do modelo é a tensão terminal da pilha ( $V_{CaC}$  (V)).

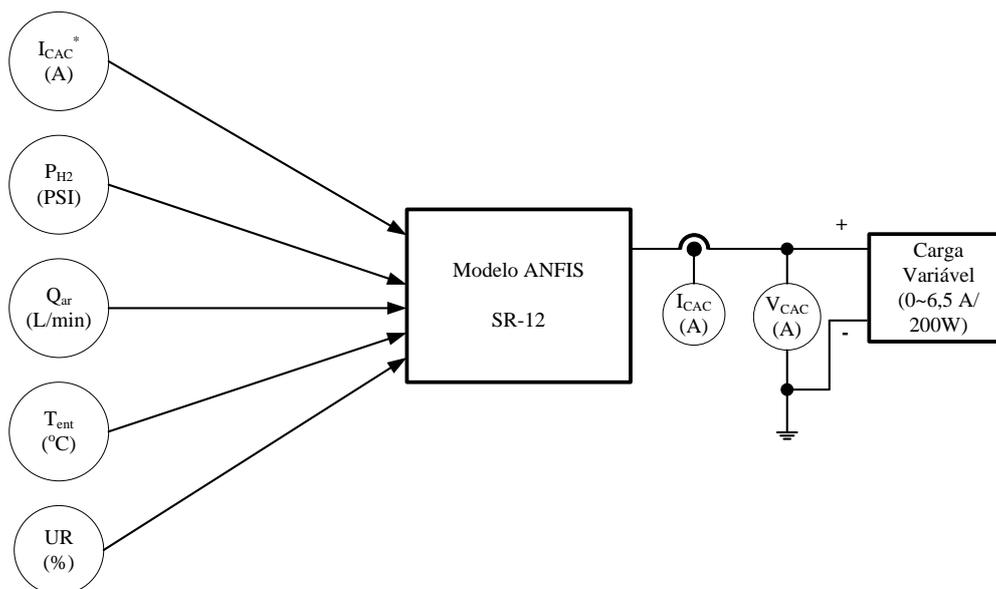


Figura 5.1 – Diagrama geral do modelo para CaC SR-12

### 5.2.1 Coleta e seleção de dados para treinamento do modelo

Nos experimentos, dados para treinar o modelo ANFIS são coletados em intervalos de 0,1 A, com 20 s de tempo de acomodação entre cada intervalo. Isto se deve em virtude da coleta em intervalos de 0,5 A não propiciar a aquisição de um número suficiente de pares de dados adequados ao treinamento preciso da rede ANFIS (verificação experimental).

Os parâmetros de treinamento e a estrutura do modelo ANFIS são apresentados na Tabela 5.1. Esta estrutura, obtida após a realização de uma série de avaliações de configurações, é adotada como modelo-referência para o desenvolvimento do restante deste trabalho.

Similar a metodologia de desenvolvimento teórica (Capítulo 3), é usado o ambiente Matlab/Simulink<sup>TM</sup>, conforme o diagrama da Figura 5.2. A opção pelo Matlab/Simulink<sup>TM</sup> se dá em virtude da ferramenta “*anfisedit*” e o Matlab<sup>TM</sup> apresentarem os recursos necessários para criar, testar e ajustar o modelo final.

A construção do modelo e as simulações efetuadas aqui são totalmente desenvolvidas e testadas em um computador AMD Turion<sup>TM</sup> 64 X2 Mobile Technology TL-58 1,90 GHz, 4Gb RAM.

Tabela 5.1 – Arquitetura ANFIS e parâmetros de treinamento

| Arquitetura                                 | Parâmetros de treinamento     |
|---|-------------------------------|
| Número de entradas                          | 5                             |
| Número de saídas                            | 1                             |
| Número de regras                            | 42                            |
| Dimensão do vetor de treinamento            | 2178 x 6                      |
| Dimensão do vetor de teste                  | 2178 x 6                      |
| Tipo  | Sugeno                        |
| Tipo de função de pertinência das entradas  | Gaussiana                     |
| Método de otimização (regra de aprendizado) | Método de otimização híbrida  |
| Tolerância ao erro (programada)             | 0,03                          |
| Época de treinamento (programada)           | 1000                          |
| Faixa de influência (programada)            | 0,3                           |
| Fator de aglutinação (programada)           | 1,25                          |
| Taxa de aceitação (programada)              | 0,5                           |
| Taxa de rejeição (programada)               | 0,12                          |
| Erro de treinamento (programada)            | 0,03                          |
| Erro médio de teste (atingido)              | 0,0285                        |
| Erro médio de checagem (atingido)           | 0,03071                       |
| Época de treinamento de parada (atingido)   | 674                           |
| Tempo para geração do modelo final          | 180 minutos (aproximadamente) |

### 5.2.2 Validação do modelo ANFIS

O modelo ANFIS para a CaC SR12 é validado comparando-se os resultados reais com os obtidos dos experimentos (conduzidos no Capítulo 4). A primeira avaliação da capacidade de aproximação do modelo com dados reais é dada na Figura 5.3. Varia-se a valor da pressão do  $H_2$  ( $P_{H_2}$ ) mantendo-se constantes as demais variáveis (fixadas em seus valores nominais). O erro médio máximo calculado entre as curvas para os dados reais e os simulados, neste caso, é de  $\pm 1,03\%$ .

A Figura 5.4 apresenta o comportamento do modelo para variações do fluxo de ar ( $Q_{ar}$ ). Para o caso da simulação com a variação do  $Q_{ar}$ , o erro médio calculado entre as curvas para os dados reais e os simulados é de  $\pm 0,17\%$ .

A Figura 5.5 ilustra o comportamento do modelo para variações da temperatura do ar de entrada. Neste caso, o erro médio máximo calculado entre as curvas para os dados reais e os simulados é de  $\pm 0,79\%$ .

A Figura 5.6 apresenta a resposta do modelo para variações da umidade relativa do ar de entrada ( $UR$ ). Para o caso da  $UR$ , o erro médio máximo calculado para as curvas comparativas simuladas e reais é de  $\pm 1,1\%$ , aproximadamente.

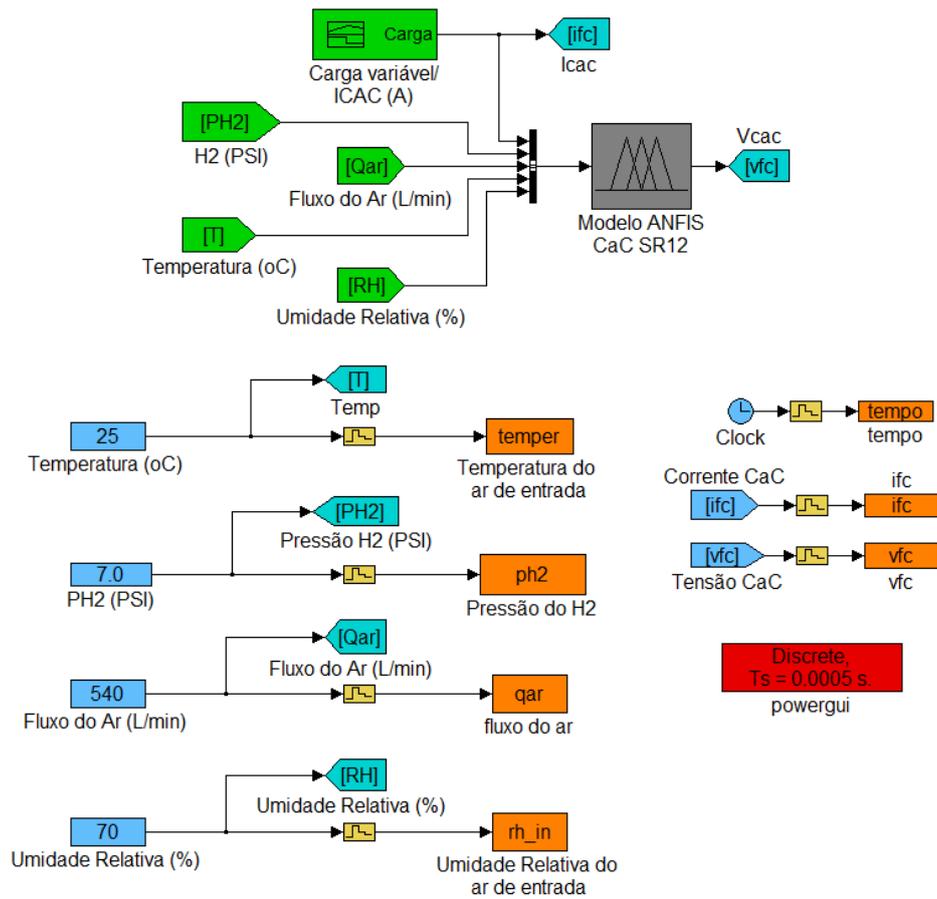


Figura 5.2 – Modelo ANFIS implementado em Matlab/Simulink™

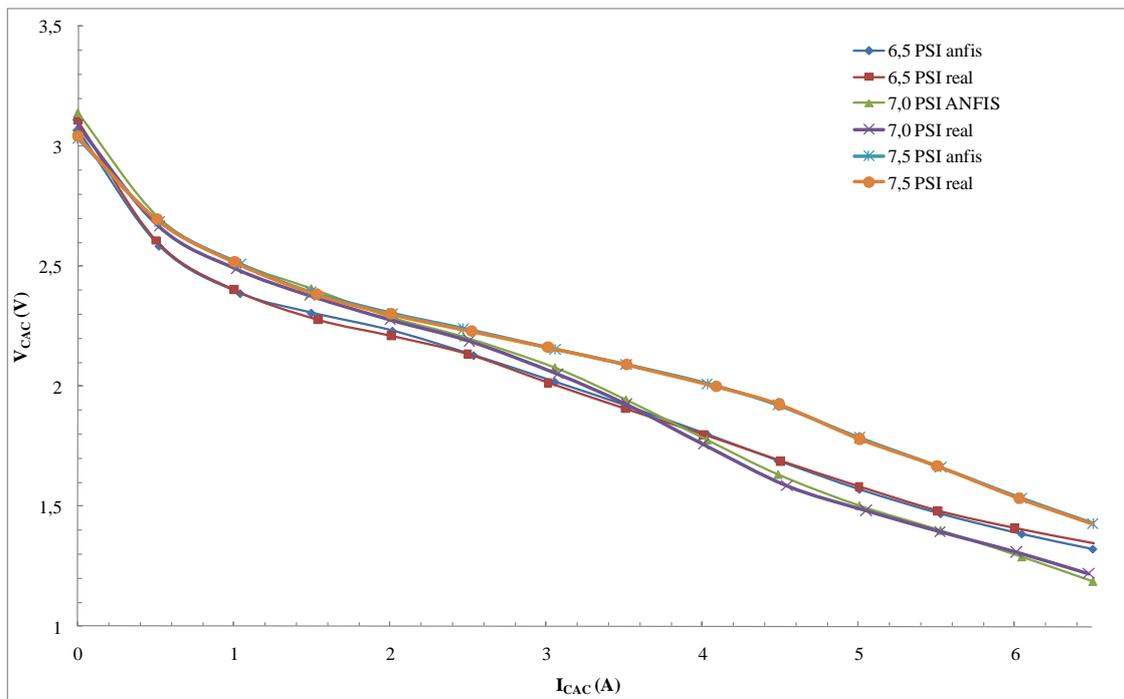


Figura 5.3 – Comportamento do modelo ANFIS SR12 para variação da  $P_{H_2}$

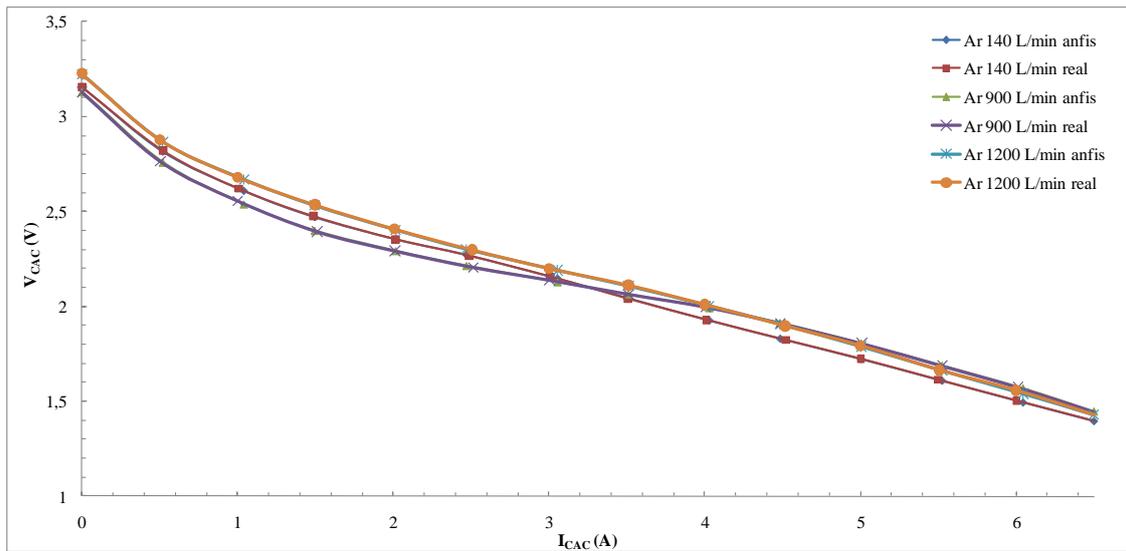


Figura 5.4 – Comportamento do modelo ANFIS SR12 para variação do fluxo de ar

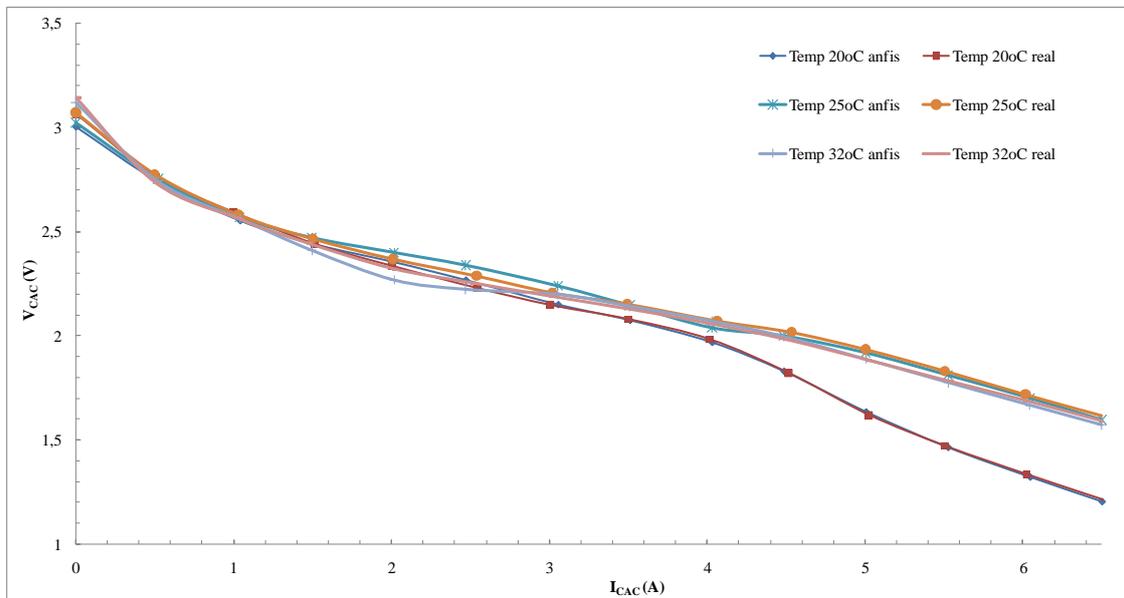


Figura 5.5 – Comportamento do modelo ANFIS SR12 para a variação da temperatura

É necessário ressaltar que, em parte, o erro entre os valores reais e os simulados deve-se ao fato de que as variáveis de entrada no simulador são mantidas constantes. Na central geradora real baseada em CaCs, estas grandezas sofrem variações no tempo em suas amplitudes.

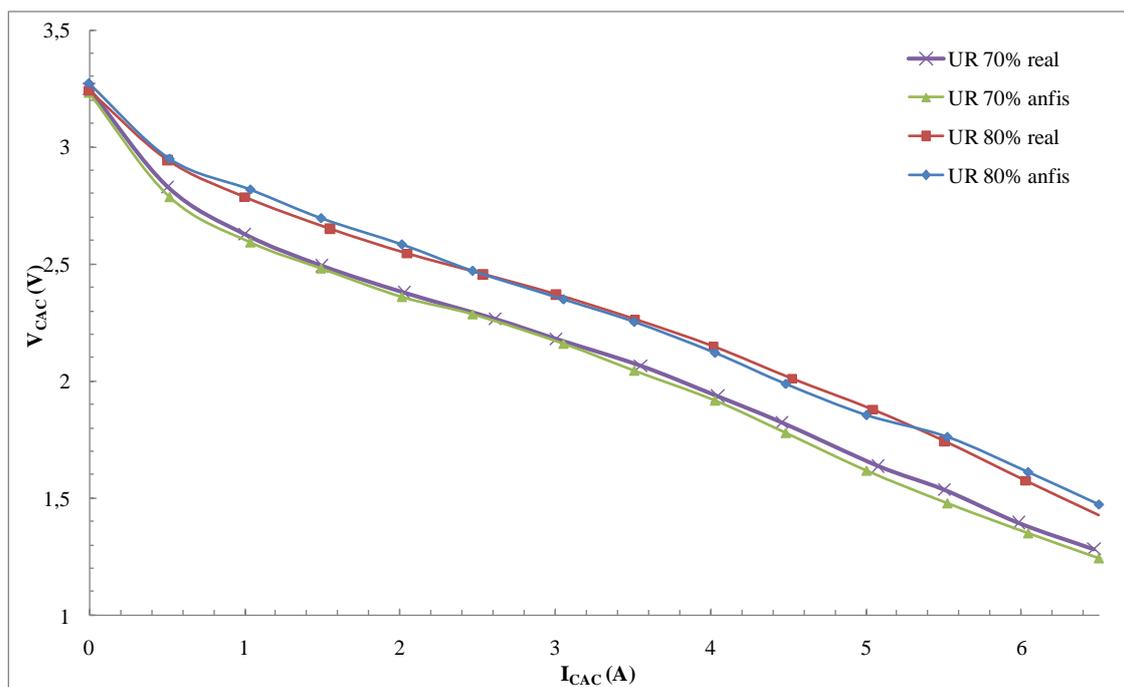


Figura 5.6 – Comportamento do modelo ANFIS SR12 para a variação da umidade

### 5.3 Controladores fuzzy para aumento da eficiência

Nesta seção são apresentados os resultados teóricos obtidos dos algoritmos fuzzy desenvolvidos para cada variável de controle. O desenvolvimento destes controladores fuzzy baseados em regras segue a mesma metodologia adotada para controlar a eficiência da CaC teórica de 6kW do Capítulo 3.

A Tabela 5.2 apresenta as características dos controladores fuzzy utilizados. Como critério de simplificação para otimização e ajuste do controlador, opta-se por manter estruturas fuzzy com características similares. O controlador é elaborado, avaliado e ajustado por meio da ferramenta “*fuzzy*”, disponível no Matlab/Simulink<sup>TM</sup>. Os blocos de regras têm saídas ajustadas conforme as características  $VxI$  das entradas.

Como alternativa para simplificar o tratamento das funções de pertinência e desenvolver os blocos de regras, são utilizadas as mesmas denominações linguísticas para todas as variáveis, conforme lista das nomenclaturas dada na Tabela 5.3. Cada regra possui peso unitário em virtude de, no caso estudado aqui, buscar a avaliação do impacto de cada uma sobre o controlador final. Isto reduz a complexidade da tarefa de ajuste dos blocos de regras.

Tabela 5.2 – Características gerais dos algoritmos fuzzy utilizados

| Arquitetura                                  | Parâmetros                 |
|--|----------------------------|
| Tipo   | Mamdani                    |
| Método de inferência                         | Máx-Mín                    |
| Método de Implicação                         | Mínimo                     |
| Método de Agregação                          | Máximo                     |
| Método de Defuzzyficação                     | Centro da área (Centróide) |
| Entradas                                     | 2                          |
| Saídas                                       | 1                          |
| Número de regras                             | 49                         |
| Formato das funções de pertinência           | Triangular                 |
| Número de funções de pertinência da entradas | 7                          |
| Número de funções de pertinência das saídas  | 7                          |
| Mínima sobreposição utilizada                | 25%                        |
| Peso de cada regra                           | 1                          |

Tabela 5.3 – Nomenclatura das funções de pertinência

| Sigla | Definição         |
|-------|-------------------|
| B     | Baixo             |
| PB    | Pouco-Baixo       |
| PMB   | Pouco-Médio-Baixo |
| M     | Médio             |
| PMA   | Pouco-Médio-Alto  |
| PA    | Pouco-Alto        |
| A     | Alto              |

O processo de desenvolvimento heurístico relacionado aos algoritmos fuzzy é elevado. A procura de uma solução ótima pode variar consideravelmente entre desenvolvedores, dado o grau de empirismo envolvido. Dois ou mais desenvolvedores podem chegar a diferentes resultados em função de fatores tais como o nível de conhecimento do processo, grau de otimização desejado, opções de configuração do SIF e assim por diante. Para desenvolver os SIFs utilizados nesta tese é apresentada uma metodologia com vistas ao maior grau de simplificação possível. Esta metodologia pode ser estendida e alterada, conforme necessário.

Ao criar o algoritmo fuzzy multi-variável, duas etapas são seguidas:

1<sup>a</sup>. Criar um controlador para cada variável: nesta etapa cada variável de controle possui uma única estrutura fuzzy otimizada para operar adequadamente na região de interesse (região linear da característica  $V_{xI}$ ), com vistas à obtenção dos maiores níveis de eficiência. São gerados blocos de regras distintos, operando conforme pré-estabelecido. Esta etapa permite aferir quais os níveis máximos de eficiência possíveis de serem atingidos isoladamente;

2<sup>a</sup>. Agregar os controladores: nesta etapa, os controladores são integrados, de forma a atuar sobre as variáveis de controle. Os blocos de regras da etapa precedente são revisados e parcialmente redimensionados. Isto se dá em virtude das múltiplas interações entre as variáveis de controle e as saídas desejadas. Outro nível de otimização é realizado nos novos blocos de regras pela revisão das regras anteriores. Com isso, espera-se que maiores níveis de eficiência sejam atingidos, com maior economia de reagentes e de energia nos periféricos pela dupla revisão das regras fuzzy.

Os controladores têm como entradas  $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$ . As funções de pertinência de  $V_{CaC}$  e  $I_{CaC}$  e detalhamento são apresentadas na Figura 5.5.

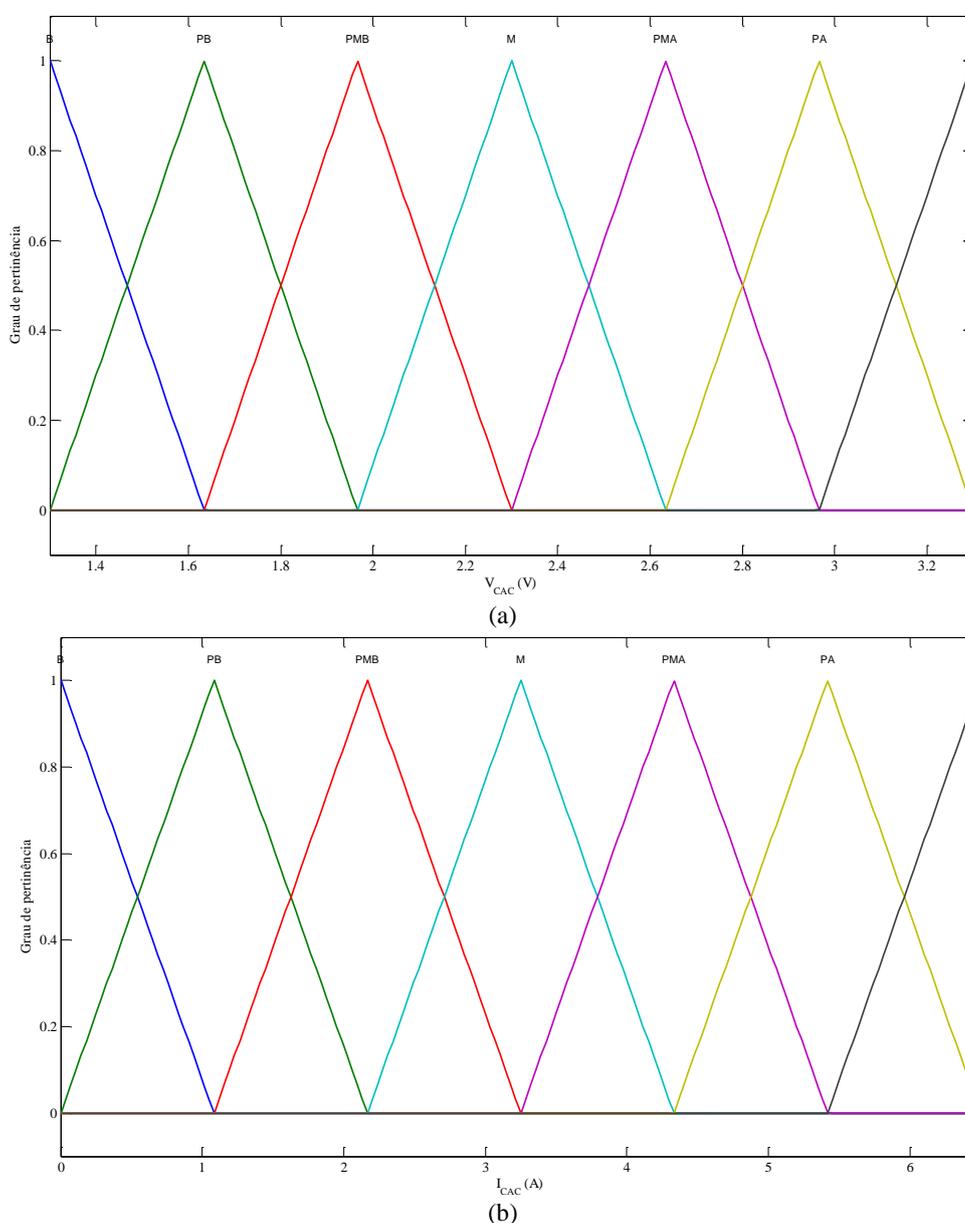


Figura 5.7 – Funções de pertinência de (a)  $V_{CaC}$  e (b)  $I_{CaC}$

A seguir são apresentados os resultados simulados dos controladores individuais e sua integração. Os testes individuais para o compensador de cada variável são feitos mantendo-se as demais variáveis estáveis, fixadas no modelo em seus valores nominais.

### 5.3.1 Controlador fuzzy para a pressão do $H_2$ ( $P_{H_2}$ )

O modelo ANFIS, com o respectivo controlador fuzzy, implementados em Matlab/Simulink™ para a  $P_{H_2}$  é apresentado na Figura 5.8. Nesta figura, os dados para o controlador e o modelo vêm do valor da corrente produzida pela carga variável e da tensão de entrada do controlador que é uma realimentação da tensão de saída do modelo, de modo a fechar a malha de controle. Tal medida permite ao bloco de regras inferir sobre a pressão de saída que é corrigida por meio da característica  $VxI$  da CaC.

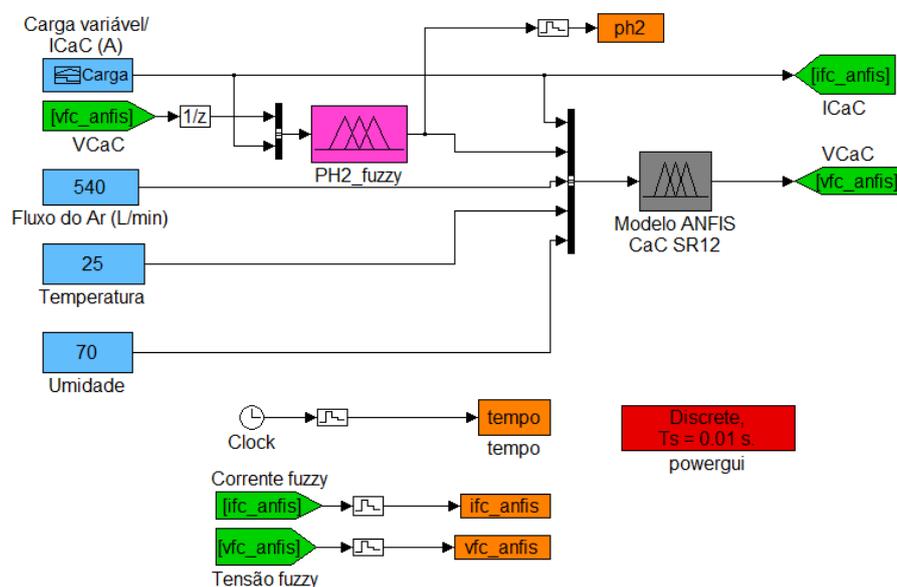
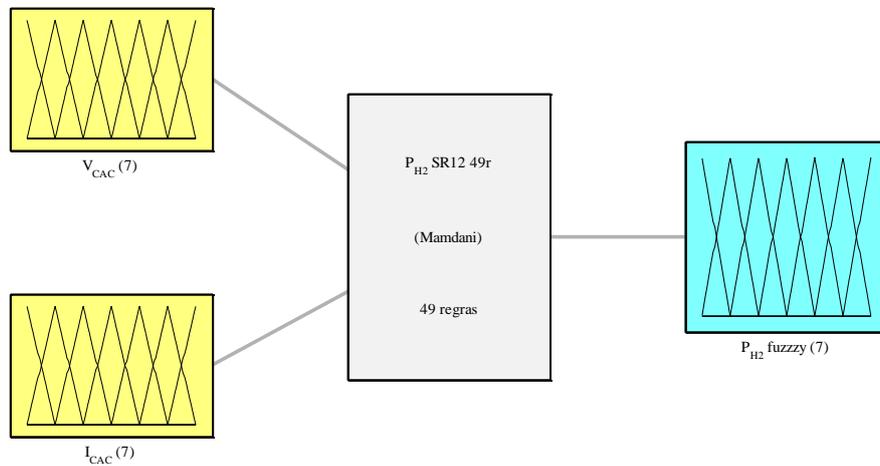


Figura 5.8 – Modelo ANFIS e controle fuzzy para  $P_{H_2}$

A Figura 5.9 apresenta a estrutura geral do controlador fuzzy e a função de pertinência para a saída fuzzy da  $P_{H_2}$ . Como se observa na Figura 5.9, a distribuição da função de pertinência de saída é homogênea, tal qual é feito com as entradas. No caso

da  $P_{H_2}$ , a faixa selecionada é de 6,5 a 7,5 PSI para garantir a operação da CaC dentro de sua faixa nominal de pressão.



Sistema controle fuzzy  $P_{H_2}$  para SR12: 2 entradas, 1 saída, 49 regras

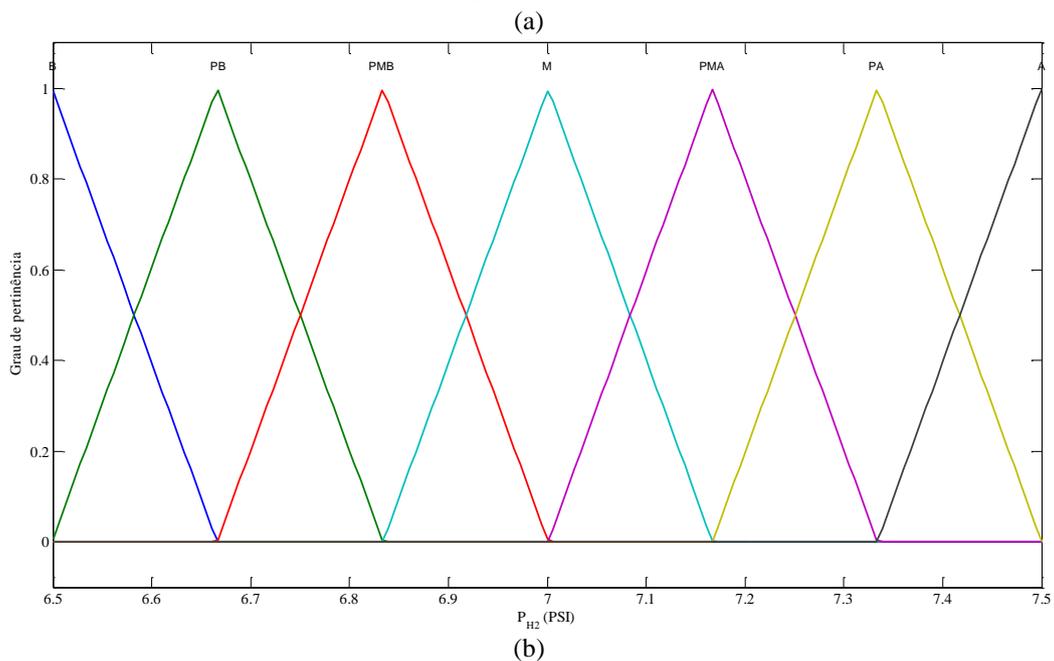


Figura 5.9 – (a) Estrutura geral do controle e (b) Função de pertinência de saída do controlador da  $P_{H_2}$

O algoritmo fuzzy para a  $P_{H_2}$  é desenvolvido para atuar de forma otimizada na região linear de operação desta CaC (2 a 4 A). A Figura 5.10 apresenta a curva de superfície desenvolvida para este caso, usando um bloco de regras heurísticamente otimizado. O gráfico de superfície apresenta vales acentuados nas extremidades,

principalmente nas condições equivalentes a situações de difícil ocorrência – corrente alta x tensão alta e/ou corrente baixa x tensão baixa. Além disso, ao final da curva, na região de alta corrente e baixa tensão, opta-se pela redução da pressão. Esta opção se dá pela baixa eficiência característica da CaC. Com isso, pouco  $H_2$  é debitado quando o gerador opera nesta região, limitando o desperdício de combustível. De fato, conforme ilustra a Tabela 6.8 que simboliza o bloco de regras utilizado, existe uma região de situações que preenchem a característica  $VxI$  da curva da CaC e duas outras regiões laterais de grande improbabilidade física. No caso das regiões improváveis, neste trabalho, há três opções principais para preenchimento das tabelas de regras:

1. Ignorar as improbabilidades físicas não preenchendo as regras nestas áreas;
2. Preencher estas áreas de tal forma que as respostas às improbabilidades sejam as mesmas da região válida mais próxima (regra da vizinhança) e;
3. Preencher estas áreas de forma organizada, de modo que se houver algum tipo de problema (falha de sensores, irregularidades de leitura, decisão conflitante, ou outros), o algoritmo fuzzy esteja preparado para interpretar tais situações.

Neste trabalho usa-se a terceira opção. Apesar de esta ser um pouco mais complexa por requerer o desenvolvimento de regras adicionais, ela pode garantir um maior grau de eficácia em sua implementação prática. Na Tabela 5.4, a numeração de 1 a 49 corresponde às regras do algoritmo fuzzy. A área sombreada da Tabela 5.4 representa a região de maior interesse (prioritária) à programação do algoritmo fuzzy. Outro aspecto a salientar é que os limites da área sombreada não são exatos, dado o nível de empirismo aplicado quando da construção das regras fuzzy. Durante a avaliação experimental, é constatado que não é absolutamente necessário elevar a  $P_{H_2}$  acima do valor de 7 PSI. Devido à redução da pressão na linha, a compensação da mesma em torno de seu valor nominal se mostra suficiente para a manutenção da eficiência, principalmente na região de interesse de operação da CaC.

O gráfico da Figura 5.11 mostra a comparação simulada da curva  $VxI$  nominal da CaC com a curva  $VxI$  utilizando a compensação da  $P_{H_2}$  na linha. O algoritmo fuzzy é usado para compensar a pressão na região linear de operação.

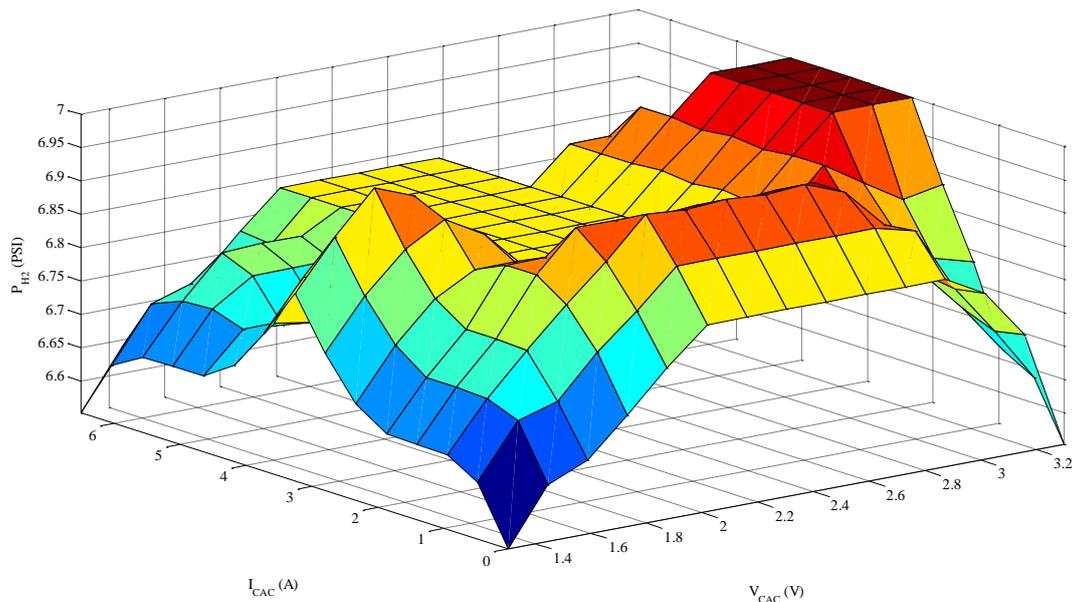


Figura 5.10 – Gráfico de superfície para o bloco de regras da  $P_{H_2}$

Tabela 5.4 – Tabela das improbabilidades físicas da curva da CaC

| $V_{CaC}$ \ $I_{CaC}$ | A  | PA | PMA | M  | PMB | PB | B  |
|-----------------------|----|----|-----|----|-----|----|----|
| B                     | 1  | 2  | 3   | 4  | 5   | 6  | 7  |
| PB                    | 8  | 9  | 10  | 11 | 12  | 13 | 14 |
| PMB                   | 15 | 16 | 17  | 18 | 19  | 20 | 21 |
| M                     | 22 | 23 | 24  | 25 | 26  | 27 | 28 |
| PMA                   | 29 | 30 | 31  | 32 | 33  | 34 | 35 |
| PA                    | 36 | 37 | 38  | 39 | 40  | 41 | 42 |
| A                     | 43 | 44 | 45  | 46 | 47  | 48 | 49 |

É observado na Figura 5.11 que a eficiência sofre um acréscimo dentro da região linear da curva, conforme definido durante a programação do algoritmo de controle, se comparado com a característica  $VxI$  nominal. Este acréscimo de eficiência obtido durante a simulação é de, aproximadamente, 1,1 %. Além disso, observa-se nesta Figura que o compensador de pressão, fora da região linear busca manter o valor de eficiência na faixa nominal. Isto permite uma maior economia de combustível, debitando mais  $H_2$  apenas quando desejado. Esta característica do controlador favorece a seletividade do nível de eficiência desejado, dentro da região de interesse e nos limites possíveis de serem atingidos, considerando a faixa de pressão nominal da CaC.

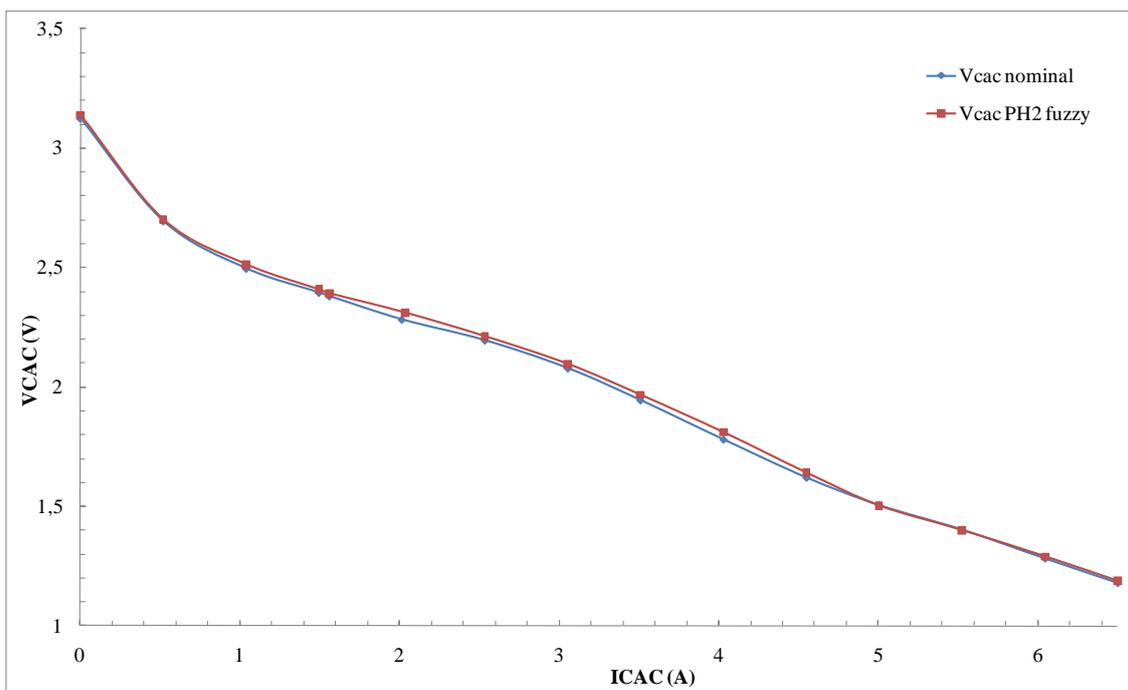


Figura 5.11 – Resposta do controlador fuzzy da  $P_{H_2}$  sobre a característica  $VxI$

### 5.3.2 Controlador fuzzy para o fluxo do ar de entrada ( $Q_{ar}$ )

O projeto do controlador fuzzy para o fluxo de ar segue os mesmos preceitos estabelecidos para o controlador da  $P_{H_2}$ .

Na Figura 5.12 tem-se a estrutura geral do controlador fuzzy e a função de pertinência para a saída fuzzy do fluxo de ar. Na Figura 5.13 a distribuição das funções de pertinência do  $Q_{ar}$  é homogênea. Para o  $Q_{ar}$ , a faixa selecionada é de 140 a 1200 L/min.

O gráfico de superfície da Figura 5.14 apresenta a resposta do compensador fuzzy para  $Q_{ar}$ . É observado que durante o desenvolvimento do algoritmo de controle do  $Q_{ar}$ , considera-se o aumento do débito de ar dentro da região de interesse. Portanto, nota-se que a superfície é mais acentuada na porção central da característica  $VxI$ .

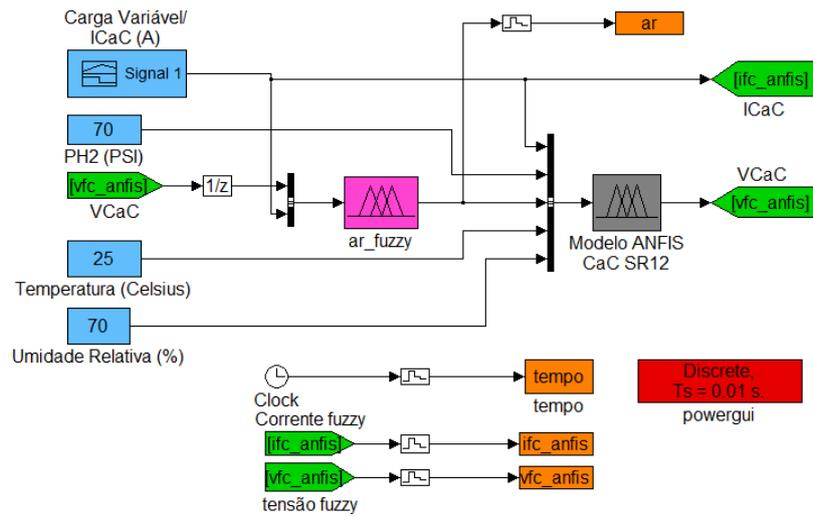
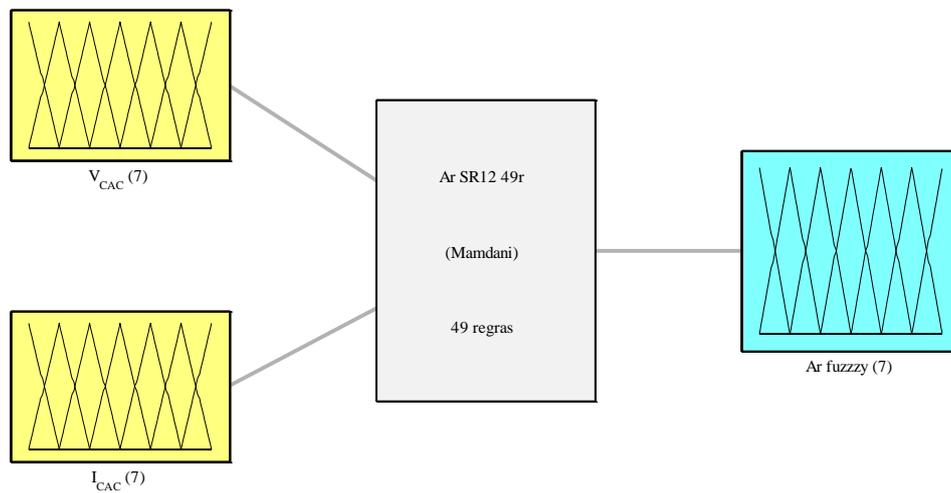


Figura 5.12 – Modelo ANFIS e controle fuzzy para o fluxo de ar



Sistema controle fuzzy ar para SR12: 2 entradas, 1 saída, 49 regras

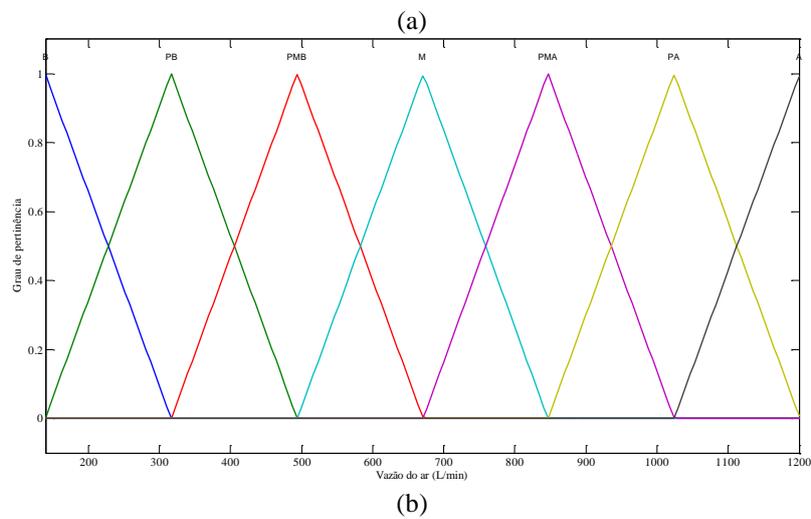


Figura 5.13 – (a) Estrutura geral e (b) Função de pertinência de saída do controlador de  $Q_{ar}$

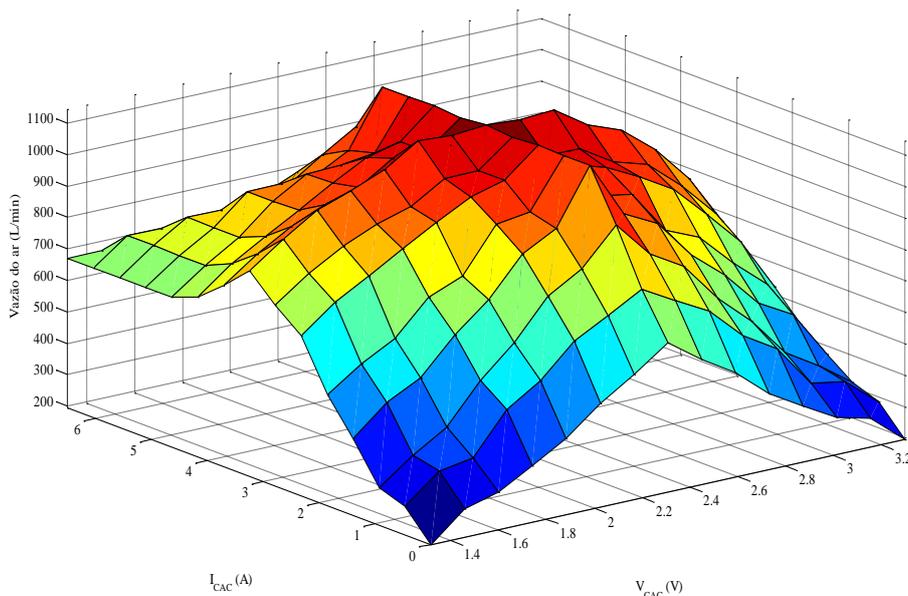


Figura 5.14 – Gráfico de superfície para o bloco de regras do fluxo de ar

Na Figura 5.15 apresenta-se a resposta da curva de eficiência  $V \times I$  compensada quando comparada com a curva nominal. Nesta Figura, o ganho de eficiência simulado na região de 2 a 4 A (região linear) é de, aproximadamente, 21%.

Como efeito do algoritmo fuzzy projetado, observa-se na Figura 5.15 que nas regiões de perdas por ativação e de concentração a eficiência é reduzida. Comparando-se com o gráfico de superfície da Figura 5.14 conclui-se que isto é um efeito da redução do fluxo de ar aplicado nesta região.

Como o ventilador que fornece o ar de reação para a célula é controlado por este algoritmo, pode-se concluir que a redução no fluxo debitado é causada pela redução de velocidade do bombeamento de ar nas regiões desejadas. Esta redução de ar pode ser traduzida como o controle da energia despendida com o equipamento auxiliar de bombeamento de ar. Este dispositivo auxiliar da CaC é um recurso adicional para economia de energia, uma vez que o ventilador do ar de reação é acionado em sua máxima capacidade quando necessário, isto é, quando deseja-se que o controle do ar insuflado proporcione uma elevação da eficiência do gerador.

A Figura 5.16 mostra a resposta do controlador fuzzy do fluxo de ar comparado com a manutenção do ventilador quando bombeando 540 L/min de ar (valor assumido como nominal da pilha) e 1200 L/min (valor assumido como máximo fluxo de ar possível). A economia média calculada da energia consumida pelo ventilador na região

linear com relação ao débito máximo de ar aproxima-se de 17% com o uso do controlador fuzzy em relação ao ventilador de ar.

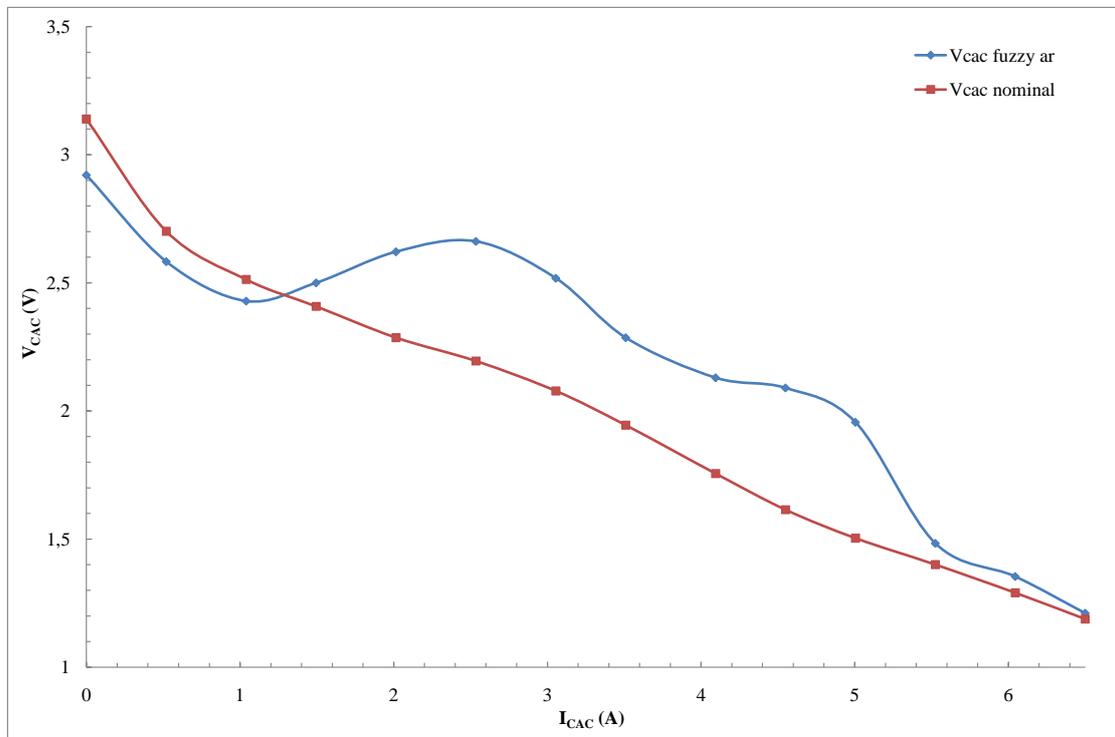


Figura 5.15 – Resposta do controlador fuzzy do fluxo de ar sobre a característica  $VxI$

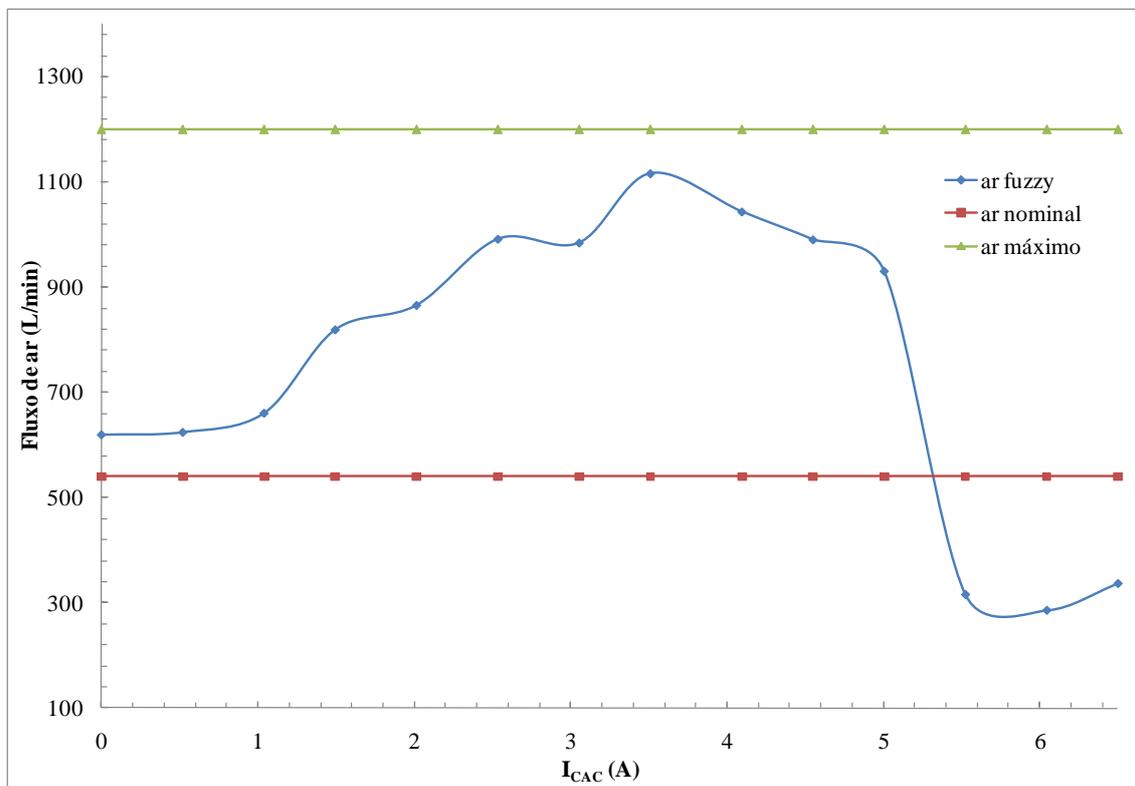


Figura 5.16 – Resposta do controlador fuzzy do fluxo de ar

### 5.3.3 Controlador fuzzy para a temperatura do ar de reação ( $T_{ent}$ )

Para projetar o controlador de temperatura uma consideração é feita: a de que a temperatura é um fator crítico em reações químicas. Tendo isso em vista, o controlador fuzzy neste trabalho considera que a temperatura acima do valor nominal é benéfica para tais reações.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 tem-se a estrutura geral do simulador, do controlador e da respectiva função de pertinência da saída fuzzy de temperatura. Como nos demais casos, a distribuição das funções de pertinência da temperatura do ar de entrada é homogênea. A temperatura do ar de entrada considera uma variação entre 23 e 43°C.

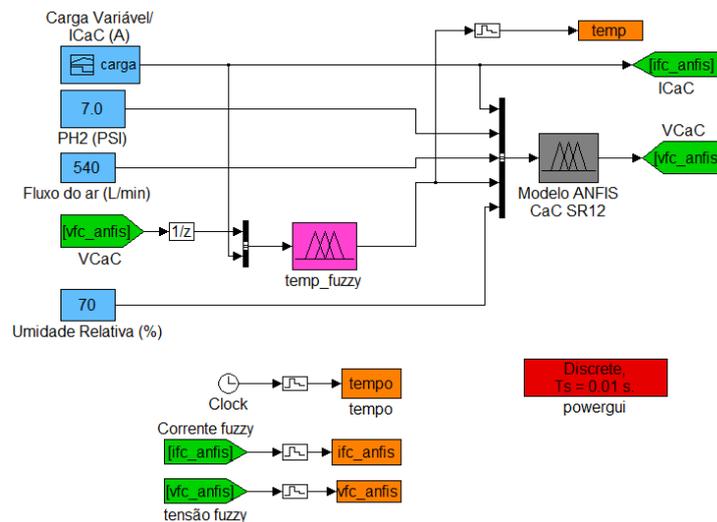
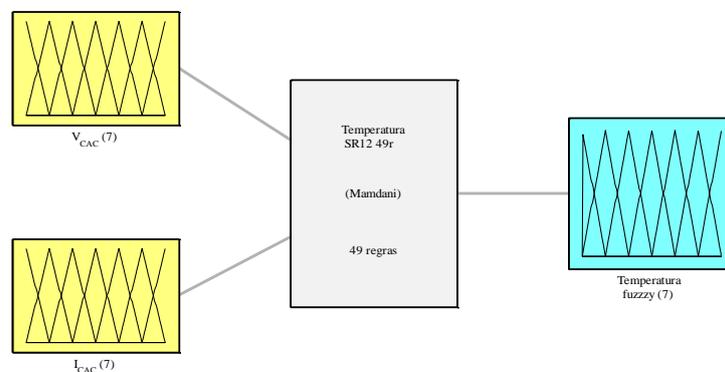


Figura 5.17 – Modelo ANFIS e controle fuzzy da temperatura do ar de reação



Sistema de controle da temperatura SR12: 2 entradas, 1 saída, 49 regras

(a)

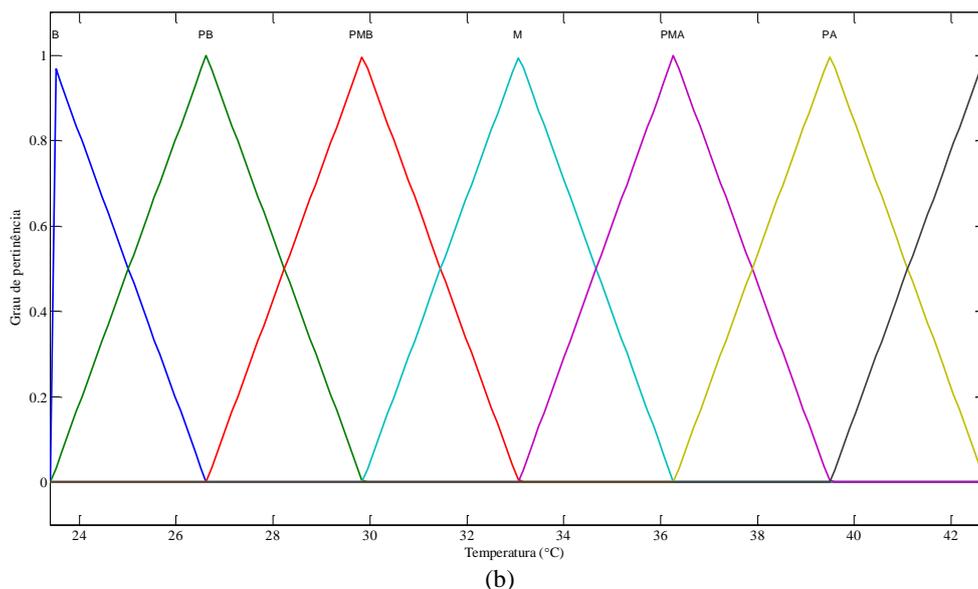


Figura 5.18 – (a) Estrutura geral do controle e (b) Função de pertinência de saída do controle de temperatura

A Figura 5.19 apresenta o gráfico de superfície para o bloco de regras que controla a temperatura do ar de reação na entrada. Como observado, o aquecimento da CaC é priorizado de forma a oferecer um aquecimento adequado às reações eletroquímicas internas.

A Figura 5.20 apresenta o ganho de eficiência obtido. Neste caso, o ganho de eficiência médio simulado, na região de interesse é de 17%, aproximadamente.

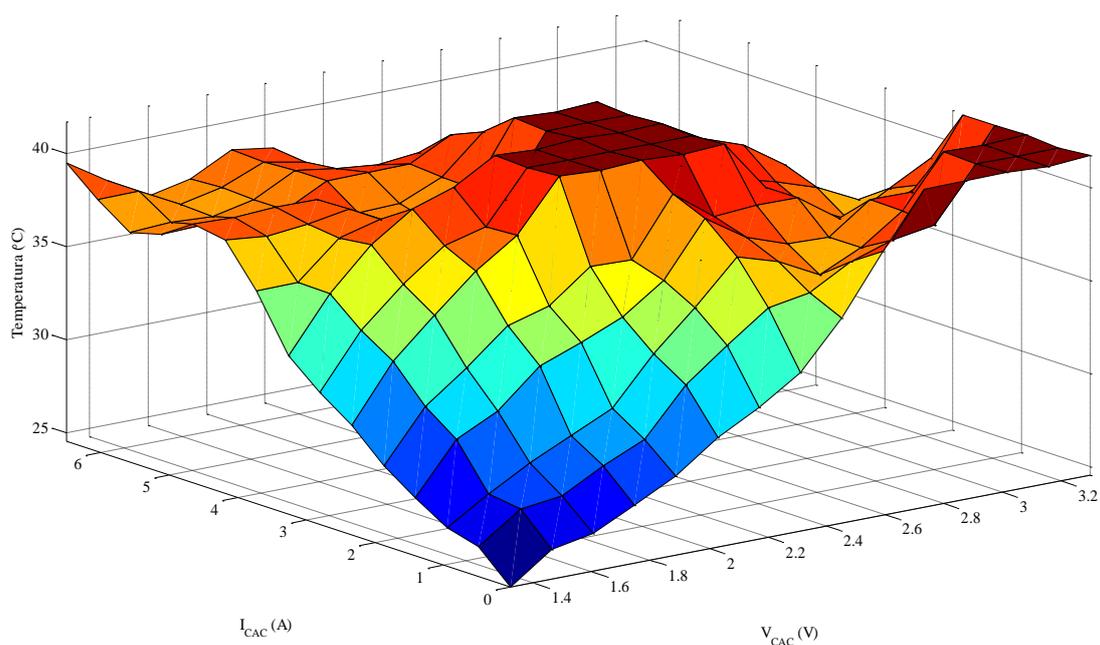


Figura 5.19 – Gráfico de superfície para o bloco de regras da temperatura

A Figura 5.21 apresenta a resposta do controlador de temperatura em comparação com os seus respectivos valores, nominal e máximo. Neste caso, durante o projeto é tomado um compromisso entre economia da energia de aquecimento e a promoção eficaz das reações.

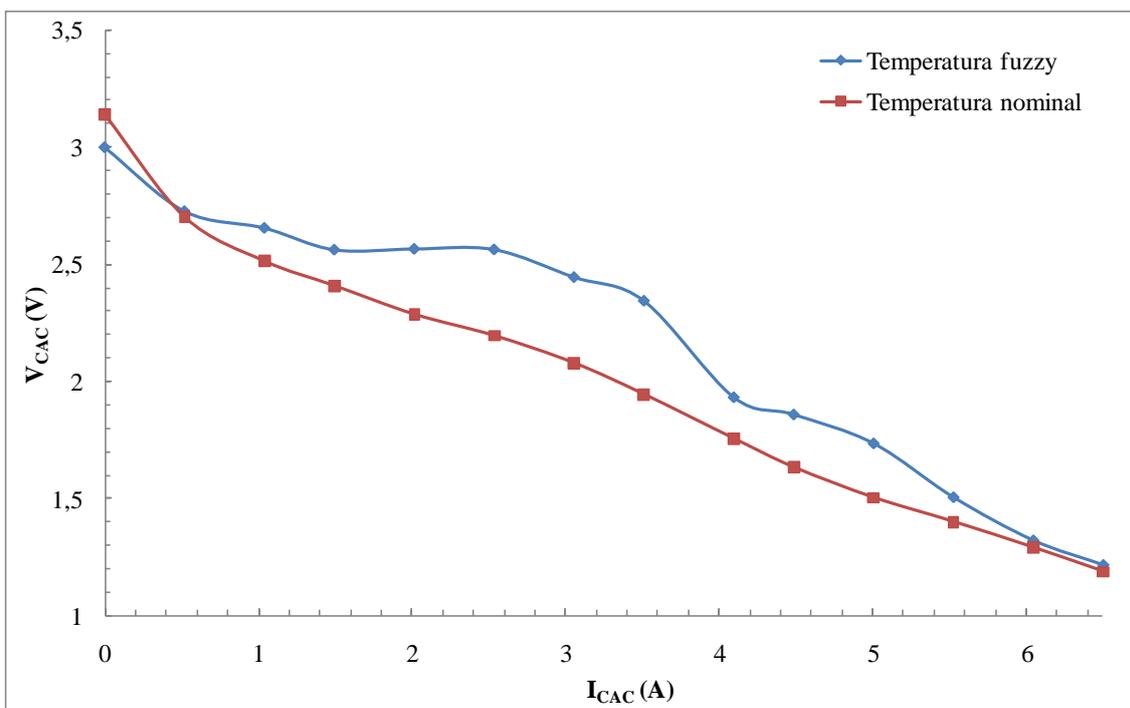


Figura 5.20 – Resposta do controlador fuzzy da temperatura sobre a característica  $VxI$

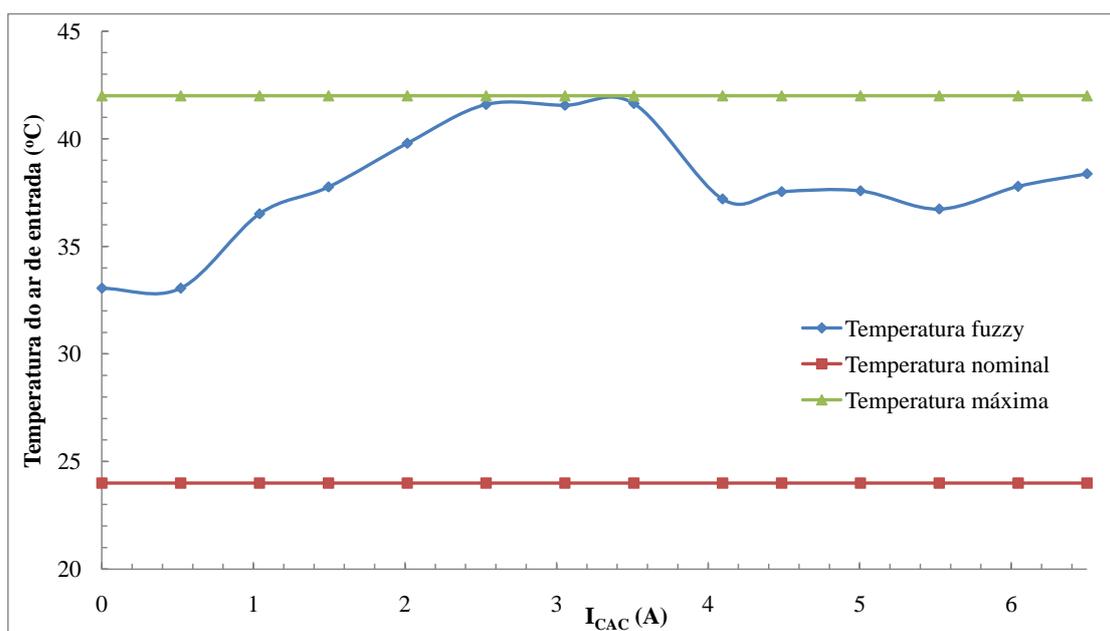


Figura 5.21 – Resposta do controlador fuzzy da temperatura

A economia energética de calor na região linear da curva  $VxI$  encontra-se na faixa de 1,1%, quando comparado com o seu valor máximo. Porém, fora da região linear, a energia média economizada (simulada) com um elemento aquecedor passa para, aproximadamente, 10,6%.

#### 5.3.4 Controlador fuzzy para a umidade relativa ( $UR$ )

As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam o simulador, a estrutura geral do controlador fuzzy para a umidade relativa e sua respectiva função de pertinência de saída. Como nos testes anteriores, a distribuição das funções de pertinência para a umidade relativa do ar de entrada é homogênea. Como é comprovado pela análise comportamental da CaC, opta-se por distribuir a umidade relativa dentro da faixa de 70 a 80%, neste caso.

A Figura 5.24 mostra o gráfico de superfície para o controlador da umidade relativa. Neste gráfico, observa-se que são priorizados níveis de umidade mais elevados na região linear da curva característica da CaC.

O ganho de eficiência obtido pela manipulação da umidade relativa é de, aproximadamente, 14%. Este ganho é verificado no gráfico da Figura 5.25. A Figura 5.26 mostra a resposta da saída fuzzy para a umidade relativa, comparada com seus valores estáticos, nominal e máximo.

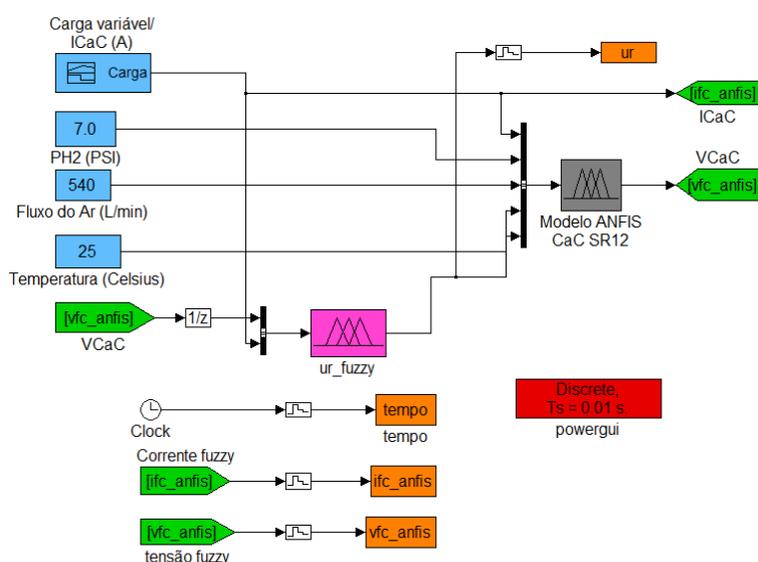
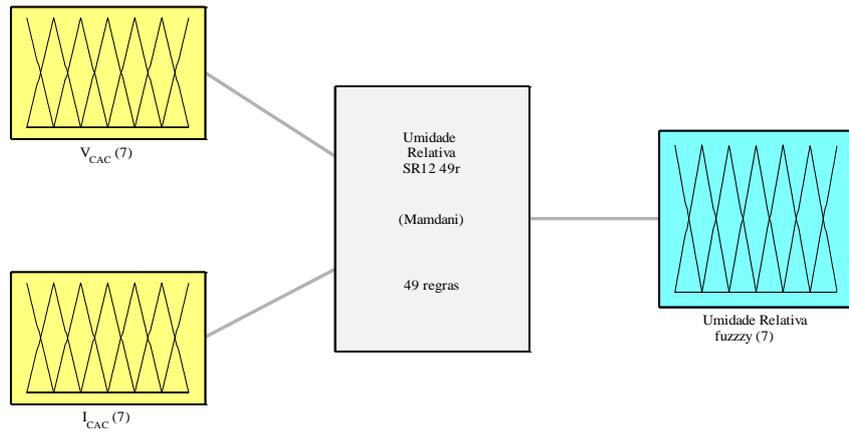
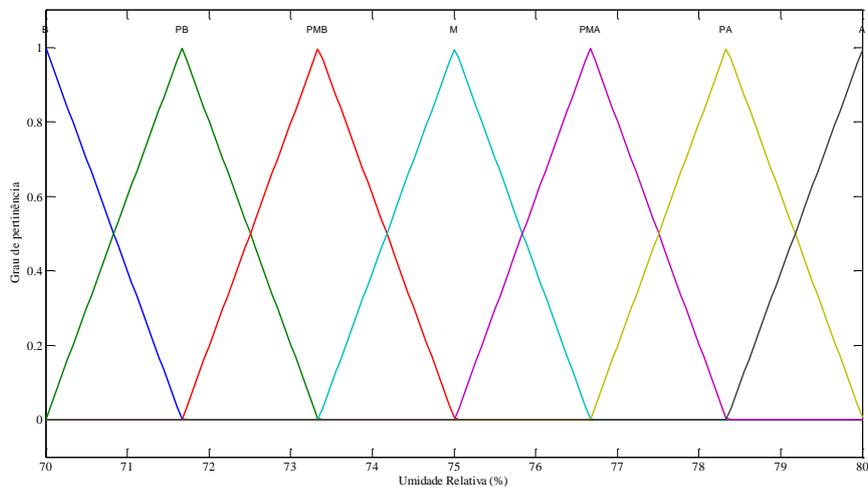


Figura 5.22 – Modelo ANFIS e controle fuzzy da umidade relativa



Sistema controle fuzzy Umidade Relativa para SR12: 2 entradas, 1 saída, 49 regras

(a)



(b)

Figura 5.23 – (a) Estrutura geral do controle e (b) Função de pertinência do controle de umidade relativa

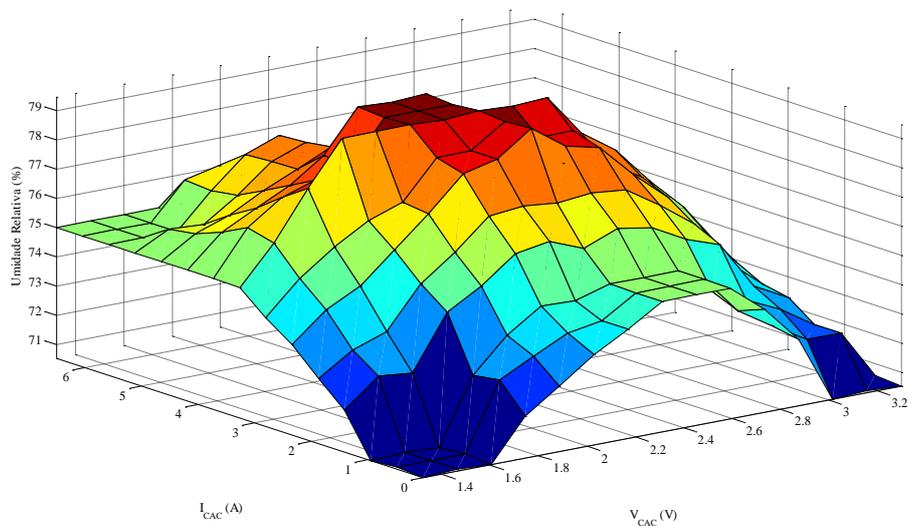


Figura 5.24 – Gráfico de superfície para o bloco de regras da umidade relativa

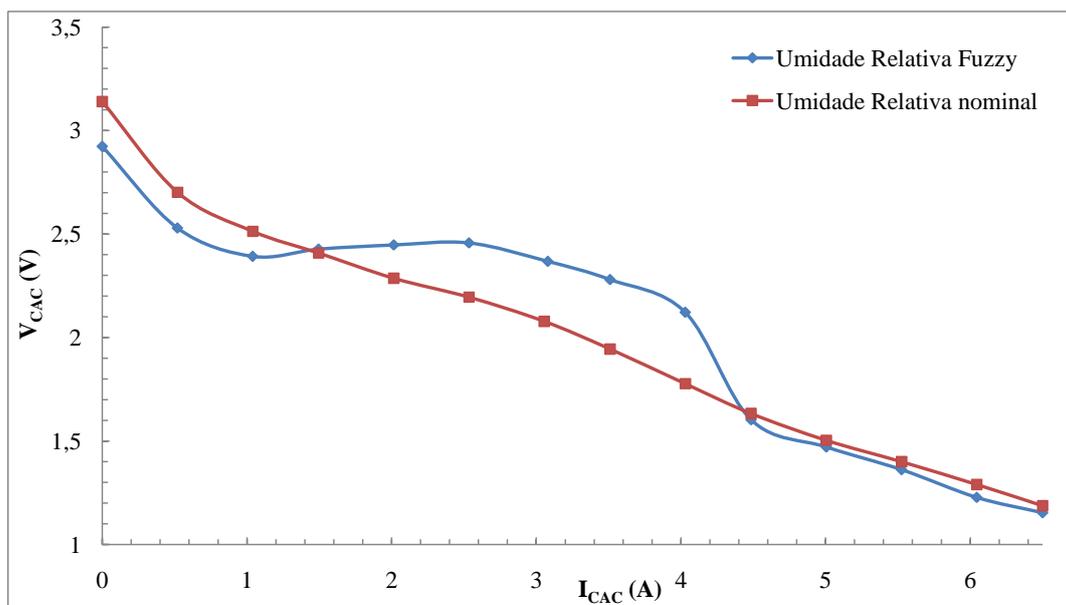


Figura 5.25 – Resposta do controlador fuzzy da umidade sobre a característica  $VxI$

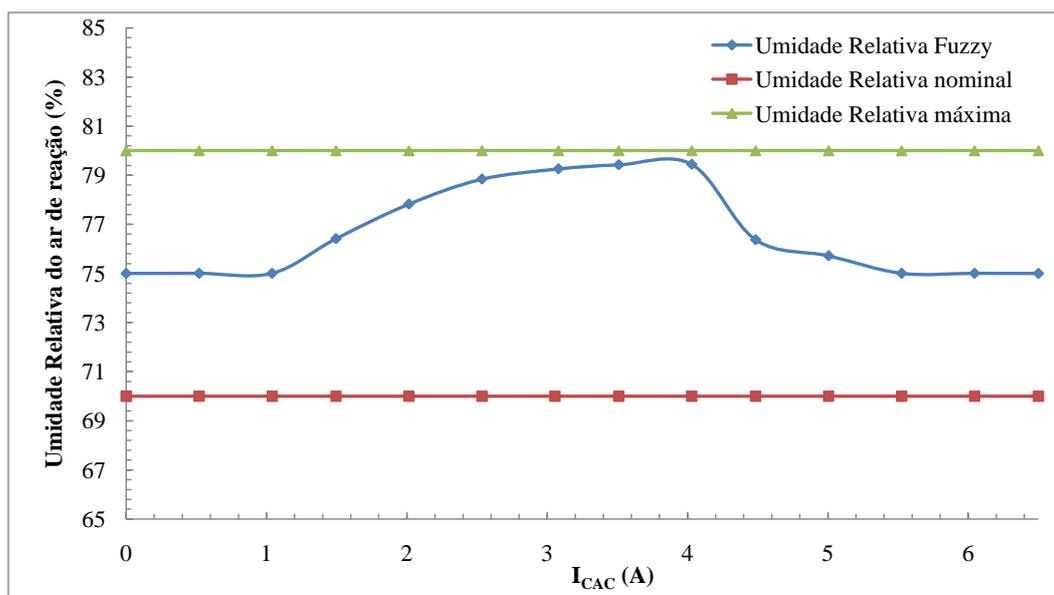


Figura 5.26 – Resposta do controlador fuzzy umidade relativa do ar de reação

### 5.3.4 Controle fuzzy integrado

Nesta etapa, os controladores das variáveis de entrada são aplicados simultaneamente, de forma a permitir níveis mais elevados de eficiência dentro da região de operação linear da CaC. As funções de pertinência das entradas e saídas são as

mesmas apresentadas nos itens anteriores. A Figura 5.27 apresenta o diagrama do simulador em Matlab/Simulink™.

Nesta etapa da avaliação do compensador fuzzy integrado, os blocos de regras das variáveis de controle recebem revisões de forma a operarem de forma adequada. Esta revisão nos blocos de regras dá-se em virtude de que são observados comportamentos indesejados durante as simulações, tais como picos excessivos, desvios de tensão e mesmo redução da eficiência em relação ao objetivo inicial, caso mantidos os blocos de regras originais. A Figura 5.28 apresenta os novos gráficos de superfície correspondentes às alterações nos blocos de regras das variáveis. De forma geral, poucas regras de cada bloco são alteradas. No entretanto, modificações são efetuadas com base nas mesmas premissas feitas para o desenvolvimento dos controladores anteriores: obtenção do maior nível de eficiência na região de interesse e menor desperdício de reagentes e energia com os equipamentos auxiliares.

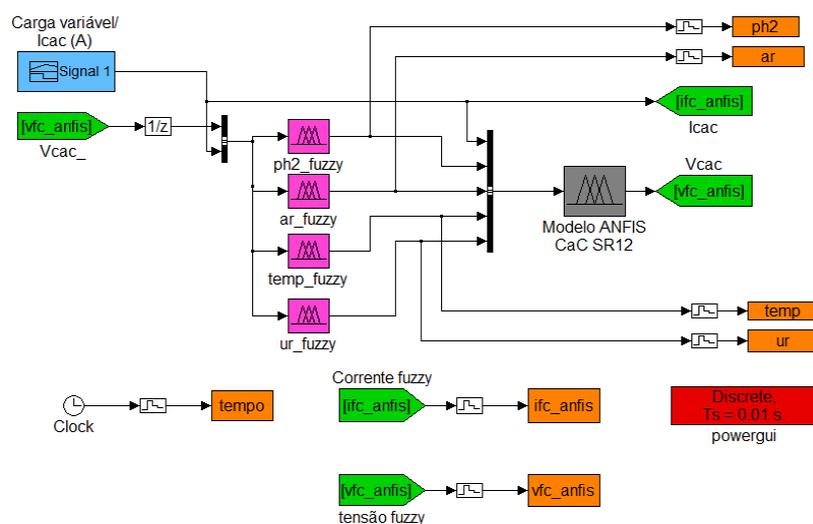


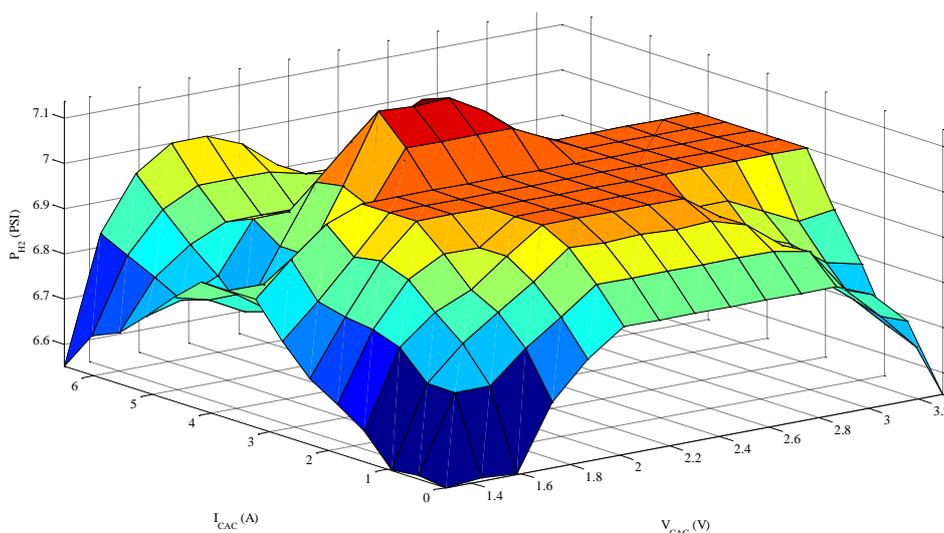
Figura 5.27 – Modelo ANFIS e controle simultâneo das variáveis externas

Conforme mostra a Figura 5.28 (a), a modificação feita com relação ao diagrama da Figura 5.10 é realizada no sentido de se manter mais estável a  $P_{H_2}$  ao longo de maior parte da faixa de operação linear da curva característica da CaC. Como a análise comportamental da CaC demonstra, a  $P_{H_2}$  tem menor impacto sobre a eficiência. Portanto, neste trabalho opta-se por manter a  $P_{H_2}$  em torno de seu valor nominal (7 PSI), sem elevá-la até o seu valor máximo. Isso permite reduzir o desperdício de  $H_2$ .

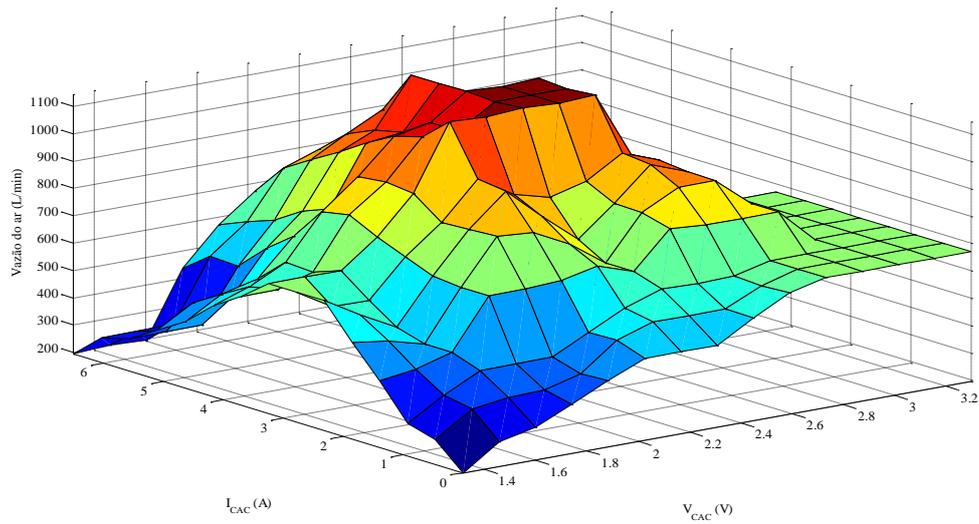
A modificação da compensação do fluxo de ar na figura 5.28 (b) com relação à Figura 5.14, é feita no sentido de se compatibilizar a operação com as demais variáveis. Conforme se observa, pela comparação dos gráficos de superfície, o novo bloco de regras recebe reduções no débito de ar total. Essa otimização é capaz de manter o fluxo de ar de forma adequada, nivelando a eficiência desejada e minimizando o gasto de energia com o ventilador. Além disso, as reduções do fluxo evitam o ressecamento excessivo da membrana, reduzindo a necessidade de se elevar os níveis de hidratação.

Os blocos de regras para a temperatura (Figuras 5.19 e 5.28 (c)) demonstram que as alterações são realizadas no sentido de favorecer as reações eletroquímicas do gerador. A atualização do bloco de regras (Figura 5.38 (c)) promove uma equalização da temperatura do ar de reação da entrada (região mais plana) ao longo da região linear de operação da curva. Nas Figuras 5.24 e 5.28 (d) observa-se que os blocos de regras para o gerenciamento da umidade relativa do ar de entrada sofrem poucas correções. Essas alterações não são significativas durante os testes simulados devido à reprogramação prévia dos demais compensadores.

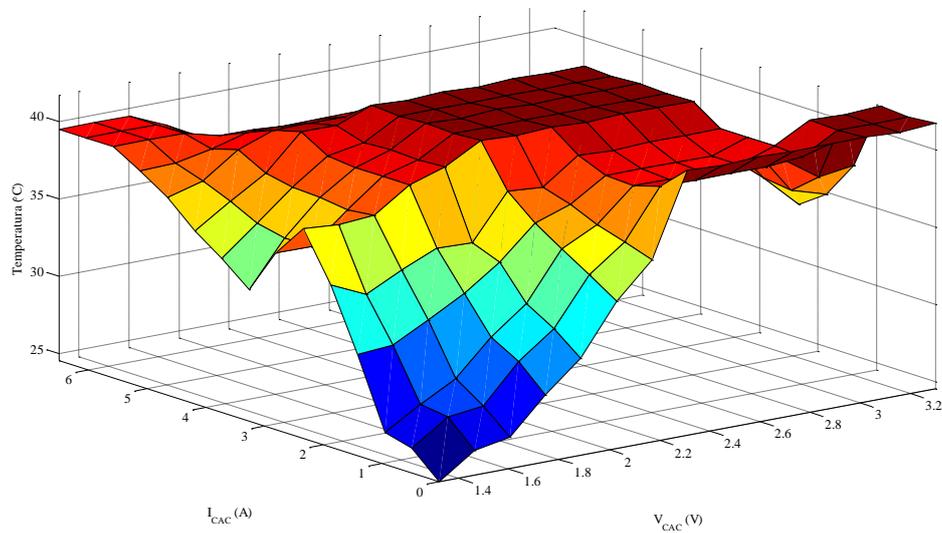
A Figura 5.29 compara o ganho simulado de eficiência com o valor nominal de operação da CaC. Na mesma figura apresenta-se o gráfico de comportamento da CaC para um suposto caso em que todas as variáveis (pressão, fluxo, temperatura e umidade) são mantidas em seus valores máximos.



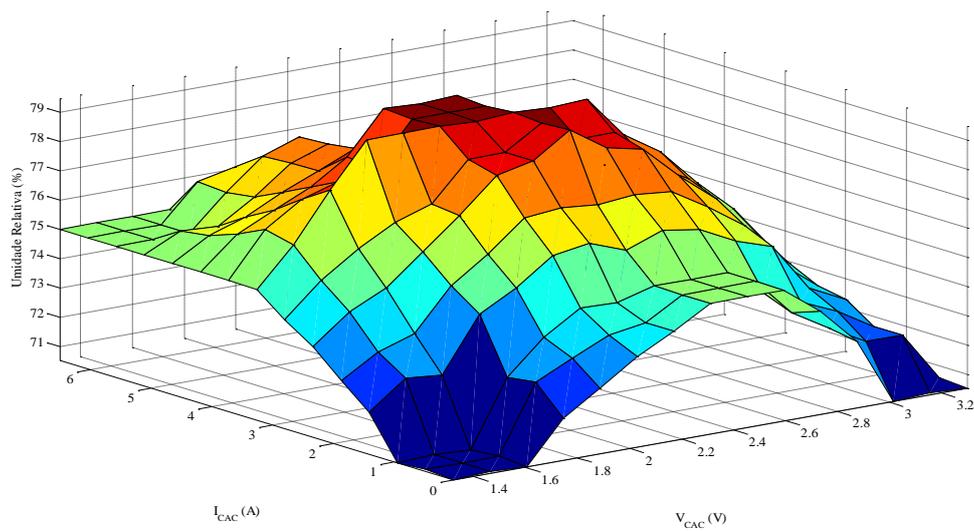
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.28 – Gráficos de superfície otimizados para (a)  $P_{H_2}$ , (b)  $Q_{ar}$ , (c)  $T_{ent}$  e (d)  $UR$

Na região linear de operação, o ganho de eficiência, chega a ser (em média) 23% maior que o valor da CaC operando com parâmetros nominais. Se todas as grandezas operacionais do gerador fossem mantidas em seus valores máximos sem uso dos compensadores fuzzy, o ganho de eficiência nesta região seria de 28%. Entretanto, apesar desta eficiência maior, um fator relevante seria perdido: a economia de reagentes e da energia dispensada com periféricos (ventilação, aquecimento e outros).

É preciso ressaltar que este ganho de eficiência reflete-se também no ganho de potência da CaC. Por exemplo, na região linear, a potência máxima pode sofrer um acréscimo de até 23% com relação aos valores nominais quando se usa o controle fuzzy.

No caso da CaC estudada aqui, pode-se passar de 6,3 para 7,8 W (média). Em condições nominais, esta potência final só seria atingida na região onde as perdas por difusão são mais intensas e a eficiência, por consequência, menor.

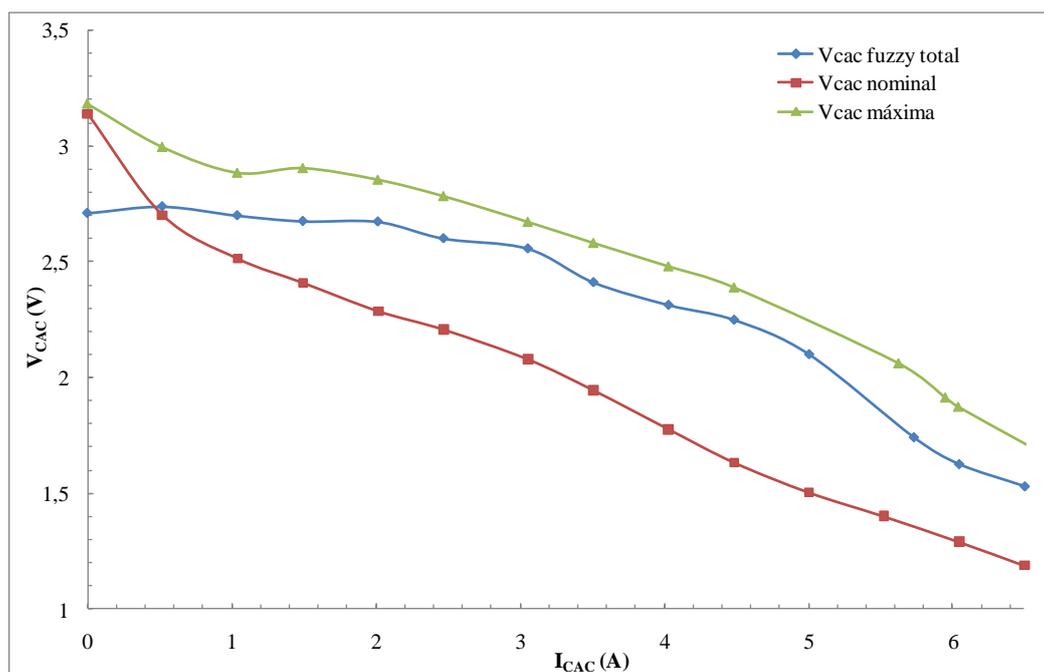


Figura 5.29 – Ganho de eficiência dos controladores integrados

A Figura 5.30 apresenta o gráfico com os efeitos projetados dos compensadores de  $P_{H_2}$  comparados com os valores nominal e máximo (fixos). Pode-se ver que o controlador atualizado mantém a pressão do combustível estável em torno do seu valor nominal. Pode-se ver que, ambos os controladores buscam manter a pressão em valores

próximos da nominal sem atingir a pressão máxima admissível. Isso permite atingirem-se dois resultados: manter a eficiência no nível desejado e adequar o consumo.

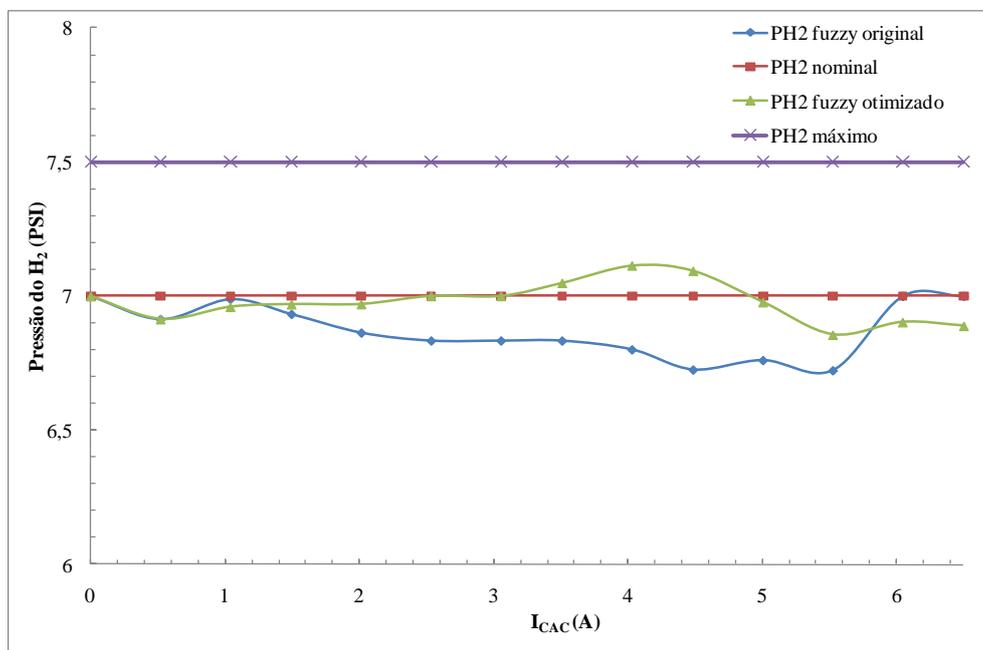


Figura 5.30 – Atuação dos controladores fuzzy para a  $P_{H_2}$

A Figura 5.31 mostra os efeitos do controle do fluxo de ar original e adaptado para a operação integrada com os demais controladores. Observa-se nesta figura que as respostas às alterações feitas no bloco de regras original não divergiram significativamente da resposta inicial.

A Figura 5.32 mostra os efeitos do controle do fluxo de ar original e adaptado para operação integrada com os demais controladores. Neste gráfico se compara as diferenças entre as respostas obtidas para os diferentes controladores fuzzy desenvolvidos. Observa-se que o controlador atualizado permite uma faixa de aquecimento muito mais estreita e dentro da região linear de operação do gerador. Neste caso, os efeitos das mudanças nos blocos de regras são mais perceptíveis o que pode, em primeira instância, ser constatado pela análise dos gráficos de superfície das Figuras 5.19 e 5.28 (c).

A Figura 5.33 mostra os controladores da umidade relativa do ar de entrada. As respostas de ambos os controladores são idênticas já que foram mínimas as alterações nos blocos de regras original e otimizado para a operação integrada. Os testes em

simulador apontam que o bloco de regras original tem sua estrutura adequada à operação integrada com os demais controladores.

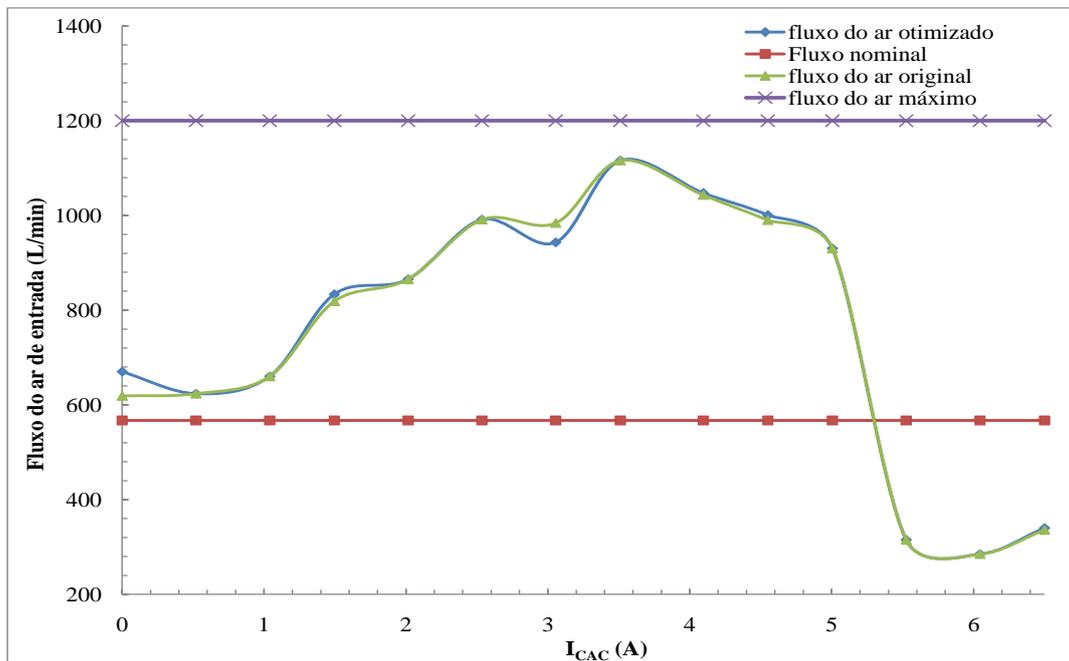


Figura 5.31 – Atuação dos controladores fuzzy para o fluxo do ar

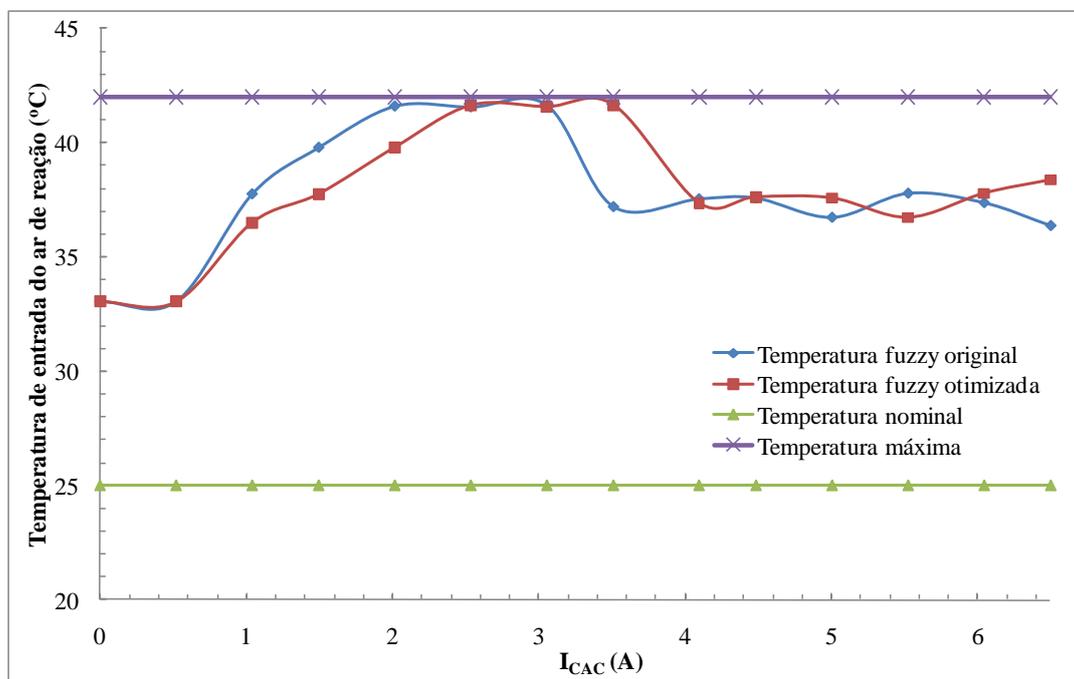


Figura 5.32 – Atuação dos controladores fuzzy para a temperatura

Ressalta-se que os ganhos de eficiência observados com os testes simulados não são cumulativos. Isto é, não é usar controladores em cascata de forma a se obter valores

de eficiência superiores. Cada controle é heurísticamente ajustado para prover as condições desejadas de operação do gerador e integração com os demais controladores.

Todavia, as simulações teóricas até aqui apresentadas comprovam a hipótese inicial desta tese de que é possível ajustar as variáveis externas da CaC de forma a se obter maiores níveis de eficiência sem comprometimento do consumo de combustível. Porém, a metodologia de desenvolvimento dos compensadores aplicada requer um conhecimento prévio do comportamento do gerador.

Como contrapartida da técnica aqui abordada, observa-se que é possível atingir um nível maior de potência da célula dentro da região linear de operação do gerador.

Como visto, em condições nominais de operação (sem os compensadores fuzzy), esta faixa de potência apenas seria atingida operando-se a CaC na região final de sua característica  $V \times I$  com uma eficiência bastante reduzida e consumo maior de  $H_2$ .

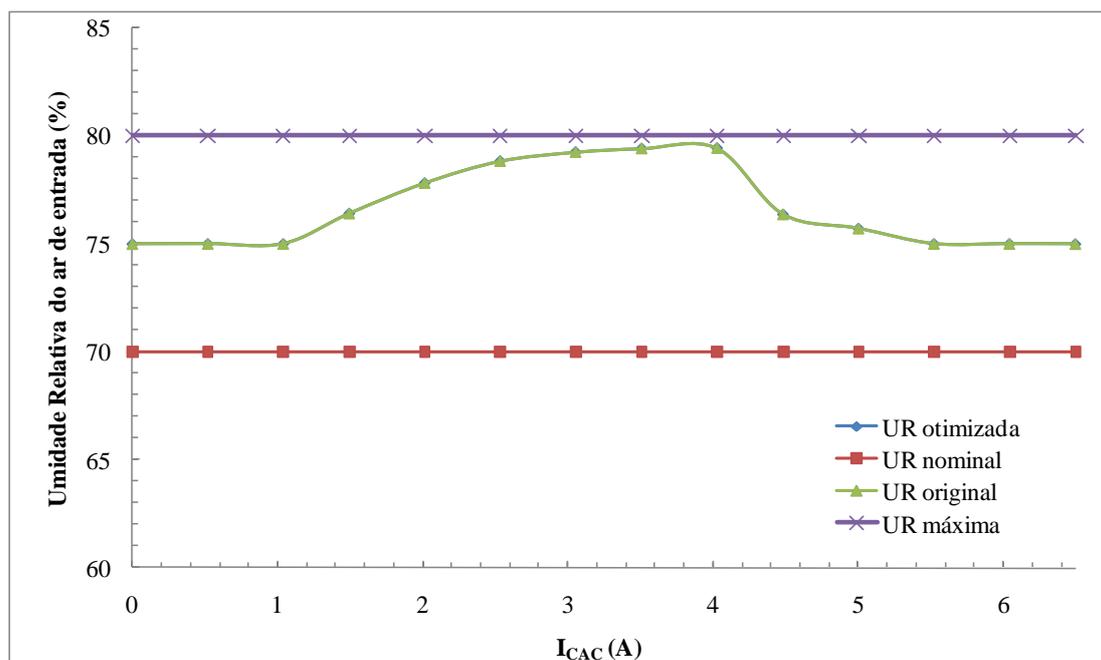


Figura 5.33 – Atuação dos controladores fuzzy para a umidade relativa

#### 5.4 Avaliação experimental do controlador fuzzy

O modelo ANFIS do gerador de CaC SR12 desenvolvido e utilizado até esta etapa presta-se para o desenvolvimento e teste simulado do projeto dos controladores fuzzy a serem aplicados à CaC real. Em teoria, é possível atingirem-se valores

superiores a 20% de eficiência na CaC pelo ajuste simultâneo dos seus parâmetros de entrada. Neste item, são apresentados resultados práticos que usam como referência a CaC real no interesse de validar os dados teóricos obtidos. São apresentadas aqui as respostas reais dos compensadores operando isoladamente e integrados de forma análoga àquela usada para a obtenção dos resultados simulados. Além disso, são comparadas as respostas teóricas com as experimentais dos respectivos controladores.

Para a aplicação experimental dos controladores, os blocos de regras teóricas são transferidos para o ambiente LabVIEW™ por meio do *NI LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit*. Esta ferramenta permite construir blocos de regras fuzzy de forma simples e rápida, agilizando o processo de implementação e de correção de erros. Os controladores fuzzy transferidos são aqueles otimizados na segunda fase apresentada.

Para os ensaios práticos, devido à dificuldade de estabilização da CaC, opta-se por tomar valores em intervalos de 0,5A em intervalos de tempo de 60 s. Isso permite aumentar a confiabilidade dos valores finais obtidos dado os intervalos de acomodação da tensão terminal após a alteração das variáveis de entrada guiadas pelo controlador fuzzy. No caso prático, seis grupos de ensaios foram realizados para validar o estudo teórico desta tese. Estes grupos de ensaios foram organizados da seguinte forma:

1. Condições nominais de operação;
2. Controle da  $P_{H_2}$  e demais variáveis para seus valores nominais;
3. Controle de  $Q_{ar}$  e demais variáveis para seus valores nominais;
4. Controle da temperatura e demais variáveis para seus valores nominais;
5. Controle da  $UR$  e demais variáveis para seus valores nominais;
6. Controle das variáveis simultaneamente.

Após realizar os testes de cada grupo faz-se o ensaio que corresponde de forma mais adequada à condição do teste. Os erros admitidos nas leituras das variáveis para a realização dos ensaios são:

1. para a  $P_{H_2}$  :  $\pm 2\%$ ;
2.  $Q_{ar}$  :  $\pm 5\%$ ;
3. Temperatura do ar de entrada:  $\pm 5\%$ ;
4.  $UR$  :  $\pm 3\%$ ;

Os valores nominais práticos de operação da CaC adotados aqui são definidos na Tabela 6.1. Os ganhos de eficiência práticos obtidos são calculados em comparação com uma curva nominal de referência.

#### 5.4.1 Controlador fuzzy experimental para a $P_{H_2}$

A Figura 5.34 mostra a resposta real da CaC com o gerenciamento de  $H_2$  em comparação com o valor nominal. O ganho de eficiência na região linear da curva  $VxI$  em relação à característica nominal neste caso é de 1,5 %, aproximadamente. Este valor encontra-se um pouco acima do valor esperado nas simulações (1,1%). Este desvio se deve ao fato de a dinâmica real do gerador não ser absolutamente previsível por meio de simulações e em função das diferentes condições climáticas, as quais são bastante voláteis. Porém, se podem considerar os resultados simulados como adequados no sentido de oferecer uma estimativa média aproximada do ganho real de eficiência a ser obtido com a plataforma real. Além disso, verifica-se que a compensação, tanto com o simulador quanto com a experimentação real, a redução de pressão na linha é suficiente para garantir um pequeno acréscimo de eficiência, sem necessidade de se aplicar pressão máxima ao gerador.

A Figura 5.35 apresenta as respostas comparadas dos controladores com saídas real e simulada. A dinâmica real da célula dificulta uma reprodução precisa dos resultados simulados, porém observa-se que o valor corrigido da pressão ( $P_{H_2}$  fuzzy real) segue o valor de ajuste com um bom grau de proximidade. Como visto na Figura 5.34, esta atuação é suficiente para manter o nível de eficiência dentro da faixa desejada de valores.

A Figura 5.36 apresenta uma comparação entre as curvas de eficiência simulada e real. esta Figura mostra que o valor real apresenta um desvio no valor simulado em relação ao real. Novamente, aqui se pode considerar que as diferenças consequentes da dinâmica real impedem uma maior precisão. É necessário considerar que, na prática, uma estabilização absoluta das grandezas envolvidas é bastante complexa, o que também prejudica o controle exato dos processos correlacionados.

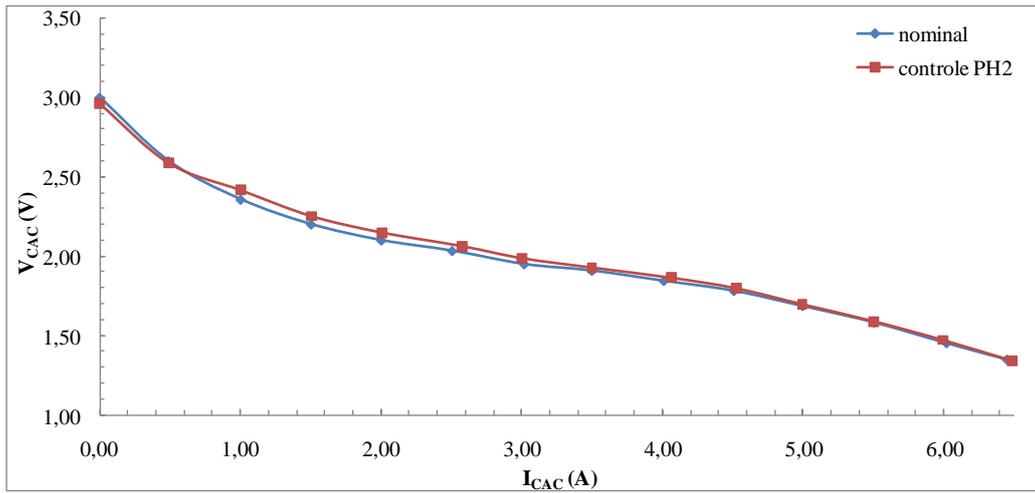


Figura 5.34 – Resposta real do controle fuzzy sobre a  $P_{H_2}$

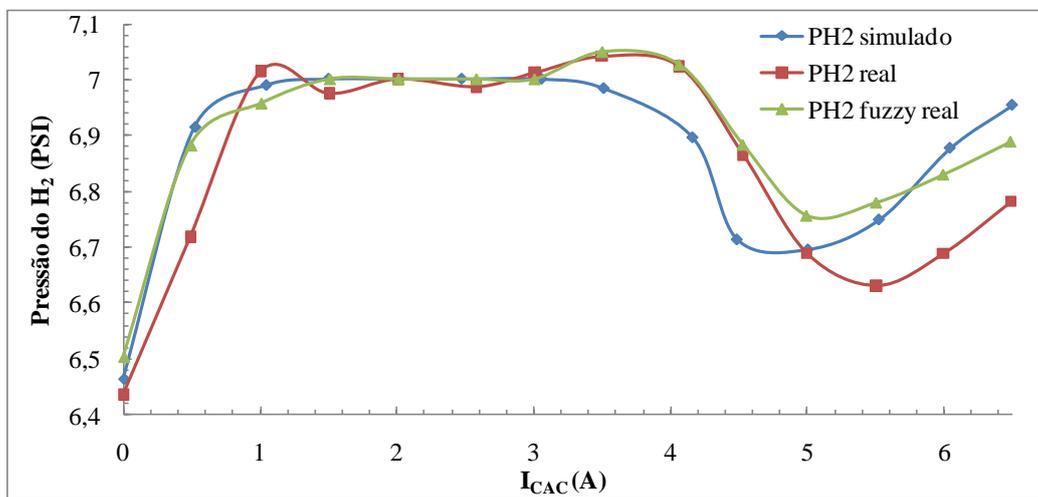


Figura 5.35 – Respostas dos controladores e saída real de  $P_{H_2}$

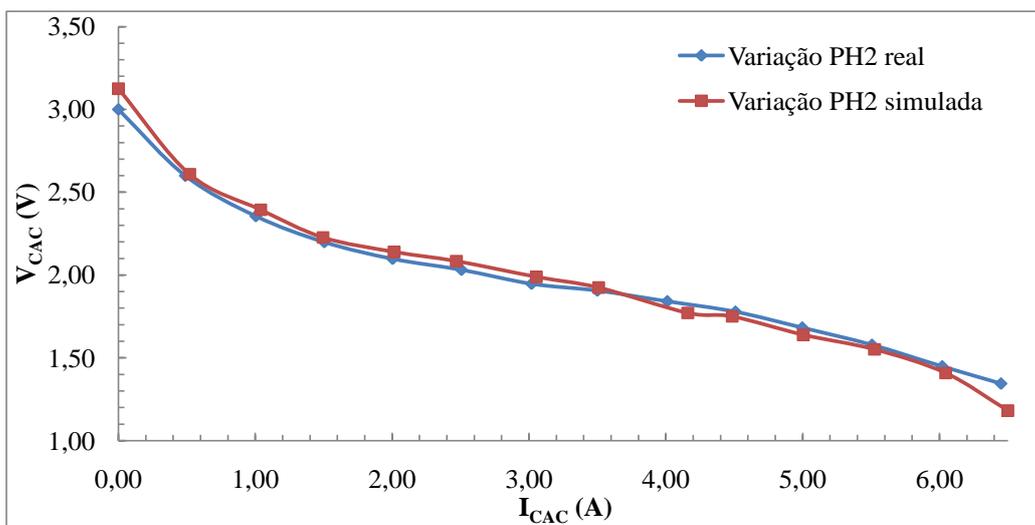


Figura 5.36 – Comparação entre a resposta simulada e a real

#### 5.4.2 Controlador fuzzy experimental para o fluxo do ar

As Figuras 5.37 a 5.39 mostram a atuação do controlador do fluxo de ar comparados com o valor nominal, as respostas dos controladores (simulada e real) e a comparação das respostas da característica  $V \times I$  (simulada e real), respectivamente.

No caso da eficiência real atingida, o seu valor médio, dentro da região de interesse da característica  $V \times I$ , aproxima-se de 17,5%. Este valor se encontra abaixo do estimado nas simulações (21%). Porém, pode-se dizer que este resultado é suficiente para comprovar a hipótese teórica estabelecida para o ganho de eficiência nesta região.

Deve-se considerar que, no gerador real, os efeitos do ressecamento da CaC não se comportam de forma tão idealizada quanto como no simulador. No simulador considera-se que as demais grandezas estão estabilizadas, o que não ocorre na prática.

Durante os experimentos, são evitadas compensações nas demais variáveis além dos valores necessários, que poderiam interferir nos resultados para o fluxo de ar. Como exemplo de uma compensação necessária encontra-se a  $P_{H_2}$ , que, como visto, sofre um decréscimo acentuado com o aumento da carga.

Na Figura 5.39 mostra-se que o simulador, mesmo baseado em um algoritmo neuro-fuzzy treinado com os valores reais da própria CaC reproduz de forma bastante próxima os valores reais. O erro aproximado entre os valores teóricos e práticos, neste caso, é de  $\pm 3,5\%$ .

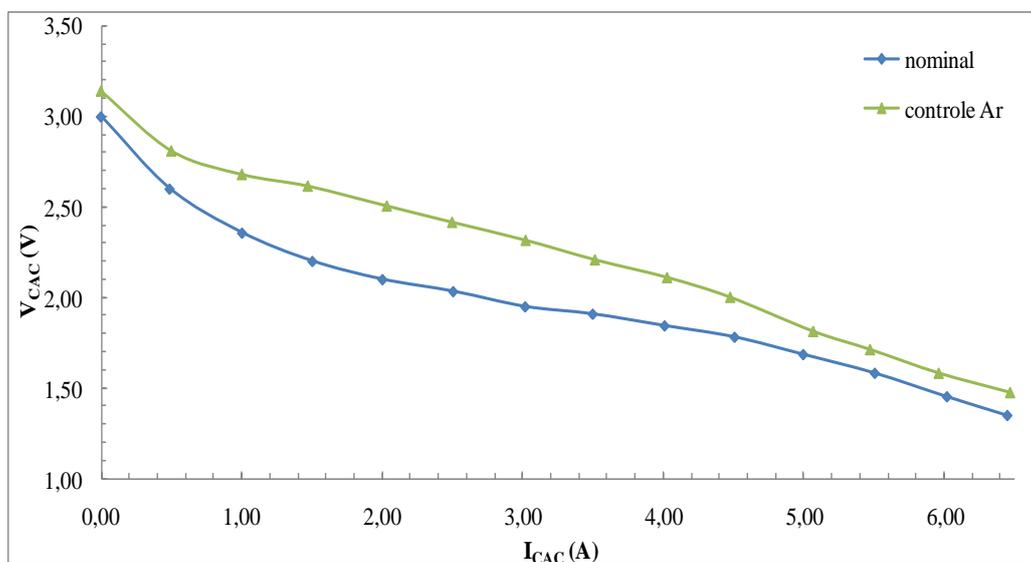


Figura 5.37 – Resposta real do controle fuzzy sobre o fluxo do ar

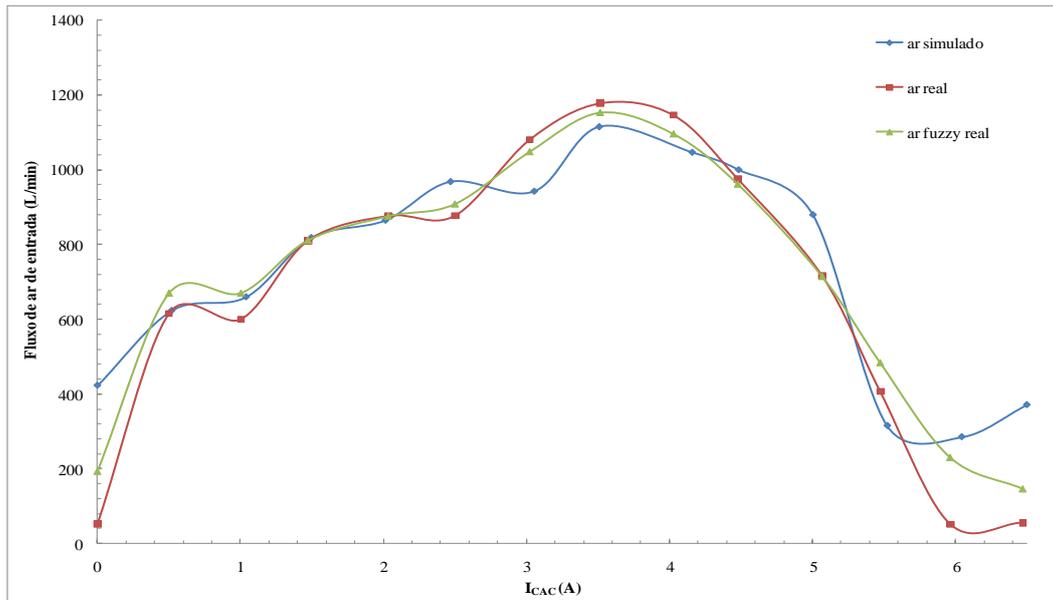


Figura 5.38 – Respostas dos controladores e saída real de fluxo do ar

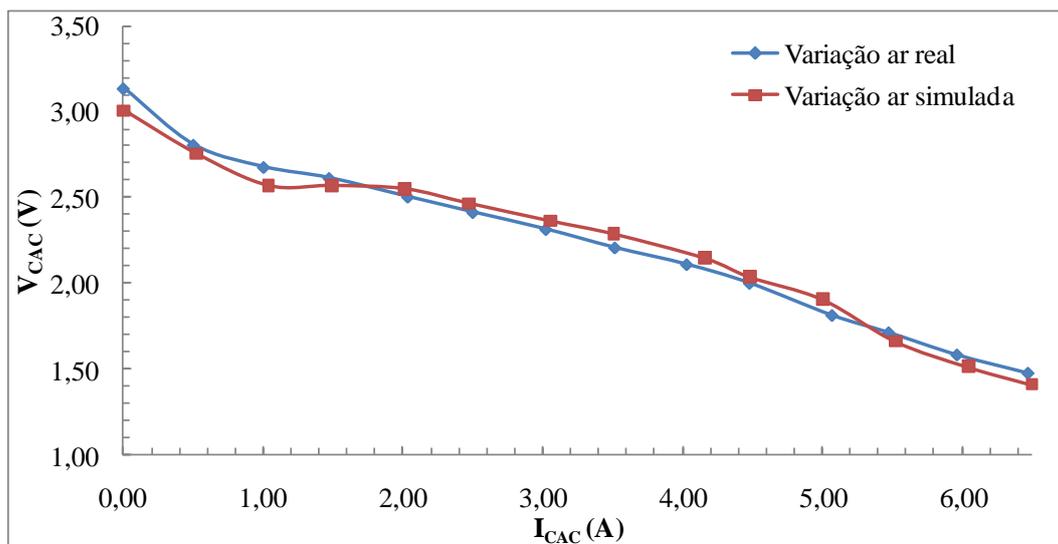


Figura 5.39 – Comparação entre a resposta simulada e a real para o fluxo do ar

#### 5.4.3 Controlador fuzzy experimental para a temperatura

As Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam os resultados da atuação do controlador de temperatura em comparação com o valor nominal da CaC, as respostas dos controladores (simulada e real) e a comparação das respostas da característica  $V \times I$  (simulada e real), respectivamente. O ganho prático de eficiência no caso da

temperatura é de 18,5%, aproximadamente. O ganho estimado durante as simulações é de 17 %. Na figura 5.41 observa-se uma boa concordância entre os valores de saída simulados e os reais para este controlador.

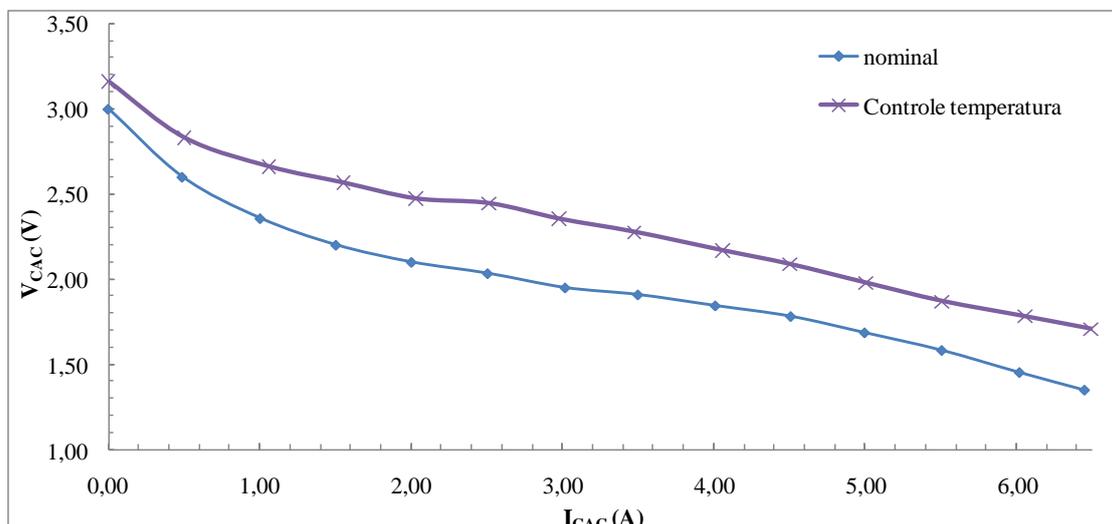


Figura 5.40 – Resposta real do controle fuzzy sobre a temperatura

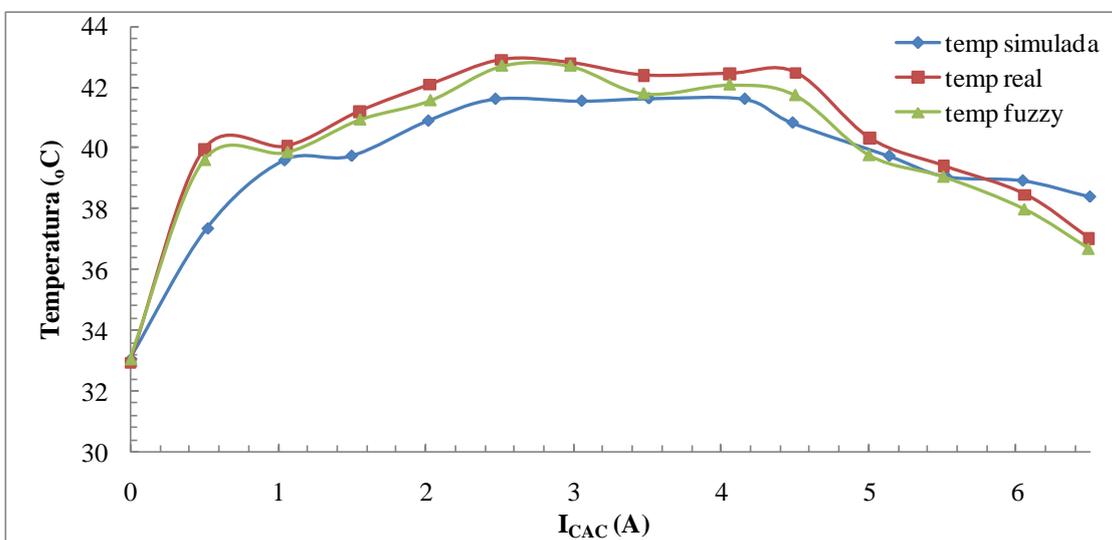


Figura 5.41 – Respostas dos controladores e saída real de temperatura

Pela comparação das Figuras 5.40 e 5.42 observa-se que a dinâmica da CaC, no caso da temperatura, não tem um comportamento totalmente previsível pelo simulador. O simulador, neste caso, responde de forma instantânea à saída fuzzy de controle de temperatura. Na CaC real, este comportamento diverge. Isto é, na CaC real, a

acumulação interna de calor, impede que a temperatura seja reduzida no interior da CaC mantendo o nível de tensão mais elevado do que o esperado, mesmo quando a fonte de aquecimento tem sua potência reduzida. Mesmo com esta dinâmica real diferenciada de temperatura em relação ao modelo, o erro entre os valores reais e os simulados, fica mantido na faixa de  $\pm 3,5\%$ .

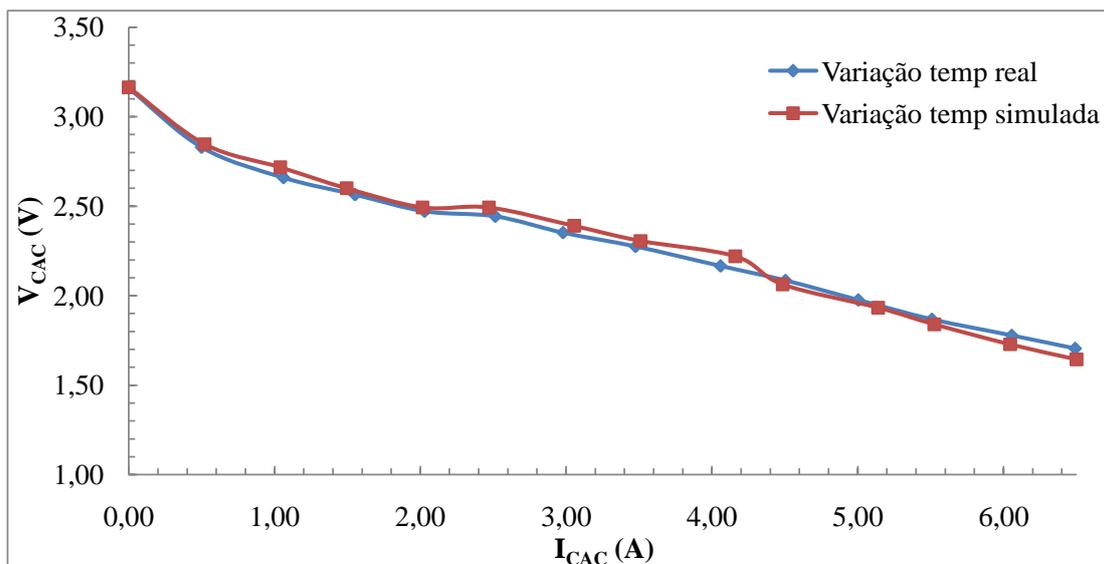


Figura 5.42 – Comparação entre a resposta simulada e a real, para a temperatura

No caso do efeito da dinâmica da temperatura, uma ressalva deve ser feita: além dos ensaios-padrão com tempos de espera em torno de 60 s entre uma leitura e outra, testes adicionais foram realizados com tempos de espera de 300 s entre leituras. Nos testes experimentais adicionais esta dinâmica não apresentou mudanças significativas. Isto sugere que mais experimentos devem ser conduzidos a fim de se investigar o tempo de acomodação da CaC com relação à temperatura. Acredita-se que esta dinâmica irá se comportar diferentemente entre CaCs de modelos diversos.

#### 5.4.4 Controlador fuzzy experimental para a umidade relativa

As Figuras 5.43 a 5.45 apresentam os resultados experimentais da aplicação do controlador fuzzy para a umidade relativa. O ganho de eficiência prática da umidade relativa do ar de entrada, em média, é de 17% contra 14% previsto em simulação.

Como pode ser visto na Figura 5.44, na prática a umidade relativa do ar de entrada é a variável mais complexa para ser estabilizada. Isto se verificou pela avaliação visual das diferenças entre os gráficos simulado da saída fuzzy e da resposta real da Figura 5.45. Apesar disso, mesmo com esta limitação, se a Figura 5.45 for considerada, a capacidade de aproximação do modelo para a o comportamento da CaC em relação à variação da umidade é bastante razoável, com um erro médio de, aproximadamente,  $\pm 3\%$ , calculado ao longo de toda a curva. Portanto, desta avaliação pode-se concluir que um dos objetivos desta tese foi atingido: a obtenção de um modelo neuro-fuzzy de múltiplas entradas e única saída que permite seu uso como ferramenta auxiliar no projeto de controladores de CaCs, considerando além da pressão do hidrogênio, do fluxo do ar e da temperatura de operação também a umidade relativa do ar de entrada. Este efeito, em geral, na literatura é de difícil obtenção devido à complexidade dos cálculos referentes ao conteúdo de água da membrana.

Deve ser ressaltado que o modelo ANFIS não processa o equacionamento matemático das grandezas envolvidas e sim, apenas emula o comportamento real da planta modelada. Conseqüentemente, para modelagem do uso de sistemas neuro-fuzzy são requeridos dados da planta original para treinamento e validação, o que demanda ensaios práticos com a central geradora. O gerador, resumidamente falando, é tratado como uma “caixa-preta”. A vantagem do modelo ANFIS recai principalmente na velocidade de desenvolvimento do modelo.

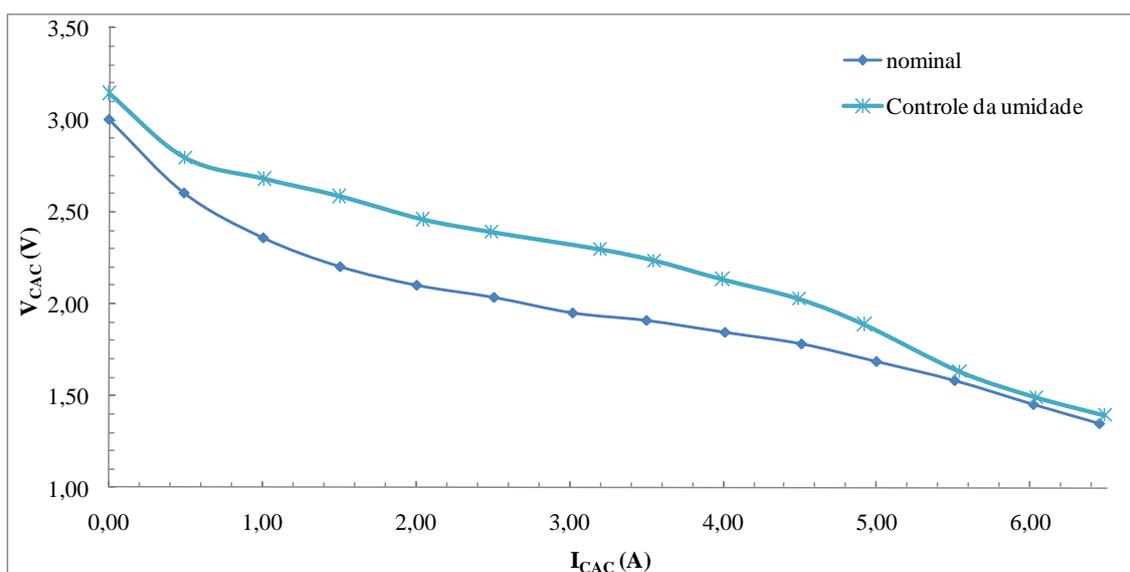


Figura 5.43 – Resposta real do controle fuzzy sobre a umidade relativa

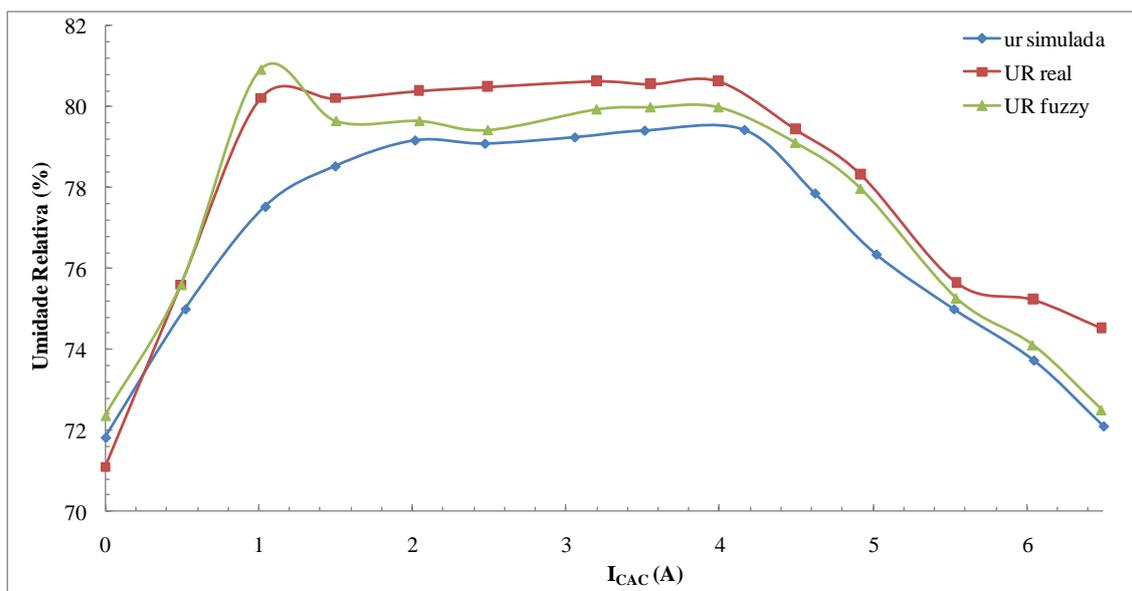


Figura 5.44 – Respostas dos controladores e saída real de umidade relativa

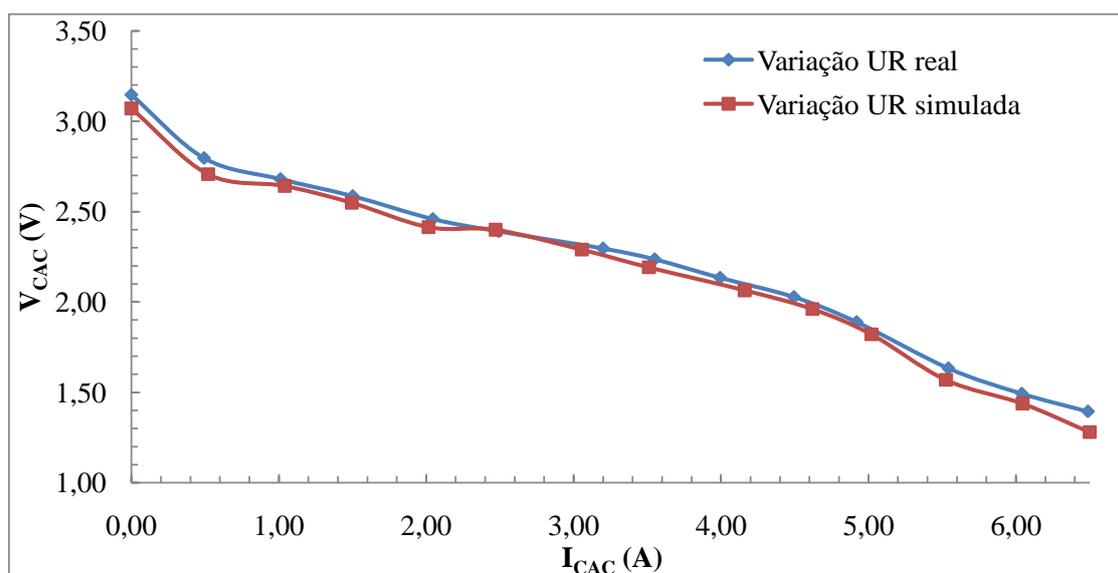


Figura 5.45 – Comparação entre as respostas simulada e real da umidade relativa

#### 5.4.5 Controlador fuzzy experimental simultâneo

A Figura 5.46 apresenta um gráfico final com o resultado da integração múltipla dos controladores fuzzy. Neste gráfico, verifica-se que o ganho real (médio) de eficiência está na faixa de 21 %. Este ganho de eficiência é bastante próximo ao valor obtido durante as simulações (23 %).

Outra observação a respeito da Figura 6.56 é o fato de que a dinâmica da temperatura predomina sobre as dinâmicas das demais variáveis. Isto comprova o fato de a temperatura de operação realmente ser um elemento crítico que demanda controle e monitoramento mais criteriosos.

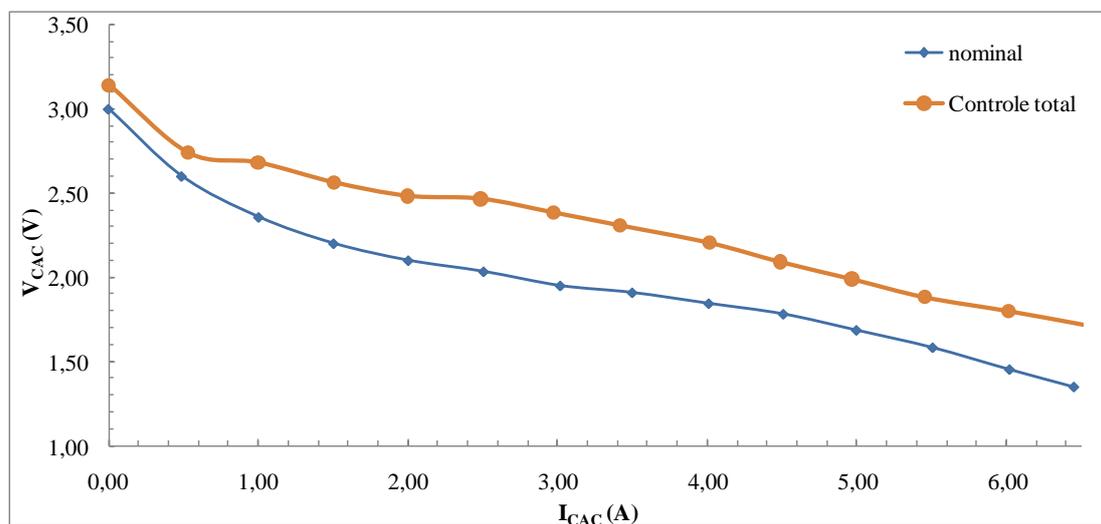


Figura 5.46 – Resposta real do controle fuzzy com a integração dos controladores

Com a Figura 5.46 conclui-se que a hipótese inicial desta tese é válida: é possível manipular simultaneamente as variáveis externas de entrada da CaC de forma a obter-se níveis mais elevados de eficiência, aumentando-se a potência de operação dentro da região linear de operação da CaC. Além disso, também pode-se gerenciar estas grandezas de forma a minimizar o desperdício de reagentes e de energia com os equipamentos auxiliares. Outra possibilidade da metodologia aqui proposta diz respeito ao ajuste dos controladores de forma a obter-se as respostas desejadas para qualquer ponto de operação da CaC.

## 5.5 Sumário dos ganhos de eficiência obtidos

A Tabela 5.5 resume os ganhos de eficiência médios aproximados, obtidos dos resultados simulados e práticos. Nesta Tabela, verifica-se que as estimativas de ganho

fornecidas pelo modelo são bastante próximas dos valores atingidos pelos resultados experimentais.

Tabela 5.5 – Tabela comparativa dos ganhos de eficiência

| Ganhos de eficiências | $\Delta P_{H_2}$ | $\Delta Q_{ar}$ | $\Delta T_{ent}$ | $\Delta UR$ | $\Delta Total$ |
|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------|----------------|
| Teórico (%)           | 1,1              | 21              | 17               | 14          | 23             |
| Prático (%)           | 1,5              | 17              | 18,5             | 17,5        | 21             |

## 5.6 Comentários finais

Algumas observações adicionais podem ser feitas referentes a metodologia para melhoria da eficiência de células a combustível apresentada nesta tese. Para a geração distribuída, principalmente em equipamentos de geração alternativa baseados em geradores de CaCs, a metodologia de controle multivariável apresentada aqui vem a ser de grande utilidade, pois é capaz de oferecer o nível mais alto de potência disponibilizado pela fonte.

No caso de uma carga local, alimentada por uma central geradora baseada em CaC, com a probabilidade de operar isolada do restante da rede principal por ilhamento causado por algum motivo (desligamento proposital, acidental, dentre outros), o gerador de CaC pode ter sua capacidade de suprimento elevada modificando-se apenas as condições de operação. Dessa forma, no lugar de apenas drenar mais corrente de carga, reduzindo a eficiência da CaC, pode-se ajustar os parâmetros de entrada de forma a elevar a potência de saída, mantendo a CaC dentro (ou próxima) de uma região mais adequada da característica  $V \times I$ . Assim, durante o ilhamento, o gerador de CaC pode oferecer maior autonomia energética sem elevação demasiada do consumo de hidrogênio. Neste caso, o consumo de combustível constitui um fator relativamente crítico face aos aspectos referentes a entrega do gás no ponto de consumo, logística de transporte, armazenamento, dentre outros fatores.

Outra vantagem da metodologia de controle multivariável é o gerenciamento energético dos periféricos. Por meio do controlador fuzzy, é possível atingir pontos de operação mais adequados às condições para as quais o equipamento auxiliar do gerador irá consumir mais ou menos energia.

Conforme os resultados práticos e teóricos indicam, não é vantajoso manter a CaC operando com suas características operacionais em seus valores máximos. Mesmo que ao operar nestes valores máximos de pressão, fluxo de ar, temperatura e umidade a CaC ofereça maior nível de potência de saída. Isto é explicado pela consideração de que o consumo adicional de energia ao longo de toda a característica  $VxI$  com os valores máximos não se justifica pelo desperdício excessivo de gás e de energia com os controladores de fluxo de hidrogênio, compressores de ar, elementos de aquecimento e umidificadores. Pode-se especular que a longo prazo (ao longo da vida útil do gerador), o consumo energético e manutenção dos periféricos possam tornar o uso da CaC como gerador elétrico menos atrativo pela redução da eficiência global do equipamento. Portanto, a metodologia de controle proposta aqui se apresenta mais vantajosa se simplificada com a seguinte premissa: despender energia com os auxiliares apenas quando necessário. No entanto, acredita-se que a hipótese formulada por esta tese possa ser melhorada. Para isso, são demandados mais estudos no sentido de se conduzir este trabalho a uma realidade mais concreta. Assim, algumas lacunas ainda devem ser preenchidas, dentre as quais se podem citar:

- a) Qual o nível adequado de automatização a ser aplicado na CaC para que a relação custo/benefício compense a implementação (total ou parcial) deste método. Isto é, até que ponto o investimento em reguladores automáticos de fluxo de gás e de ar, aquecedores, umidificadores e outros dispositivos trarão benefícios?
- b) A metodologia apresentada não é totalmente completa no sentido de extrair os maiores níveis de eficiência da CaC. Isto é, os controladores fuzzy utilizados são construídos por meio do diagnóstico das várias condições de operação do gerador e fundamentados apenas nas características  $VxI$  da CaC. Isto é um fator limitador do processo de regulagem do processo em geral. Elementos adicionais de diagnóstico podem ser incluídos, tais como: avaliação da redução da pressão do hidrogênio na linha de alimentação, produção de calor da própria CaC, recirculação dos gases de entrada, realimentação da linha de  $H_2$ , aplicação da técnica de curtos-circuitos programados para regeneração da tensão, dentre outras metodologias apresentadas pela literatura.

- c) Outra questão pertinente aos reguladores fuzzy propostos aqui se refere à sua própria estrutura: que variações nas funções de pertinência das variáveis, nas novas regras, nos pesos das regras e assim por diante, levariam a resultados mais vantajosos?
- d) Como a central geradora se comportará frente a uma situação de ilhamento real?
- e) Como se comportaria o ajuste das condições operacionais durante transitórios?

## 5.7 Resumo do Capítulo

Os resultados dos ensaios da CaC mostrados neste capítulo foram obtidos para variações graduais de carga. Este procedimento foi tomado tendo em vista que o foco do trabalho são os efeitos das variáveis estudadas sobre a eficiência total da CaC que pode ser verificada na curva  $VxI$  do gerador afetada pelo parâmetro em estudo: umidade, temperatura, e pressão dos reagentes.

Com os dados coletados, um modelo ANFIS abrangente pode ser desenvolvido de forma a abordar os principais fenômenos que afetam a eficiência da CaC. Diferentemente do que é proposto pela literatura, pode-se chegar a um modelo que contemple o efeito da umidade na membrana de forma simplificada. Porém, a CaC passa a ser vista como uma “caixa-preta”.

A partir dos dados obtidos, os efeitos das variáveis influentes são quantizados na forma de conjuntos de variáveis linguísticas com o objetivo de se criar conjuntos de regras para os blocos de inferência fuzzy. A partir daí, estes controladores são implementados e testados em um protótipo real, a fim de verificar-se sua eficácia.

Os ensaios apresentados neste capítulo verificam a capacidade dos controladores fuzzy de manter a CaC dentro da faixa de eficiência requerida considerando as condições das variáveis de entrada. A apresentação de um estudo comparativo mostrando as diferenças quando se usam e não se usam as técnicas de controle sugeridas nesta tese, mostra que os ganhos de eficiência usando algoritmos fuzzy são evidentes. Além disso, ensaios dos quais constam os resultados práticos finais, corroboram a hipótese inicial desta tese. Assim, a metodologia de aprimoramento do ganho de eficiência é validada.

## CONCLUSÕES

---

A intensificação do uso das fontes alternativas de energia tornou-se um assunto estratégico para todas as nações. Em decorrência das necessidades crescentes na demanda de energia e das projeções dos recursos necessários nos próximos anos, os governos do mundo têm direcionado grandes volumes financeiros no sentido de obter-se fontes de energia mais “limpas”, eficientes e confiáveis. Observa-se uma busca pela substituição a longo prazo da economia do petróleo pela do hidrogênio. Algumas destas pesquisas já ocorrem no Brasil a partir de iniciativas de universidades e parcerias público-privadas. Neste contexto, uma das aplicações potenciais diretas para o hidrogênio é em células a combustível.

As células a combustível são fontes de alto rendimento, podendo atingir valores acima de 80% de eficiência, principalmente se utilizadas com re- aproveitamento de calor (co-geração). Entretanto, as células a combustível ainda apresentam um custo de geração consideravelmente alto, superior a U\$ 4.000,00/kW. Portanto, é de grande interesse utilizar esta fonte na sua máxima capacidade, sem comprometimento de sua vida útil e sem incorrer em desperdício de energia nem de combustível.

O escopo desta tese procura contribuir no sentido de discutir a aplicação eficiente de células a combustível, maximizando a eficiência energética e controlando o consumo de hidrogênio de uma forma simplificada e de rápida implementação e modificação, de acordo com as necessidades dos usuários e das demandas da carga. Uma das maiores aplicações desta tese encontra-se na geração distribuída com uma potencial redução dos custos finais de implantação e das perdas inerentes ao processo de conversão energética.

A integração de fontes diversificadas em larga escala nas redes de distribuição, pode alterar consideravelmente o comportamento do sistema elétrico. Portanto, devem ser disponibilizados modelos e ferramentas de simulação e análise para o projeto de centrais geradoras a células a combustível mais eficientes. Neste quesito, a prioridade

desta tese é direcionada ao melhor controle dos agentes que influenciam diretamente sobre a eficiência da célula a combustível: a pressão e/ou o fluxo dos reagentes, a temperatura de operação e a umidificação da pilha.

Para atingir esta meta de elevação da eficiência recomenda-se manter o gerador operando em sua região linear de operação. Para tanto, algoritmos neuro-fuzzy são aplicados para modelagem e controle, de tal forma que mantenham a célula nesta região por meio do diagnóstico da sua característica  $V \times I$ . A opção pelo uso destes algoritmos se dá em virtude de seu desempenho apresentar como o mais favorável em aplicações de complexidade mais elevada, como é o caso das células a combustível.

Maiores níveis de eficiência são apresentados e validados em duas formas: teórica e praticamente. Foi observado que os ganhos de eficiência na região linear de operação da célula a combustível do tipo PEM podem atingir valores na faixa de 5 a 20%, aproximadamente, considerando os valores teóricos e práticos obtidos em simulações e ensaios. Porém, estes valores irão depender das características da célula utilizada. Por exemplo, em uma célula a combustível teórica de 6 kW, observa-se ganhos de eficiência (dentro da região linear) na faixa de 5,11%, aproximadamente, pelo gerenciamento da eficiência. Com este ganho, pode-se suprir parte (ou totalmente) o consumo dos periféricos que auxiliam a manutenção da célula. Assim, a energia restante pode ser liberada para o consumidor, de forma a reduzir a subutilização da central com célula a combustível. Na prática, os ensaios em laboratório demonstraram a obtenção de ganhos de eficiência superiores a 20% para uma célula a combustível real de baixa potência. No caso prático, verificou-se uma variação de 6,3 W para 7,8 W (média) na região linear de operação. Entretanto, estes resultados dependem do tipo de célula usado e das condições de operação. No entanto, pode-se supor que ganhos dentro desta faixa (5~20%) representam resultados interessantes. Por exemplo, se for considerado um gerador de maior porte (100 kW, por exemplo), um ganho de 5% na eficiência seria o suficiente para manter em operação boa parte dos dispositivos periféricos da pilha (compressores, sopradores, bombas de água dentre outros).

A interface de potência usada para avaliar a melhoria global da eficiência como um todo mostra que é possível construir-se uma plataforma para geração distribuída específica para cada célula a combustível. Neste caso, permitiu-se que a interface de potência drenasse o máximo de corrente disponível pelo gerador. No caso de um eventual ilhamento da rede local, e em conjunto com a técnica de aprimoramento da eficiência proposta, pode-se assumir que o gerador baseado em célula a combustível é

capaz de assumir e suprir total ou parcialmente a carga local. Essa capacidade dependerá da capacidade de geração do grupo instalado de centrais de células a combustível. Essa possibilidade é vantajosa tendo em vista o fato de que o consumo de hidrogênio não seja drasticamente comprometido. Caso o hidrogênio fornecido a localidade seja proveniente de tanques de armazenamento e não de fontes produtoras próprias, isso pode representar maior autonomia da matriz geradora local.

### **6.1 Aspectos inovadores da Pesquisa**

Compreende-se que este projeto contribui para estimular a aplicação de células a combustível para geração distribuída. Os principais resultados obtidos referem-se a um real aumento da eficiência da central geradora baseada na célula a combustível versus conexão com a carga. Como aspectos inovadores desta pesquisa, podem-se citar:

1. Estudo detalhado das variáveis que mais interferem na eficiência da célula a combustível, admitindo-as como indissociáveis e concedendo a cada uma o respectivo grau de importância no que se refere ao impacto final sobre a operação do gerador. Em geral, a literatura busca oferecer alternativas de atuação isolada em cada variável ou com atuação sobre grandezas consideradas de maior impacto, tais como o controle da temperatura e da umidade, por exemplo.
2. Proposição do aumento da eficiência pelo diagnóstico da característica  $VxI$  do gerador. Por meio desta técnica podem-se atingir níveis de potência elevados e mais próximos daqueles que seriam obtidos caso o gerador fosse usado na região onde as perdas por difusão predominam. Isso eleva consideravelmente o nível de aproveitamento do hidrogênio, bem como a eficiência energética do restante do equipamento auxiliar.
3. Desenvolvimento de uma metodologia de modelagem e controle baseado em algoritmos neuro-fuzzy que permitem a execução da proposta desta tese, que é a de manter a célula operando na região linear, concomitante com a elevação de potência sem o comprometimento do consumo de hidrogênio e o desperdício energético nos dispositivos auxiliares.

4. Aplicação dos algoritmos neuro-fuzzy multivariável como ferramentas para realizar o diagnóstico das condições de operação do gerador a partir da análise da característica  $V \times I$ .
5. Possibilidade de seleção, por meio da lógica neuro-fuzzy, de quantas e quais variáveis são efetivamente modeladas e controladas. Esse fator é proposto e validado ao longo da tese permitindo o projetista conferir a seleção das grandezas com as quais efetivamente deseja operar.
6. Constatação, por meio de análise da literatura, que os algoritmos inteligentes são mais adequados ao gerenciamento das centrais com células a combustível. As propostas baseadas em controladores clássicos frequentemente apresentam níveis de eficiência mais reduzidos, dadas suas limitações para atuar sobre plantas de ordem matemática mais elevada, tal como o caso das células a combustível.
7. Possibilidade de uso de um gerador de células a combustível aplicado para produção local de energia elétrica em pontos isolados e passíveis de sofrer os efeitos de um ilhamento. Este fator contribui diretamente para a expectativa de descentralização da matriz geradora (*esta potencialidade não foi explorada em sua plenitude nesta tese*).

## 6.2 Principais contribuições

Acredita-se na originalidade das seguintes contribuições:

1. Definição do respectivo grau de importância de cada uma das variáveis externas quanto ao seu impacto sobre a eficiência do gerador. Considera-se que a potencial contribuição de cada grandeza deva ser explorado tanto quanto possível ainda na fase de projeto da central.
2. Implementação da modelagem e controle da central de CaC da contribuição da umidade de forma efetiva. Como a literatura em geral considera, para fins de modelagem e controle, uma umidificação ideal, este trabalho introduz a possibilidade do gerenciamento do conteúdo de água da membrana de maneira mais simples e eficaz por ferramentas de fácil aplicação e modificação.

3. Desenvolvimento de ferramentas para controlar o consumo de hidrogênio de forma mais racional, maximizando a eficiência da geração.
4. Aplicação de lógica neuro-fuzzy para modelagem e definição das estratégias de controle de formas interdependentes e inter-relacionais.
5. Aplicação de algoritmos fuzzy para controle paralelo descentralizado de forma a ajustar as respostas desejadas para cada variável e interferir de maneira simplificada sobre a atuação destes compensadores.
6. Utilização de equipamentos de baixo custo para monitoramento e controle da célula a combustível. Como o gerador, por si só, possui altos custos de operação, então se torna interessante voltar-se para a redução de custos com os periféricos.
7. Desenvolvimento e implementação de um protótipo de baixa potência de uma plataforma real de geração baseada em célula a combustível com o uso das técnicas de controle propostas. Como comprovado, tal plataforma permite a atuação isolada ou simultânea sobre as variáveis de controle da célula a combustível de forma a aumentar a eficiência.
8. Estratégia de controle neuro-fuzzy simplificada, permitindo ao usuário autonomia para realizar revisões nos algoritmos de gerenciamento da CaC, manipulando-os quando achar necessário e adequando-os às suas necessidades.

### **6.3 Sugestões para Continuidade do Trabalho**

Considerando a originalidade da proposta desta tese e considerando que pode servir de base para estudos sobre células a combustível que venham a incentivar o uso destas fontes de energia alternativa em aplicações de geração distribuída, sugere-se a continuidade desta pesquisa, expandindo-a por meio das seguintes propostas:

1. Modificar as características das arquiteturas de controle fuzzy apresentadas, com novas variantes dos blocos de regras, funções de pertinência diversas e variáveis de controle adicionais, de forma a adequar os níveis de eficiência;
2. Introduzir outras ferramentas de diagnóstico das condições da célula nos algoritmos de controle, com o objetivo de elevar a capacidade de

monitoramento da vida útil da membrana, bem como buscar a elevação da eficiência do gerador;

3. Usar as equações relacionais da pressão do hidrogênio e do aumento da temperatura em modelos matemáticos paramétricos de forma a torná-los mais condizentes com a realidade.
4. Aplicar a equação que relaciona o aumento da temperatura com o aumento da corrente em estruturas que utilizem a co-geração de calor da célula. Esta equação pode definir a quantidade de calor produzido para cada faixa de variação da corrente de carga. Este calor pode ser reintroduzido na própria célula a combustível ou mesmo aproveitado para climatização de ambientes ou outras aplicações;
5. Expandir os testes realizados para outros modelos de pilhas do tipo PEM;
6. Elevar a automatização para gerenciar novos dispositivos automáticos introduzidos de forma mais eficiente. Por exemplo, podem-se introduzir controladores de fluxo para o hidrogênio e oxigênio, usando as saídas dos controladores fuzzy para ajustar de forma muito mais precisa o suprimento de combustível.
7. Aplicar algoritmos fuzzy aliados a controladores PI (fuzzy+PI) para elevar a precisão dos atuadores. Os controladores fuzzy fornecem sinais de referência aos compensadores PI de forma que os atuadores possam ter correção mais rápida e acurada. Com este aumento da precisão na resposta dos atuadores, estima-se um aumento da eficiência do gerador.
8. Realizar análises de custos para avaliar, por faixa de potência da pilha, quais os processos cujas automatizações seriam mais vantajosas para o usuário final. Isso permite a seleção dos componentes e ajuste dos controladores fuzzy mais adequados para cada caso. Deve-se levar em consideração que a proposta de controle apresentada nesta tese permite o uso de compensadores fuzzy atuando de forma isolada, integrada ou em grupos parciais (*sendo esta que esta última alternativa não foi explorada nesta tese*), por meio de combinações das variáveis de controle.
9. Implementar por meio do uso de um gerador de maior potência (5 ou 10 kW, por exemplo) o algoritmo de gerenciamento da eficiência proposto agregado a uma interface de potência com suporte à operação ilhada;
10. Promover estudos mais aprofundados sobre a vida útil da célula.

Como visto nas propostas apresentadas, esta tese abre espaço para diversos trabalhos, ampliando ainda mais a gama de pesquisas relacionadas ao uso do hidrogênio e das células a combustível. Além disso, por meio das propostas sugeridas, observa-se que esta tese não é um trabalho definitivo, abrindo espaço para muitas interrogações.

Os resultados aqui obtidos podem introduzir a novas pesquisas relacionadas especificamente à obtenção de maiores níveis de eficiência das células a combustível. Algumas das propostas podem ser aproveitadas tanto para o desenvolvimento de trabalhos de iniciação científica bem como para atividades de pós-graduação, tais como dissertações de mestrado.

Também se observa que para a condução dos estudos correlatos, são necessários maiores investimentos. Dessa forma, este trabalho pode se apresentar como um canal profícuo ao estabelecimento de vínculos junto aos órgãos de fomento de pesquisa, bem como à realização de participações entre as iniciativas público-privadas, tais como universidades e concessionárias de energia ou outras empresas particulares que realizem e tenham interesse em P&D nas áreas de fontes alternativas.

# REFERÊNCIAS

## BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] UNITED STATES. U.S. Department of Energy. Energy. Information Administration – Office of Integrated Analysis and Forecasting. **International Energy Outlook - 2009**. Washington DC, 2009.
- [2] FARRET, F.A. SIMOES, M.G. **Integration of alternative sources of energy**. Hoboken: Wiley-interscience. 2006. 499 p.
- [3] SACHS, I. Os biocombustíveis estão chegando à maturidade. **Democracia Viva**, v. 1, n. 29, p. 26-31.
- [4] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007.
- [5] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2008/2017**. Rio de Janeiro, 2008.
- [6] WORD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear power in Brazil. **World Nuclear Association, Information Papers, Country Briefings**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf95.html>>. Acesso em: 01 fev. 2010.
- [7] GLOBAL INSIGHT, INC. “Brazil:Date Set for Brazilian Hydroelectric Power Plant Tender”. **IHS Global Insight**. Disponível em <[www.globalinsight.com](http://www.globalinsight.com)>. Acesso em: 21 jan 2010.
- [8] GLOBAL INSIGHT, INC. “Brazil: Environmental Agency Wins Second Appeal Overturning Brazilian Court Injunction Against Power Plant. **IHS Global Insight**. Disponível em <[www.globalinsight.com](http://www.globalinsight.com)>. Acesso em: 21 jan 2010.
- [9] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. The PROINFA Program. **Global Wind 2007 Report**. Disponível em [www.gwec.net/fileadmin/documents/test2/gwec-08-update\\_FINAL.pdf](http://www.gwec.net/fileadmin/documents/test2/gwec-08-update_FINAL.pdf)>. Acesso em 05 jun 2009.
- [10] PADILHA J. C., TRINDADE L. G., SOUZA R. F. DE, MIGUEL M. An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO2 emissions in Brazil, **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 34, n. 19, p. 7898-7902, 2009
- [11] MORIARTY P., HONNERY D. Hydrogen's role in an uncertain energy future, **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 34, n. 1, p. 31-39, 2009.
- [12] UNITED STATES. Department of Energy. United States Department of Transportation. **Hydrogen Posture Plan – An integrated research, development and demonstration plan**. 2006.
- [13] UNITED STATES. U.S. Department of Energy. Energy. **FY 2009 Progress report for the DOE hydrogen Program**. Oak Ridge, 2009.

- [14] EUROPEAN COMMISSION – CORDIS. **Hydrogen energy and fuel cells – a vision of our future**. European Communities, 2003.
- [15] BARBIR, F. **PEM fuel cells – theory and practice**. San Diego: Elsevier Inc. 2005. 436 p.
- [16] TAWFIK H. Hydrogen economy & (pem) fuel cells. **Power and Energy (PE) Society of the IEEE Long Island Section**. Long Island, IEEE. Disponível em <[http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fuel\\_cell.pdf](http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/fuel_cell.pdf)>. Acesso em: 24 fev 2009.
- [17] HOTZA, D. COSTA J.C.D. Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy - 2nd Asian Bio Hydrogen Symposium**. v. 33, n. 19, p. 4915-4935, 2008.
- [18] LARMINIE, J., DICKS, A. **Fuel cell systems explained**. Chichester: John Wiley & Sons, 2a ed. 2003. 308 p
- [19] KORDESCH, K; SIMADER, G. **Fuel cells and their applications**. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 2001. 386 p.
- [20] HORIZON FUEL CELL. H-1000 1kW PEM Fuel Cell System – pricing information. **Horizon fuel cell**. Disponível em <<http://www.horizonfuelcell.com/store/h1000.htm>>. Acesso em 6 jan. 2010.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Relatório ANEEL 2006”, Brasília, ANEEL, 2007.
- [22] XU, H.; WEN, X.; KONG, L. “High power dc-dc converter and fuel cell distributed generation system”, **IAS 2004**, pp. 1134-1139.
- [23] Zegers, P. “Fuel cell commercialization: the key to a hydrogen economy”, **Journal of Power Sources**. v. 1, n. 154, Jan, 2006, pp. 497-502.
- [24] HELLMAN, H.; HOED, R. “Characterizing fuel cell technology: challenges of the commercialization process”, **International Journal of Hydrogen Energy**, 32, 2007, pp. 305-315.
- [25] BROWN, J.; HENDRY, C.; Harborne, P. “An emerging market in fuel cells? Residential combined heat and power in four countries”, **Energy Policy**, 35, 2007, pp.2173-2186.
- [26] HORDESKI, M. “New technologies for energy efficiency”, Ed. The Fairmont Press, 1a. ed., Lilburn, 2003.
- [27] VISHNYAKOV, V. “Proton exchange membrane fuel cells”, *Vacuum*, 80, (1), 2006, pp. 1053 – 1065.
- [28] CORRÊA, J.M. FARRET, F.A. CANHA, L.N. SIMÕES, M.G. An electrochemical-based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v.51, n.05, p. 1103-1111. Oct. 2004.
- [29] CORRÊA, J.M. FARRET, F.A. POPOV, V.A. PARIZZI, J.B. Influence of the modeling parameters on the simulation accuracy of proton exchange membrane fuel cells. **IEEE Bologna PowerTech Conference**. Jun. 2003. Bologna, Itália.
- [30] CORRÊA, J.M. FARRET, F.A. POPOV, V.A. SIMÕES, M.G. Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells. **IEEE Transactions on energy conversion**, v.20, n.01. p. 211-217. Mar, 2005.

- [31] AL-BAGHDADI, M.A.R.S. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations. **Renewable Energy** v. 30, n° 10, 2005, p. 1587-1599.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] P.R. PATHAPATI, X. XUE E J. TANG, “A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System”, **Renewable Energy**, v. 30, n. 01, pp. 01-22, 2005.
- [35] CASTELLAN, G.W.; **Physical Chemistry**. 4.ed Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1970.
- [36] DENAI, M.A. PALIS, F. ZEGHBIB, A.; ANFIS based modelling and control of non-linear systems: a tutorial. **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004**. v. 4, pp. 3433- 3438.
- [37] JANG, J.J.; ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE Transactions on systems, man and cybernetics**. v. 23, n° 3, Mai/Jun, 2003, p. 665-685.
- [38] **BCS Fuel Cells, Inc.** Folhas de especificações dos modelos fabricados pela BCS. Disponível em < <http://www.bcsfuelcells.com/products.htm>>. Acesso em 29 jun. 2009.
- [39] FARRET, F. A. **Pequenos Aproveitamentos Elétricos**. Santa Maria: Editora da UFSM. 2002.
- [40] MARTINS, G.M. Desenvolvimento de conversor comutado em baixa frequência para aplicação em sistemas de geração distribuída baseados em células a combustível. **Tese de Doutorado**. Campinas, 2006.
- [41] MANN, R.F.; AMPHLETT, J.C.; HOOPER, M.A.I., JENSEN, H.M.; PEPPLEY, B.A.; ROBERGE, P.R. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. **Journal of Power Sources**. v. 86, 2000, p. 173-180.
- [42] MAXOULIS, C.N.; TSINOGLU, N.; KOLTSAKIS, G.C. Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles. **Energy Conversion and Management**. v. 45, n. 4, p. 559-573. 2004
- [43] FOWLER, M.W; MANN, R.F.; AMPHLET, J.C.; PEPPLEY, B.A.; ROBERGE, P.R. Incorporation of voltage degradation into a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. **Journal of Power Sources**. v. 106, p. 274-283. 2002
- [44] AMPHLETT, J.C. BAUMERT, R.M. MANN, R.F. B.A. PEPPLEY, B.A. ROBERGE, P.R., RODRIGUES, A. A practical pem fuel cell model for simulating vehicle power sources. **IEEE Proceedings of the Tenth Annual Battery Conference on Applications and Advances**. p. 221-226. Long Beach, USA. Jan. 1995.

- [45] NEDSTACK FUEL CELL TECHNOLOGY. **Nedstack PS6 Product data**. Disponível em < <http://www.nedstack.com/products.html>>. Acesso em: 03 abril 2009.
- [46] HYUN, D.; KIM, J. Study of external humidification method in proton exchange membrane fuel cell. **Journal of Power Sources**. v. 01, n. 126, p. 98-103. 2006
- [47] FORRAI, A.; FUNATO, H.; YANAGITA, Y.; KATO, Y. Fuel-cell parameter estimation and diagnostics. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Sept. 2005. v. 20, n. 3 pp. 668-675.
- [48] ZHIJUN, M.; ZINJIAN, Z.; GUANGYI, C. Design and simulation of fuzzy controller for PEMFC's., 2005. ICIT 2005. **IEEE International Conference on Industrial Technology**. p.220-224. 2005
- [49] KIM, S.; SHIMPALEE, S.; ZEE, J.W.V. The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change. **Journal of Power Sources**. v. 01, n. 135, p. 110-121. 2004
- [50] WANG, Y.; WANG, C. Transient analysis of polymer electrolyte fuel cells, **Electrochimica Acta**, v. 01, n. 50, pp. 1307-1315. 2005
- [51] FERRIGOLO, F. Z. ; LIMA, L. P. ; RAMOS, D.B. ; FARRET, F.A. Modelagem de células a combustível usando o modelo eletrônico e aplicação no projeto de um conversor boost. **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. 2008.
- [52] FARRET, F.A. ; FERRIGOLO, F. Z. ; LIMA, L. P. ; RAMOS, D.B. Modelagem de células a combustível através de funções matemáticas do psim. **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. 2008
- [53] FARRET, F.A. ; FERRIGOLO, F. Z. ; LIMA, L. P. ; RAMOS, D.B. Inclusion of the start-up effect in the electronic modeling of proton Exchange membrane fuel cells. **2009 Brazilian Power Electronics Conference – COBEP 2009**. p. 1108-1112. 2009.
- [54] FARRET, F.A.; FERRIGOLO, F. Z. ; LIMA, L. P. ; RAMOS, D.B. Psim mathematical tools to simulate pem fuel cells including the power converter. **Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE**. p. 2784-2789. 2009
- [55] ZENITH, F.; SKOGESTAD, S. Control of fuel cell power output. **Journal of Process Control**, v. 01, n. 17, p. 333-347. 2007
- [56] FEROLDI, D.; SERRA, M.; RIERA, J. Performance improvement of a PEMFC system controlling the cathode outlet air flow. **Journal of Power Sources**. v.169, n. 01, pp. 205-212. 2007
- [57] BARBIR, F.; GORGUN, H.; WANG, X. Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells. **Journal of Power Sources**. v. 141, n. 1 , 16, Pages 96-101. 2005.
- [58] FAMOURI, P.; GEMMEN, R.S. Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell. **Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE**. Publication, v. 3, n. 1, p. 1440-1448. 2003
- [59] LAURENCELLE, F. CHANINE, R. HAMELIN, J. AGBOSSOU, FOURNIER, M. BOSE, T.K LAPERRIÈRE A. Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange Membrane fuel cell stack. **Fuel cells**, v.1, n.1. p.66-71. Jun. 2001.

- [60] 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.
- [61] FUGLEVAND, W. A., BAYYUK, S. I., LLOYD, G., DEVRIES, P. D., 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.
- [62] YAP, H.T.; SCHOFIELD, N. Test characterization of a H<sub>2</sub> PEM fuel cell. **Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007 - VPPC 2007**, pp. LXV- LXXII. 2007.
- [63] TAO, S.; SI-JIA, Y.; GUANG-YI, C.; XIN-JIAN, Z. Modelling and control of a PEMFC using fuzzy neural networks. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 6A, n.10, p. 1084-1089, 2005.
- [64] LEE, W.; PARK, G.; YANG T.; YOON, Y.; KIM, C. Empirical modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell performance using artificial neural networks. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 29, n. 09, p. 961-966. 2004.
- [65] TAKAGI T.; SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics**, vol. 15, n.01, 1985, pp. 116-132.
- [66] JANG, J. R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing - **A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, 1997.
- [67] EL-WAKDY, M.; EL-SEHELY, E.; EL-TODHY, M.; EL-HENNAWE, A. Speech recognition using wavelet transform to establish fuzzy inference system through subtractive clustering and neural networks (ANFIS). **12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Systems, 2008**. Heraklion, p. 381-386. 2008.
- [68] SIMONE, A.; NELE, L. Neuro fuzzy network for composites manufacturing time estimation. **Innovative production machines and systems - I\*PROMS 2008 Conference**. Disponível em <[http://conference.iproms.org/neuro\\_fuzzy\\_network\\_for\\_composites\\_manufacturing\\_time\\_estimation](http://conference.iproms.org/neuro_fuzzy_network_for_composites_manufacturing_time_estimation)>. Acesso em 05 jun 2009.
- [69] HAMMOUDA, K.; KARRAY, F. A comparative study of data clustering techniques, SYDE 625: Tools of intelligent systems design. **University of Waterloo - Department of Systems Design Engineering**. Disponível em <<http://pami.uwaterloo.ca/pub/hammouda/sde625-paper.pdf>>. Acesso em 10 fev. 2009.
- [70] TEKIN, M.; HISSEL, D.; PERA, M.C.; KAUFFMAN, J.M. Energy management strategy for embedded fuel cell system using fuzzy logic. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004**. v.01, n. 01, pp. 501-506. 2004.
- [71] ZHIJUN, M.; XINJIAN, Z.; GUANGYI, C. Design and simulation of fuzzy controller for PEMFCs. **IEEE International Conference on Industrial Technology, 2005 - ICIT 2005**. v. 01, n. 01, 2005, pp. 220-224. 2005.

- [72] HUANG, S.; LIN, C.; WU, C.; YANG, S. The application of Fuzzy controller for fuel cell generating studies. **International Journal of Hydrogen Energy - 2nd Asian Bio Hydrogen Symposium**, v. 33, n. 19, p. 5205-5217, 2008.
- [73] BAO, C.; OUYANG, M.; BAOLIAN, Y. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system – I. Control oriented modeling. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 01, pp. 1879-1896. 2006.
- [74] BAO, C.; OUYANG, M.; BAOLIAN, Y. Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system – II. Linear and adaptive nonlinear control. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 01, pp. 1879-1896. 2006.
- [75] SCHUMACHER, J.O.; GEMMAR P.; DENNE M.; ZEDDA M.; STUEBER M. Control of miniature proton exchange membrane fuel cells based on fuzzy logic. **Journal of Power Sources**, v. 129, n. 02, pp. 143-151. 2004.
- [76] GUPTA, M.M.; KISZKA, J.B.; TROJAN, G.M. Multivariable Structure of Fuzzy on Control Systems. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**. v. 16, n. 5, p. 638-656, 1986.
- [77] RAYMOND, C. BOVERIE, S. TITLI, A. First evaluation of fuzzy MIMO control laws. **IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems, 1994**. v. 1, n. 1, p 545-548, 1994.
- [78] SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1999. 165 p.
- [79] MARQUEZINI, D.D.; Interação entre conversores chaveados com baixa ondulação e células de combustível. **Dissertação de mestrado**. UFSM, 2007.
- [80] MARQUEZINI, D.D.; RAMOS, D.B.; MACHADO, R.Q.; FARRET, F.A. Interaction between proton Exchange membrane fuel cells and power converters for ac integration. **IET Renewable Power Generation**, v. 2, n. 3, p. 151-161. 2008.
- [81] R. Q Machado, S. Buso, J. A. Pomilio e F. P. Marafão. Three-Phase to Single-Phase Direct Connection for Rural Co-Generation Systems. **Proceedings of the APEC'2004**. 2004.
- [82] R. Q. Machado, S. Buso e J. A. Pomilio. “A Line-Interactive Single-Phase to Three-Phase Converter System”, **IEEE PESC'04**. p. 753-758. 2004.
- [83] PALLE, B., “Dynamic integration of a grid connected DFIG wind turbine with a fuel cell”, **PhD Thesis**, Colorado School of Mines, 2006.
- [84] THACKER, T., “Control of power conversion systems for the intentional islanding of distributed generation units”. **MSc Thesis**, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [85] THACKER, T.; Wang, F.; Boroyevich, D. “Islanding control of a distributed generation unit’s power conversion system to the electric utility grid”, **Power Electronics Specialists Conference, 2005, PESC '05**. pp. 210 – 216. 2005.

- [86] POGAKU, N.; PRODANOVIC, M.; GREEN, T. “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid”, *IEEE Trans. power electronics*, v. 22, n. 2, pp. 613 – 625. 2007
- [87] **IEEE 1547 - Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. 2003.
- [88] CARNIELETTO, R. RAMOS, D.B. SIMOES, M.G. FARRET, F.A. Simulation and analysis of DQ frame and P+Resonant controls for voltage source inverter to distributed generation. **Brazilian Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09**. p. 104-109. 2009.
- [89] BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R.; LISERRE, M. ET AL. “Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems”, **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, v. 5, n. 53, p. 139-1409. 2006.
- [90] CHUNG, S. “Phase-locked loop for grid connected three-phase power conversion systems”, **IEEE Proc. Power applications**, 147, (3), May, 2000, pp. 213-219.
- [91] KAURA, V.; BLASKO, V. “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions”, **IEEE Trans. on Industrial Applications**, 33, (1), Feb, 1997, pp. 703-708.

# APÊNDICES

---

## Introdução

O Apêndice A apresenta os detalhes referentes à implementação dos algoritmos ANFIS, incluindo a estrutura geral do algoritmo ANFIS, inicialmente proposto por [37,66].

Além da estruturação teórica básica das redes ANFIS, no Apêndice B é apresentada uma revisão sobre a técnica de agrupamento de dados necessária à construção da rede neuro-fuzzy. Especificamente, é tratada a técnica da clusterização subtrativa (*subtractive clustering*), apresentada por [37,66-69], utilizada para construir os modelos das células a combustível (CaCs) nesta tese. Este Apêndice visa a definição das terminologias de clusterização e a introdução aos algoritmos de geração dos agrupamentos dos dados. Isso permite portar estes algoritmos para outras plataformas de programação.

No apêndice C são apresentadas as tabelas com os resultados dos ensaios para criação dos modelos com diversas estruturas e configurações do algoritmo ANFIS adotado nesta tese.

O Apêndice D apresenta uma introdução sobre a lógica fuzzy [66,78]. Em especial, as estruturas fuzzy baseadas em algoritmos Mamdani.

O apêndice E apresenta uma proposta de interface de potência para interconexão da célula a combustível com uma rede de distribuição. Essa interface, por meio da análise das influências das variações de carga na característica  $V_{xI}$  mostra a necessidade de um algoritmo de gerenciamento das condições de operação eficientes da CaC.

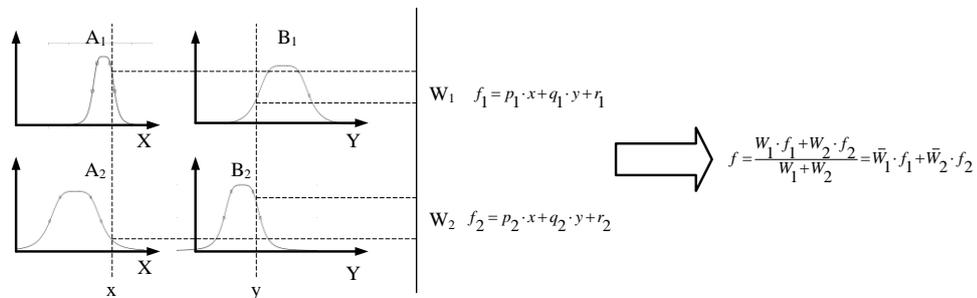
## Apêndice A – Redes ANFIS

A rede ANFIS é uma ferramenta adequada para a aproximação de funções – principalmente, as funções não lineares. De forma resumida, uma rede ANFIS implementa um sistema fuzzy do tipo Sugeno de primeira ordem. A estrutura ANFIS, em sua forma genérica,

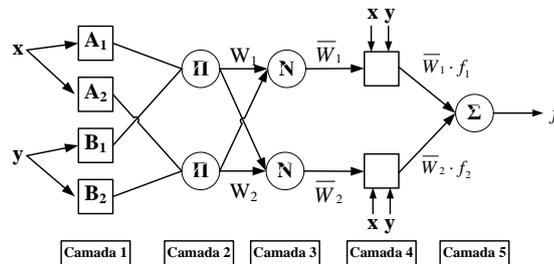
é mostrada na Figura A.1. A camada 1, onde ocorre a fuzzificação das variáveis de entrada, consiste de funções de pertinência genéricas, as quais podem ser triangulares, gaussianas, trapezoidais e outras. A camada 2 implementa um operador fuzzy AND, enquanto a camada 3 atua como escala para a intensidade de disparo das regras. A saída da camada 4 é composta de uma combinação linear das entradas, multiplicadas pela intensidade de disparo normalizada  $w$ , conforme mostrado na equação (A.1).

$$Y = w \cdot (p \cdot X + r) \tag{A.1}$$

onde  $p$  e  $r$  são parâmetros adaptáveis.



(a)



(b)

Figura A.1 – (a) Modelo fuzzy de Sugeno, de primeira ordem, com duas entradas e duas regras; (b) Estrutura ANFIS equivalente.

A camada 5 é um somatório das saídas da camada 4. O ajuste dos parâmetros modificáveis é feito em duas etapas. Primeiro, a informação é propagada de forma direta através da rede, até a camada 4, onde os parâmetros são identificados por um estimador tipo “least-square”. Então, os parâmetros na camada 2 são modificados usando um gradiente descendente. As Equações A.2 a A.8 demonstram o equacionamento aplicado em cada camada da rede, onde as variáveis de referência pertencem a Figura A.1.

Para o sistema de inferência fuzzy de Sugeno apresentado na figura 3.1, um conjunto de regras comum pode ser expresso na forma da Equação A.2.

$$\begin{cases} \text{Regra 1: SE } x \text{ é } A_1 \text{ E } y \text{ é } B_1, \text{ ENTÃO } f_1 = p_1 \cdot x + q_1 \cdot y + r_1 \\ \text{Regra 2: SE } x \text{ é } A_2 \text{ E } y \text{ é } B_2, \text{ ENTÃO } f_2 = p_2 \cdot x + q_2 \cdot y + r_2 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

onde  $x$  e  $y$  são entradas e  $f_n$  é uma saída. Neste caso, pode-se estender a análise de forma a considerar-se  $x$  e  $y$  como equivalentes à variáveis como corrente, temperatura, umidade, pressão, dentre outras. A saída simulada a partir de um sistema ANFIS pode referenciar, por sua vez, a tensão produzida pela CaC.

Para a camada 1, são aplicados critérios de fuzzificação das variáveis de entrada, conforme a Equação A.3. Nesta camada, os parâmetros são referidos como premissas.

$$\begin{cases} O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ para } i = 1, 2, \text{ ou} \\ O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ para } i = 3, 4, \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

onde  $x$  (ou  $y$ ) é a entrada do nó  $i$  e  $A_i$  (ou  $B_{i-2}$ ) é uma variável lingüística (tal como “pequeno” ou “grande”) associada a este nó. Em outras palavras,  $O_{1,i}$  é o grau de pertinência do conjunto fuzzy  $A$  ( $= A_1, A_2, B_1$  ou  $B_2$ ) e esta especifica a intensidade na qual a entrada dada  $x$  (ou  $y$ ) satisfaz o quantificador  $A$ . Aqui, a função de pertinência  $A$  pode ser apropriadamente parametrizada por uma função de pertinência, tal como uma função sino, triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outros. A Equação (A.4) fornece o equacionamento para a função triangular, adotada nesta tese.

$$\text{triangular}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

onde  $\{a, b, c\}$  com  $a < b < c$  determinam as coordenadas que delimitam o triângulo.

Cada nó na camada 2 é um nó fixo chamado  $\Pi$ , no qual a saída é o produto de todos os sinais de entrada (Equação (A.5)). A saída de cada nó representa a intensidade de disparo de uma regra. Em geral, operadores *AND* são usados nesta camada.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), \quad i=1,2 \quad (\text{A.5})$$

A camada 3 é composta de nós fixos chamados  $N$ . O  $i$ -ésimo nó calcula a razão da intensidade de disparo da  $i$ -ésima regra somando as intensidades de disparo de todas as regras, conforme a Equação (A.6). Por conveniência, as saídas desta camada são chamadas de intensidade de disparo normalizadas.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i=1,2 \quad (\text{A.6})$$

Na camada 4, a saída de cada nó  $i$  é um nó adaptativo com função dada pela equação (3.7). Os parâmetros de saída desta camada são referidos como conseqüentes.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i) \quad (\text{3.7})$$

onde  $\bar{w}_i$  é a intensidade de disparo deste nó, vinda da camada 3 e  $\{p_i, q_i, r_i\}$  é o conjunto de parâmetros deste nó.

O único nó da camada 5 é um nó fixo, referido como  $\Sigma$ , o qual calcula a saída geral como o somatório de todos os sinais de entrada, conforme a Equação (3.8).

$$\text{saída geral} = O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{A.8})$$

Assim, com as equações (A.2) a (A.8) é possível construir-se uma rede adaptativa com funcionalidade equivalente a um modelo fuzzy de Sugeno.

Para fins práticos, as informações especificadas pelo usuário são o número de funções de pertinência no universo de discurso para cada entrada e a informação para treinamento dos pares entrada/saída.

## Apêndice B – Clusterização subtrativa

Para se obter um conjunto de  $N_r$  regras e evitar problemas inerentes às técnicas baseadas no particionamento de grade (*grid partitioning*), tais como a explosão da base de regras, a clusterização subtrativa é aplicada [37,66,69]. Esta técnica é empregada considerando-se a possibilidade do espalhamento (dispersão) do particionamento dos espaços de entrada/saída [69].

A clusterização subtrativa é um algoritmo “*one-pass*” usado para estimar o número de agrupamentos (clusters) e o centro destes grupos através dos dados de treinamento. Assim, os dados de treinamento são separados (particionados) em grupos ou “*clusters*”.

O procedimento para agrupar  $n$  clusters de pontos de dados  $\{Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_N\}$  no conjunto de treinamento é descrito a seguir.

1. Calcular o valor potencial inicial para cada ponto de dado ( $Z_i$ ) (Equação (B.1)).

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \cdot (Z_i - Z_j)} \quad (\text{B.1})$$

onde  $\alpha = 4 / r_a^2$  é uma constante positiva que representa a vizinhança de um raio de dados para cada cluster normalizado.

Quaisquer pontos fora da região englobada terá pouca influência sobre o ponto de potencial. O ponto com o maior (ou mais alto) potencial é selecionado como pó primeiro centro de cluster. Isto, tentativamente, define o primeiro centro de agrupamento.

2. Um ponto é qualificado como o primeiro centro se o seu valor potencial  $P(1)$  é igual ao máximo do valor potencial ( $P(1)^*$ ) inicial  $P(1)$ , como mostrado na Equação B.2.

$$P(1)^* = \max_i [P(1), P(Z_i)] \quad (\text{B.2})$$

3. Definir um limiar  $\delta$  como decisão para parada ou sequência da procura do centro do agrupamento. Este processo continuará se o presente potencial máximo permanecer maior que  $\delta$  (Equação (B.3)).

$$\delta = (\text{taxa de rejeição}) \cdot (\text{valor potencial do 1º centro de agrupamento}) \quad (\text{B.3})$$

4. Remover o centro de agrupamento anterior de considerações adicionais.
5. Revisar o valor potencial dos pontos remanescentes de acordo com a Equação (B.4).

$$P_i = P_i - P_k^* \cdot e^{-\beta \cdot (Z_i - Z_k^*)^2} \quad (\text{B.4})$$

onde  $Z_k^*$  é o ponto do k-ésimo centro de agrupamento,  $P_k^*$  é valor potencial de  $P_i$  e  $\beta = 4 / r_b^2$ , com  $r_b > 0$ , é o raio da vizinhança na qual uma redução significativa no potencial irá ocorrer.

Os passos descritos acima são repetidos para gerar centros de agrupamentos até que o máximo valor potencial na corrente iteração seja igual ou menor que o limiar  $\delta$ .

Após aplicar a clusterização subtrativa, são obtidos diferentes números de centros de agrupamentos, a partir de  $n$  padrões de treinamento, dependendo da taxa de rejeição.

Ao fim da clusterização, um conjunto de regras fuzzy é obtida. O sistema de inferência fuzzy é gerado com o mínimo número de regras. A clusterização é conduzida em um espaço multidimensional e conjuntos fuzzy são obtidos. Como cada eixo refere-se a uma variável, os centros das funções de pertinência são obtidos pela projeção do centro de cada agrupamento sobre o eixo correspondente. As larguras são dimensionadas com base no raio (radius).

A seguir são introduzidas as principais terminologias relacionadas aos elementos de programação de um algoritmo de clusterização subtrativa. Estas terminologias são as mesmas adotadas pela ferramenta *anfisedit*, presente no MatLAB™.

1. Faixa de influência (*range of influence*): indica o raio de um agrupamento quando o espaço de dados é considerado como um hiper-cubo unitário. Um pequeno raio de agrupamento irá, usualmente, levar à muitos agrupamentos nos dados, resultando em muitas regras e vice-versa;

2. Fator de aglutinação (*squash factor*): fator usado para multiplicar os valores dos raios (*radii values*) que definem a vizinhança do centro de agrupamento. Então, aglutinam-se os pontos mais distantes a serem considerados como parte do agrupamento;
3. Taxa de aceitação (*accept ratio*): esta relação ajusta o potencial como uma fração do potencial do primeiro centro de agrupamento, acima do qual outros pontos de dados serão aceitos como um centro. Altos valores são usados para aceitar pontos de dados que têm um forte potencial de serem usados como centros de agrupamentos.
4. Taxa de rejeição (*reject ratio*): a taxa de rejeição é a condição para rejeitar um ponto de dados a ser usado com um centro de agrupamento, o qual é obtido de frações do potencial do primeiro centro de agrupamento.

Os critérios para consideração do centro de agrupamento são baseados nas taxas de aceitação e rejeição. Baseado na faixa de influência, no fator de aglutinação e nas taxas de aceitação e rejeição, constrói-se o sistema de inferência fuzzy inicial para a definição do modelo.

## **Apêndice C – Lógica Fuzzy**

Todo o processo natural ou tecnológico contém mais ou menos componentes incertos ou tem algum nível de incerteza. Por exemplo, muitos processos técnicos não podem ser caracterizados precisamente por aproximações analíticas ou podem ser descritos usando termos vagos. Com a formulação da teoria fuzzy por Zadeh [66,78], um método matemático para a formulação de incertezas foi introduzido. Durante os anos, os métodos fuzzy têm provado sua eficácia, tanto em aplicações industriais quanto em não industriais. Especialmente no campo da modelagem e controle de processos dinâmicos, onde métodos tradicionais haviam sido preferidos, agora os algoritmos fuzzy têm sido favorecidos. Com o advento de novas tecnologias, requisitos práticos onde métodos tradicionais apresentam falhas frequentemente, tanto pela ausência de modelos exatos quanto pela indisponibilidade de uma descrição matemática precisa ou não disponível ou custosa.

Por sua vez, métodos fuzzy exploram o conhecimento humano especializado ou extrair informações sobre processos a partir de dados medidos. Então, através de uma forma lingüística descrevem-se o comportamento, mesmo complexo, de fenômenos variados.

Afirmações de especialistas ou descrição de processos podem ser abstraídos a partir de descrições técnicas na forma de regras do tipo *se...então...*, como, por exemplo, SE temperatura = alta E tensão = muito baixa ENTÃO pressão do ar = alta . Assim, a lógica fuzzy habilita a descrição de processos e controle em uma forma similar ao pensamento humano. Controladores nebulosos consistem, basicamente, de três estágios:

1. Fuzzificador: transforma os dados numéricos de entrada em informações nebulosas correspondentes;
2. Máquina de inferência fuzzy: composta de uma base de conhecimento (regras) e tomador lógico de decisões, integrado por mecanismos nebulosos de inferência e funções de aglutinação;
3. Defuzzificador: transforma a saída nebulosa do sistema em uma informação numérica.

A Figura B.1 apresenta a estrutura geral de um controlador nebuloso. A interface de fuzzificação, na entrada do controlador, mapeia os sensores (que usam números reais) ou outros tipos de entradas no domínio do mundo real para o domínio nebuloso, que usa números nebulosos. O mapeamento é realizado pelas pertinências da variável real nos conjuntos nebulosos, dentro de uma faixa de valores definidos pelo universo de discurso desta variável.

Como metodologia de inferência fuzzy, nesta tese foi utilizada a estratégia de Mamdani. O método de raciocínio fuzzy de Mamdani é baseado em operadores de inferência MAX-MIN. Os principais fatores que influenciam na seleção desta estratégia são o fato de este raciocínio ser altamente intuitivo, permitindo a elevação do nível de empirismo quando da elaboração dos blocos de regras, principalmente em sistemas altamente não lineares, como é o caso das CaCs, simplificando as atividades do programador, a sua larga aceitação, e o fato de ser bastante adequado para a manipulação por parte do operador.

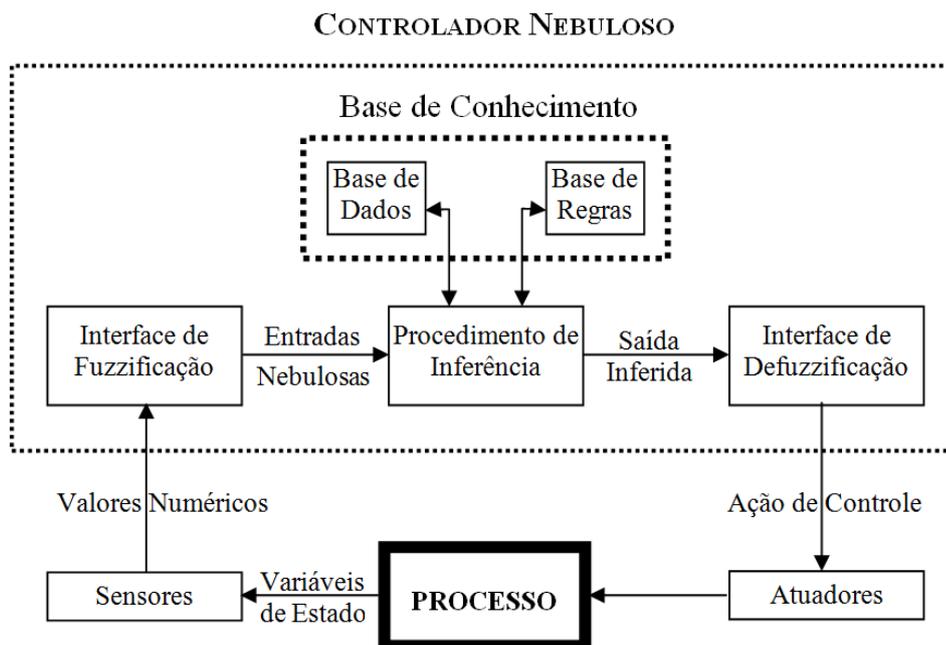


Figura B.1 – Estrutura geral do controlador nebuloso

## Apêndice D – Avaliações das técnicas de modelagem

Neste item são apresentadas as tabelas comparativas dos resultados ensaiados para o desenvolvimento do modelo neuro-fuzzy da CaC 6 kW utilizada na metodologia do Capítulo 3. Estes procedimentos são repetidos para modelar a CaC SR-12 dos Capítulos 4 e 5.

Para os testes relacionados nas tabelas deste apêndice, foram utilizados 50% dos dados coletados da CaC 6 kW para treinamento e 50% para checagem. Como dados de testes foram adotados valores nas faixas de 10 a 15% dos valores nominais. Os dados dos ensaios apresentados possuem as mesmas dimensões dos aplicados no modelo do Capítulo 3.

Os testes apresentados nas tabelas deste apêndice são resultantes de avaliações específicas para a criar o modelo neuro-fuzzy para a CaC 6kW. São testadas quatro combinações de técnicas de particionamento das variáveis de entrada e estratégias de aprendizado. Neste caso, todos estes recursos encontram-se disponíveis na ferramenta *anfisedit* do MatLAB<sup>TM</sup>.

A Tabela D.1 apresenta as nomenclaturas adotadas para as tabelas de testes. A Tabela D.2 apresenta os resultados dos testes para a aplicação da técnica de particionamento da grade (*grid partitioning*) e a estratégia de aprendizado de retro-propagação (*back-propagation*). Observa-se que, para a aplicação desta técnica, o número de épocas de treinamento é bastante

elevado. Entretanto, o número de iterações não corresponde à elevação da precisão do modelo.

Tabela D.1. Nomenclaturas adotadas para os testes

| Sigla             | Definição   |
|-------------------|---|
| RI                | Faixa de influência ( <i>range of influence</i> )   |
| SF                | Fator de aglutinação ( <i>squash factor</i> )   |
| AR                | Taxa de aceitação ( <i>accept ratio</i> )   |
| RR                | Taxa de rejeição ( <i>reject ratio</i> )  |
| ET                | Tolerância ao erro ( <i>error tolerance</i> )   |
| ATE <sub>tr</sub> | Erro médio de teste ( <i>Average testing error</i> ) – plotado contra os dados de treinamento |
| ATE <sub>TE</sub> | Erro médio de teste ( <i>Average testing error</i> ) – plotado contra os dados de teste       |
| ATE <sub>CH</sub> | Erro médio de teste ( <i>Average testing error</i> ) – plotado contra os dados de checagem    |
| NR                | Número de regras  |
| NM <sub>FS</sub>  | Número de funções de pertinência  |
| Epoch             | Época de treinamento  |

D.2 – *grid partitioning + back-propagation*

| Ensaio | Configurações da rede/Partições de entrada |       |       |       | Train. FIS |       | Erros             |                   |                   |         |     |
|--------|--|-------|-------|-------|------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|-----|
|        |  |       |       |       |            |       | ATE <sub>tr</sub> |                   | ATE <sub>te</sub> |         | NR  |
|        | MFin1                                      | MFin2 | MFin3 | MFin4 | ET         | EPOCH | ATE <sub>tr</sub> | ATE <sub>ch</sub> | 10%               | 15%     |     |
| 1      | 2  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 20000 | 0,95809000        | 0,97091           | 0,94726           | 0,95435 | 16  |
| 2      | 3  | 3     | 3     | 3     | 0,5        | 20000 | 0,73662000        | 0,86359           | 0,99933           | 0,92018 | 81  |
| 3      | 4  | 4     | 4     | 4     | 0,5        | 10643 | 0,50000000        | 0,66992           | 0,675             | 0,63944 | 256 |
| 4      | 4  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 9682  | 0,50000000        | 0,66272           | 0,55069           | 0,5617  | 32  |
| 5      | 4  | 3     | 3     | 3     | 0,5        | 20000 | 0,58268000        | 0,74146           | 0,88402           | 0,775   | 108 |
| 6      | 5  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 5012  | 0,49997000        | 0,64839           | 0,60232           | 0,58761 | 40  |
| 7      | 6  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 3301  | 0,49999000        | 0,69869           | 0,62388           | 0,61203 | 48  |
| 8      | 7  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1322  | 0,49998000        | 0,79111           | 0,67336           | 0,66298 | 56  |
| 9      | 8  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 500   | 0,49997000        | 0,88779           | 0,69136           | 0,69203 | 64  |

A Tabela D.3 apresenta os resultados dos testes para a aplicação da técnica de particionamento da grade (*grid partitioning*) e a estratégia de aprendizado híbrida (*hybrid learning*). Esta estratégia de aprendizado utiliza um algoritmo do tipo *steepest descent* (*SD*) agregado a um *least-squares estimator* (*LSE*) [66], de forma a proporcionar uma rápida identificação dos parâmetros e, por consequência, uma rápida convergência para o erro de treinamento pré-definido. Quando comparados com os resultados obtidos para a Tabela D.3, observa-se que o aprendizado híbrido apresenta como vantagem a rápida convergência ao erro de treinamento pré-definido. Na maioria dos casos, em uma época de treinamento o algoritmo foi capaz de convergir para o erro pré-definido, conforme pode-se observar ao compararem-se as Tabelas D.2 e D.4. Todavia, a estratégia de particionamento da grade, na qual os números de funções de pertinência das entradas são pré-definidas pelo usuário apresenta problemas relacionados ao nível de erro de saída. Poucos ensaios apresentam erros finais inferiores a 0,5.

A Tabela D.4 apresenta os resultados dos testes para a aplicação da técnica de clusterização subtrativa (*subtractive clustering*) e a estratégia de aprendizado de retro-

propagação (*back-propagation*). Observa-se que, para algumas configurações da rede, apesar de  $ATE_{tr}$  apresentar convergência, os demais valores de erros de checagem e teste não correspondem a esta convergência. Um exemplo disso são os ensaios 1 e 5 a 15. Assim, conclui-se que, para o caso dos dados da CaC aplicados aqui, a combinação das estratégias de clusterização e aprendizado não são capazes de fornecerem resultados adequados a modelagem.

D.3 – *grid partitioning + hybrid learning*

| Ensaio | Configurações da rede/Partições de entrada |       |       |       | Train. FIS |       | Erros             |                   |                   |         |                   |
|--------|--|-------|-------|-------|------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|
|        |  |       |       |       |            |       | ATE <sub>tr</sub> |                   | ATE <sub>ch</sub> |         | ATE <sub>te</sub> |
|        | MFin1                                      | MFin2 | MFin3 | MFin4 | ET         | EPOCH | ATE <sub>tr</sub> | ATE <sub>ch</sub> | 10%               | 15%     |                   |
| 1      | 2  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 19    | 0,82778000        | 0,74626           | 0,8157            | 0,80613 | 16                |
| 2      | 3  | 3     | 3     | 3     | 0,5        | 200   | 0,50000000        | 0,63875           | 0,65791           | 0,6042  | 81                |
| 3      | 4  | 4     | 4     | 4     | 0,5        | 1     | 0,30618000        | 0,53041           | 0,51037           | 0,52578 | 256               |
| 4      | 4  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,32505000        | 0,53588           | 0,4436            | 0,44139 | 32                |
| 5      | 4  | 3     | 3     | 3     | 0,5        | 1     | 0,30617000        | 0,53027           | 0,81298           | 0,5615  | 108               |
| 6      | 5  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,18432000        | 0,44484           | 0,394             | 0,37048 | 40                |
| 7      | 6  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,09749200        | 0,38712           | 0,5835            | 0,43838 | 48                |
| 8      | 7  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,06424900        | 0,37759           | 0,8875            | 0,60041 | 56                |
| 9      | 8  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,03906200        | 0,45867           | 0,36025           | 0,35483 | 64                |
| 10     | 5  | 5     | 5     | 5     | 0,5        | 1     | 0,16733000        | 0,44143           | 34,781            | 18,3919 | 625               |
| 11     | 9  | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00836160        | 0,37871           | 0,32397           | 0,32696 | 72                |
| 12     | 10   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00343000        | 1,4455            | 0,8267            | 1,0254  | 80                |
| 13     | 11   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00260130        | 0,7062            | 0,45506           | 0,49321 | 88                |
| 14     | 12   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00220900        | 0,52731           | 0,3648            | 0,38293 | 96                |
| 15     | 13   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00250130        | 0,55945           | 0,37985           | 0,37783 | 104               |
| 16     | 14   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00037846        | 0,76269           | 0,53703           | 0,54064 | 112               |
| 17     | 15   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00036558        | 1,8753            | 1,2369            | 1,3117  | 144               |
| 18     | 16   | 2     | 2     | 2     | 0,5        | 1     | 0,00039177        | 39,0837           | 27,6811           | 30,2939 | 176               |

A Tabela D.5 apresenta os resultados dos testes para a aplicação da técnica de clusterização subtrativa (*subtractive clustering*) e a estratégia de aprendizado híbrida (*hybrid learning*). Do mesmo modo que para a Tabela D.4, observa-se que, para algumas configurações da rede, apesar de  $ATE_{tr}$  apresentar convergência, alguns valores dos erros de checagem e teste não correspondem a esta convergência (erro < 0,5). Todavia, esta configuração oferece uma gama maior de opções de arquiteturas de redes, quando comparadas com as combinações anteriores. Além disso, em todos os casos, as convergências de erros se dão em uma época de treinamento, requerendo menos esforço computacional para a construção do modelo. Deve-se ressaltar que os ensaios 36 e 39 não foram capazes, devido as configurações pré-definidas, de inicializar e convergir, respectivamente.

D.4 – *subtractive clustering + back-propagation*

| Ensaio | Configurações da rede |      |      |      |     | Train. FIS |            | Erros       |            |             |    | NR | NMfs |
|--------|-----------------------|------|------|------|-----|------------|------------|-------------|------------|-------------|----|----|------|
|        | RI                    | SF   | AR   | RR   | ET  | EPOCH      | ATEch      |             | ATEte      |             |    |    |      |
|        |                       |      |      |      |     |            | ATEtr      | ATEch       | 10%        | 15%         |    |    |      |
| 1      | 0,5                   | 1,25 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,062652   | 66287,9044  | 939190,52  | 7588726,86  | 22 | 22 |      |
| 2      | 0,1                   | 1,25 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 3,7762E-14 | 0,60676     | 0,46163    | 0,54821     | 95 | 95 |      |
| 3      | 0,05                  | 1,25 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 2,6028E-14 | 0,508       | 0,4217     | 0,4597      | 98 | 98 |      |
| 4      | 0,01                  | 1,25 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 9,3859E-15 | 0,57717     | 7,2643     | 0,56446     | 98 | 98 |      |
| 5      | 0,5                   | 1    | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,02512    | 1000838,901 | 20643714,5 | 18128443,53 | 28 | 28 |      |
| 6      | 0,5                   | 0,5  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,014309   | 1239680,81  | 20378205,7 | 13469366,45 | 34 | 34 |      |
| 7      | 0,5                   | 1,25 | 0,25 | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,055192   | 178670,8386 | 6896696,6  | 5875838,57  | 25 | 25 |      |
| 8      | 0,5                   | 1,25 | 0,1  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01996    | 317960,498  | 9877493,49 | 7852081,82  | 28 | 28 |      |
| 9      | 0,5                   | 1,25 | 0,5  | 0,1  | 0,5 | 1          | 0,062652   | 66287,9     | 9339190,52 | 7588726,86  | 22 | 22 |      |
| 10     | 0,5                   | 1,25 | 0,5  | 0,05 | 0,5 | 1          | 0,062652   | 66287,9     | 9339190,52 | 7588726,86  | 22 | 22 |      |
| 11     | 1                     | 1,25 | 0,5  | 0,05 | 0,5 | 20000      | 2,4826     | 2,5282      | 2,4954     | 2,469       | 2  | 2  |      |
| 12     | 0,9                   | 1,25 | 0,5  | 0,05 | 0,5 | 20000      | 3,4741     | 3,2983      | 6,7762     | 5,9905      | 4  | 4  |      |
| 13     | 0,8                   | 1,25 | 0,5  | 0,5  | 0,5 | 1          | 0,40771    | 1,9397      | 76,9416    | 50,8132     | 6  | 6  |      |
| 14     | 0,5                   | 1,25 | 0,7  | 0,5  | 0,5 | 1          | 1          | 1           | 1          | 1           | 1  | 1  |      |
| 15     | 0,5                   | 1,25 | 0,9  | 0,5  | 0,5 | 1          | 1          | 1           | 1          | 1           | 1  | 1  |      |
| 16     | 0,5                   | 1,25 | 0,5  | 0,2  | 0,5 | 1          | 0,31681    | 1855,7682   | 3772662,69 | 3841288,13  | 17 | 17 |      |

D.5 – *subtractive clustering + hybrid learning*

| Ensaio | Configurações da rede |       |      |      |     | Train. FIS |            | Erros   |         |         |    | NR | NMfs |
|--------|-----------------------|-------|------|------|-----|------------|------------|---------|---------|---------|----|----|------|
|        | RI                    | SF    | AR   | RR   | ET  | EPOCH      | ATEch      |         | ATEte   |         |    |    |      |
|        |                       |       |      |      |     |            | ATEtr      | ATEch   | 10%     | 15%     |    |    |      |
| 1      | 0,5                   | 1,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 10         | 0,31494000 | 0,49408 | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |      |
| 2      | 0,4                   | 1,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,25665000 | 0,44506 | 1,7307  | 0,68125 | 27 | 27 |      |
| 3      | 0,3                   | 1,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,19760000 | 0,33463 | 4,6503  | 2,1326  | 36 | 36 |      |
| 4      | 0,2                   | 1,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,06812900 | 0,36424 | 0,3848  | 0,43445 | 43 | 43 |      |
| 5      | 0,1                   | 1,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00108900 | 0,52106 | 0,37268 | 0,42033 | 95 | 95 |      |
| 6      | 0,5                   | 1     | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,21775000 | 0,42305 | 0,55159 | 0,48209 | 28 | 28 |      |
| 7      | 0,5                   | 0,75  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,25667000 | 0,46411 | 0,642   | 0,59807 | 28 | 28 |      |
| 8      | 0,5                   | 0,5   | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,08000260 | 0,25781 | 14,827  | 7,0601  | 34 | 34 |      |
| 9      | 0,5                   | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,02871700 | 0,20378 | 3,4625  | 0,67354 | 80 | 80 |      |
| 10     | 0,5                   | 1,25  | 0,4  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,32399000 | 0,49408 | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |      |
| 11     | 0,5                   | 1,25  | 0,3  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,31494000 | 0,49408 | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |      |
| 12     | 0,5                   | 1,25  | 0,2  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,29133000 | 0,45334 | 12,3486 | 5,9393  | 26 | 26 |      |
| 13     | 0,5                   | 1,25  | 0,1  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,27048000 | 0,41582 | 8,3254  | 4,1341  | 28 | 28 |      |
| 14     | 0,5                   | 1,25  | 0,5  | 0,1  | 0,5 | 1          | 0,31494000 | 0,49408 | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |      |
| 15     | 0,5                   | 1,25  | 0,5  | 0,05 | 0,5 | 1          | 0,32399000 | 0,49408 | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |      |
| 16     | 0,1                   | 0,25  | 0,1  | 0,05 | 0,5 | 1          | 0,00096448 | 0,51639 | 0,36732 | 0,4213  | 98 | 98 |      |
| 17     | 0,05                  | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00122360 | 0,46741 | 0,3296  | 0,39807 | 98 | 98 |      |
| 18     | 0,04                  | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00096477 | 0,46642 | 0,34384 | 0,41684 | 98 | 98 |      |
| 19     | 0,03                  | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00064538 | 0,46644 | 0,36405 | 0,43549 | 98 | 98 |      |
| 20     | 0,02                  | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00061469 | 0,46643 | 0,37898 | 0,45741 | 98 | 98 |      |
| 21     | 0,01                  | 0,25  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,00053382 | 0,46643 | 0,72595 | 0,47527 | 98 | 98 |      |
| 22     | 0,5                   | 0,125 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01906700 | 0,18987 | 0,52159 | 0,52159 | 91 | 91 |      |
| 23     | 0,5                   | 0,1   | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01906700 | 0,18988 | 1,238   | 0,5216  | 91 | 91 |      |
| 24     | 0,5                   | 0,075 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01906700 | 0,18988 | 1,2381  | 0,5216  | 91 | 91 |      |
| 25     | 0,5                   | 0,05  | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01906700 | 0,18988 | 1,2381  | 0,5216  | 91 | 91 |      |
| 26     | 0,5                   | 0,025 | 0,5  | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,01906700 | 0,18988 | 1,2381  | 0,5216  | 91 | 91 |      |
| 27     | 0,5                   | 1,25  | 0,05 | 0,15 | 0,5 | 1          | 0,15507000 | 0,32368 | 3,7157  | 2,161   | 31 | 31 |      |

|    |     |      |      |       |     |    |            |            |         |         |    |    |
|----|-----|------|------|-------|-----|----|------------|------------|---------|---------|----|----|
| 28 | 0,5 | 1,25 | 0,04 | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,15507000 | 0,32368    | 3,7157  | 2,161   | 31 | 31 |
| 29 | 0,5 | 1,25 | 0,03 | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,15507000 | 0,32368    | 3,7157  | 2,161   | 31 | 31 |
| 30 | 0,5 | 1,25 | 0,02 | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,15507000 | 0,32368    | 3,7157  | 2,161   | 31 | 31 |
| 31 | 0,5 | 1,25 | 0,01 | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,15507000 | 0,32368    | 3,7157  | 2,161   | 31 | 31 |
| 32 | 0,5 | 1,25 | 0,5  | 0,015 | 0,5 | 1  | 0,32399000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 33 | 0,5 | 1,25 | 0,5  | 0,01  | 0,5 | 1  | 0,32399000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 34 | 0,5 | 1,5  | 0,5  | 0,005 | 0,5 | 1  | 0,32399000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 35 | 1   | 1,75 | 0,5  | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,71168000 | 0,69411000 | 0,68775 | 0,6912  | 2  | 2  |
| 36 | 1,5 | 2    | 0,5  | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,00000000 | 0          | 0       | 0       | 0  | 0  |
| 37 | 0,5 | 1,5  | 0,5  | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,77743000 | 0,70324    | 15,4369 | 8,8242  | 15 | 15 |
| 38 | 0,5 | 1,75 | 0,5  | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,95836000 | 0,76733    | 12,4172 | 6,9407  | 12 | 12 |
| 39 | 0,5 | 2    | 0,5  | 0,15  | 0,5 | 40 | 0,63114000 | 0,60676    | 30,7228 | 13,6895 | 11 | 11 |
| 40 | 0,5 | 1,25 | 1    | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,31494000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 41 | 0,5 | 1,25 | 1,5  | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,32399000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 42 | 0,5 | 1,25 | 2    | 0,15  | 0,5 | 1  | 0,32399000 | 0,49408    | 12,3697 | 5,8621  | 22 | 22 |
| 43 | 0,5 | 1,25 | 0,5  | 0,2   | 0,5 | 2  | 0,72686000 | 0,65982    | 15,8267 | 7,1239  | 17 | 17 |
| 44 | 0,5 | 1,25 | 0,5  | 0,25  | 0,5 | 5  | 0,79655000 | 0,70393    | 33,1099 | 14,8613 | 16 | 16 |
| 45 | 0,5 | 1,25 | 0,5  | 0,3   | 0,5 | 5  | 0,79655000 | 0,70393    | 33,1099 | 14,8613 | 16 | 16 |

Pela comparação experimental das técnicas de geração das estruturas neuro-fuzzy observa-se que as redes estruturadas com o particionamento das grades apresentam tempos de iteração na faixa de 5 a 150 minutos. Por outro lado, pelo uso da clusterização subtrativa, este tempo é reduzido para menos de 60 segundos. Isto se deve a rapidez de produção dos centros de clusters, conforme definidos nas equações do Apêndice B.

Assim, pela comparação das técnicas de geração das redes neuro-fuzzy apresentadas e comparadas nas Tabelas D.2 a D.5, opta-se nesta tese pela construção do modelo usando-se a técnica de clusterização subtrativa em conjunto com o aprendizado híbrido.

## Apêndice E – Interface de Potência

### E.1 Introdução

A modulação da carga da célula a combustível como forma de geração distribuída (GD) também contribui para a operação eficiente desta fonte alternativa através da modulação de corrente e da tensão de carga. Abordagens baseadas em geração distribuída (GD), especialmente aquelas que fazem uso de CaCs podem operar isoladamente de outras redes de energia elétrica ou conectada a uma rede, configurando assim uma rede de GD. De acordo

com [40], sistemas autônomos requerem o uso de elementos acumuladores de energia (baterias, supercapacitores, dentre outros), com o intuito de suprir energia nos períodos de falta da energia primária e aumentar a confiabilidade. Por sua vez, os sistemas interligados, conectados a uma rede principal, podem dispensar o uso destes acumuladores, uma vez que funcionam como geradores ligados em paralelo que podem ser abastecidos pela própria rede nos intervalos de falta de energia primária. Assim, o balanço de potência pode ser feito por um controle local, pela contribuição das correntes provenientes das diferentes fontes que alimentam a carga local – gerador CaC e rede principal.

Este apêndice mostra detalhes do desenvolvimento de uma interface de potência como meio responsável da melhora da eficiência energética por controle do fluxo de energia entre a CaC e a carga ou a rede principal. Este sistema é baseado numa CaC como uma fonte de baixa tensão e alta corrente. Para elevar a tensão de saída da pilha ( $V_{CaC}$ ) é empregado um conversor CC/CC. Porém, desde que os dois dispositivos (CaC e conversor) possuem diferentes dinâmicas, eles necessitam ser coordenados para poder suprir a demanda da carga nos momentos de falta de geração primária. Incluiu-se também, uma análise das situações de ilhamento do sistema de GD com a rede própria para fontes alternativas de energia. O ilhamento representa uma situação de risco pessoal e de estabilidade, especialmente para a plataforma baseada em CaCs. No caso da CaC operar conectada a uma rede principal, ambas as fontes deverão compartilhar a carga local. Porém, uma vez que a rede local está isolada da rede principal, a CaC deve ser capaz de suprir parte da demanda desta carga local estipulada para ela. Durante esta transição de carga, a variação de potência adicional deverá impactar diretamente sobre a pilha, afetando a sua eficiência e forçando uma modificação das condições de operação. Também são apresentados os projetos das interfaces de potência, incluindo resultados de simulações para a interface de potência nas condições de ilhamento.

## E.2 Fundamentos da interface de potência

Em [79] é realizado um estudo sobre a interface de potência mais adequada para aplicações em CaCs e com menor impacto de corrente sobre a pilha. Neste trabalho, discorre-se sobre a topologia mais adequada para o condicionamento da energia gerada por uma CaC, incluindo critérios de projeto e controle. São consideradas as vantagens e desvantagens de

diferentes tipos conversores. Conclui-se que uma possível solução é a utilização de um sistema de dupla conversão para acoplamento com a rede. O primeiro estágio é composto por um conversor CC-CC tipo Boost (ou *Step-up*), controlado por corrente, que absorve corrente da CaC com baixa ondulação. O segundo estágio é composto por um conversor CC-CA. Para o conversor CC-CA leva-se em conta características tais como: reduzida distorção harmônica na corrente que circula pela rede e fator de potência próximo da unidade. Devido ao fato de se controlar o conversor CC-CC no modo corrente cabe ao inversor estabilizar a tensão do barramento CC. Com relação à injeção na rede, a energia produzida pode ser consumida localmente ou enviada à rede conforme o balanço de potência. Se a carga local demandar potência superior àquela gerada pela CaC, a rede deve compensar o excesso.

A Figura E.1 mostra um diagrama simplificado da proposta para o conversor Boost e a CaC. Na Figura E.2 visualiza-se o esquema do inversor CC/CA trifásico proposto nessa tese. Nesta Figura,  $V_{CC}$  representa a tensão de saída do conversor Boost (estágio CC/CC).

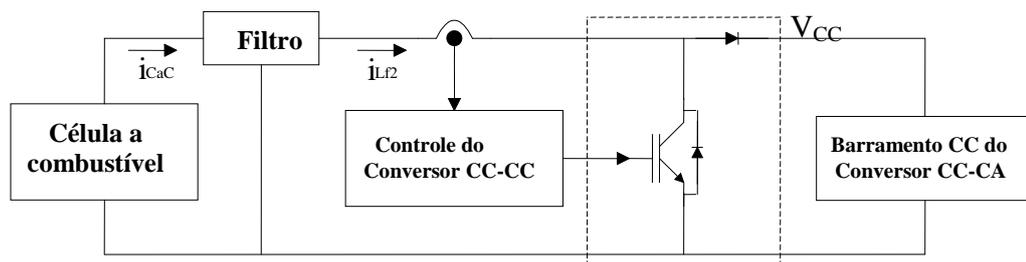


Figura E.1 – Conversor Boost com controle da corrente de saída

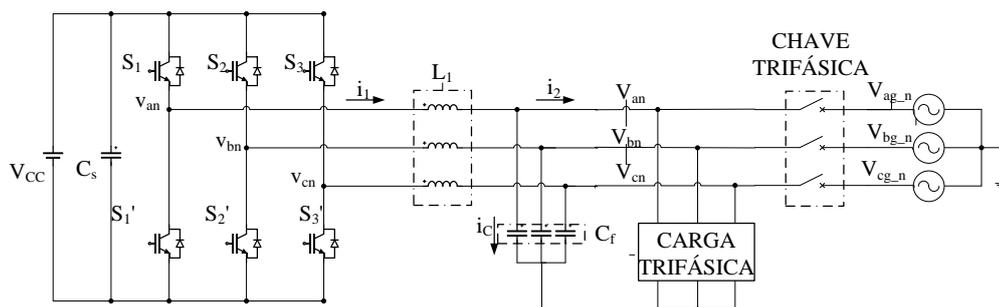


Figura E.2 – Inversor CC/CA trifásico

### E.3 Projeto conversor CC-CC: Componentes e controle

Em [80] um conversor Boost operando no modo de condução contínua, usando um compensador de corrente do tipo proporcional-integral (PI) é selecionado como interface CC-CC e técnica de controle. Esta escolha se dá pela larga variação nos parâmetros da CaC

durante sua operação. O modo corrente foi usado para permitir a seleção de um ponto ótimo de operação no fornecimento de potência para um dado conjunto de condições de operação, requerendo assim, apenas o ajuste de corrente da CaC. Dessa forma, torna-se possível manter a CaC dentro das condições de operação desejadas em sua curva característica.

Na Figura E.3 é representado o diagrama de blocos do controlador do conversor CC-CC. Usa-se uma função de transferência simplificada (Equação (E.1)) para o conversor com o objetivo de simplificar a análise e o desenvolvimento do projeto. As variáveis  $\tilde{I}_{L_2}$  e  $\tilde{d}$  representam as oscilações ao redor do ponto médio de corrente do conversor Boost e o ciclo de serviço (*duty cycle*), respectivamente.

$$\frac{\tilde{I}_{L_2}}{\tilde{d}} \cong \frac{V_{CC}}{s \cdot L_2} \quad (\text{E.1})$$

onde  $PI_{I_{L_2}}$  corresponde à sub-rotina para controle do conversor no modo corrente e  $PWM_{I_{L_2}}$  é a rotina de modulação por largura de pulso. De acordo com as equações (E.2) e (E.3) a margem de fase ( $mf_{FC}$ ) e a frequência de corte ( $\omega_{FCLFC}$ ) foram usadas para obter os parâmetros  $k_{propFC}$  e  $k_{intFC}$  do compensador PI.

O filtro T entre a pilha e o conversor “Boost” é escolhido especialmente por filtrar a ondulação de corrente do conversor que flui para a CaC, amortecendo os surtos de corrente advindos de variações e surtos de corrente da carga e ainda atuando como a indutância Boost de corrente. Esta rede  $L \cdot C$  de ordem elevada permite a redução da ondulação de corrente sobre os terminais da CaC. Na Figura E.3, são introduzidos os parâmetros  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_{FC}$  do filtro, usados para minimizar a ondulação de corrente através dos terminais da CaC, onde  $R_{L_2}$ ,  $R_{L_1}$ ,  $R_{FC}$ , são as componentes parasitas mais importantes do filtro.

O projeto dos componentes passivos do filtro considera a potência de saída  $P_o(W)$ , a frequência  $f_s$  (Hz) de chaveamento do Boost, a tensão  $V_{CaC}(V)$  nos terminais da pilha e a tensão  $V_{CC}(V)$  de saída do conversor selecionados a partir das características do gerador. Usando a função de transferência simplificada para o conversor, a indutância  $L_2$  pode ser representada, conforme a Equação (E.4).



$L_1 \cdot C_{FC}$ . Para o projeto de  $L_1$  observa-se o seguinte:  $L_1$  contribui para a redução da maior parte da ondulação de corrente do seu valor original de 20,0%, com  $L_2$ , para 2,0%, quando da inclusão do braço  $L_1 \cdot C_{FC}$ . A Equação (E.6) representa o projeto deste componente.

$$L_1 = \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r} \cdot 16 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot C_{FC}} \quad (\text{E.6})$$

onde  $r$  é a porcentagem da ondulação de corrente nos terminais da pilha.

O controle no modo corrente do conversor Boost atende aos requisitos de operação da CaC em regime permanente. Isto é necessário, pois a CaC tem seu melhor desempenho e atinge sua capacidade de geração selecionada quando funcionar na região linear da curva de polarização  $V \times I$ . Com este procedimento, é possível gerenciar de forma otimizada os níveis de eficiência desejados para a operação da CaC dentro de cada faixa de potência de saída. Com esta alternativa, o desenvolvimento do algoritmo para gerenciamento da CaC fica com maior grau de liberdade para sua operação.

Uma aplicação típica deste sistema é a conexão com uma rede principal. Entretanto, a tensão  $V_{CC}$  do barramento de saída do inversor deve ser considerada constante e deve ser controlada pela interface CC-CA. O projeto desta interface é apresentado na próxima seção.

#### E.4 Projeto inversor CC-CA: Componentes e controle

Uma vez que a CaC deve ser conectada à rede através de conversores e inversores, a solução mais interessante para controlar o conversor CC-CA é o modo corrente. Isso permite obter sempre o maior nível de potência possível entregue pelo gerador à carga sem surtos para a fonte. Para tanto, a concessionária deve definir a tensão e a frequência no ponto de acoplamento comum (PCC) no qual se inserem as cargas, o produtor local de energia e a rede da concessionária. De acordo com essa premissa, é montado o diagrama de blocos da Figura E.4. Uma vez que o objetivo deste projeto foca uma futura implementação em base digital, as variáveis envolvidas devem ser projetadas e analisadas neste domínio.

O bloco  $1/s.L_o$  é a função de transferência tensão-corrente do filtro de saída do conversor CC-CA. Tal aproximação é válida se a impedância carga/rede é muito menor que a

impedância do filtro capacitivo e se a frequência de amostragem for suficientemente grande quando comparada à frequência da corrente fundamental que se deseja sintetizar [81,82].

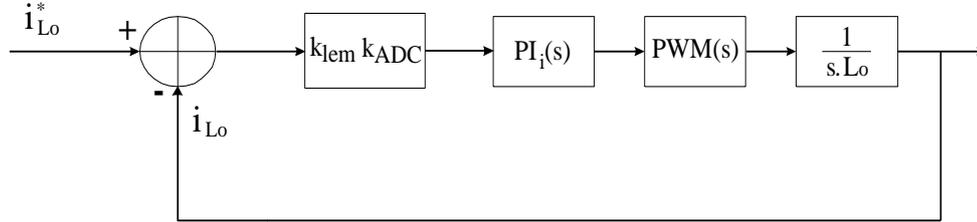


Figura E.4 – Controle de corrente em malha fechada

onde  $k_{lem}$  é a constante de proporcionalidade entre os sensores de corrente e o conversor analógico digital da plataforma digital e  $k_{ADC}$  é a constante que converte as entradas da plataforma digital em valores hexadecimais.

O bloco PWM é igual a  $(V_{CC}/2) \cdot e^{-sT/2}$ , o qual é modelado como a tensão do barramento CC com variação da largura de pulso e a tensão aplicada pelo inversor ao sistema. O período  $T$  é a taxa de amostragem e é igual ao período de comutação dos interruptores.

A variável  $i_{Lo}^*$  representa as correntes de referência por fase para as indutâncias do filtro de saída e  $i_{Lo}$  são as correntes medidas sobre estas indutâncias.

Para o projeto do compensador PI é necessário a escolha da margem de fase ( $m_{fi}$ ) e da frequência de corte que se deseja obter em malha fechada ( $F_{CLi}$ ). Baseando-se neste diagrama, a Equação E.1 fornece o ganho de malha aberta que serve para a determinação das constantes do controlador PI. Após definido o ganho em malha aberta  $G_{OLi}$  (Equação (E.7)) e com a imposição da frequência de corte da malha fechada, o ganho proporcional do compensador PI ( $k_{propi}$ ) de corrente é dado pela Equação (E.8). O ganho integral é calculado na Equação E.9.

$$G_{OLi} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{CC}}{2^{15}} \cdot k_{lem} \cdot k_{ADC} \cdot \frac{1}{L_o} \quad (E.7)$$

$$k_{propi} = \frac{F_{CLi}}{G_{OLi}} \cdot 2 \cdot \pi \quad (E.8)$$

$$k_{\text{inti}} = \frac{k_{\text{propi}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{\text{CLi}}}{\tan(m_{\text{fi}})} \quad (\text{E.9})$$

Uma vez definidas ambas as constantes com as expressões obtidas nas equações E.7 e E.8, pode-se calculá-las usando os parâmetros mostrados no Quadro E.1.

| $F_{\text{CLi}}(\text{Hz})$ | $m_{\text{fi}}(^{\circ})$ | $V_{\text{CC}}(\text{V})$ | $L_o(\text{mH})$ | $k_{\text{lem}}$ | $k_{\text{ADC}}$ |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1000                        | 70                        | 300                       | 0,7              | 1/5              | $2^{15}$         |

Quadro E.1 – Parâmetros do sistema – PI corrente

A proposta apresentada nesta tese tem como princípio operar a CaC conectada à rede, visando a eficiência otimizada. Assim, considera-se que a rede tem uma impedância muito baixa e, portanto, desprezível. Assim, a resposta em frequência é apresentada apenas para impedâncias muito baixas da carga e da rede ( $Z_{\text{carga}}//\text{rede} \cong 0$ ). Portanto, nas frequências de interesse (Figura E.5), tanto fase quanto ganho não necessitam ser compensados, isto é apenas o controlador PI é suficiente para zerar o erro de fase e amplitude. Esta análise é válida somente se o conversor CC-CA estiver operando no modo corrente e a rede estiver presente.

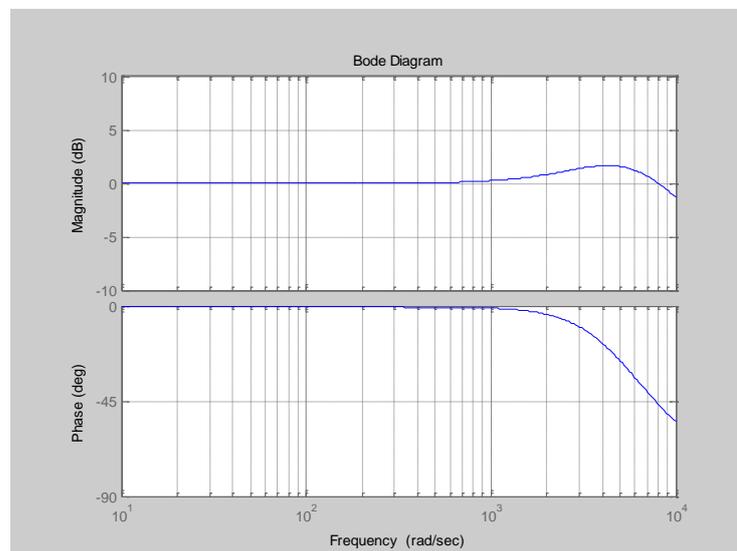


Figura E.5 – Resposta em frequência do controle de corrente em malha fechada

## E.5 Controle PI da Tensão do Barramento CC

Para projetar o controle da tensão do barramento CC assume-se que o elemento

armazenador de energia possui uma grande capacidade. Isso implica em que tal componente seja projetado para apresentar resposta lenta quando submetido a variações em degrau. Levando-se em conta a imposição de dinâmicas lentas para a tensão do barramento CC, também utiliza-se um controlador do tipo PI para controlá-la. Assim, a saída do controle da tensão CC multiplicada pela tensão de fase da rede produz a referência para o controle da corrente CA. O diagrama de controle é visualizado na Figura E.6.

Como são desejadas mínimas ondulações de tensão do barramento CC e dado que o capacitor tem valor elevado, resta impor na Equação (E.10) a condição  $\Delta V_{CC} \cong 0$ . Isto é, tais variações são proporcionais às variações sobre a corrente do barramento CC.

$$\Delta P_{CC} = \Delta(V_{CC} \cdot i_{CC}) = \underbrace{\Delta V_{CC} \cdot i_{CC}}_{=0} + V_{CC} \cdot \Delta i_{CC} = V_{CC} \cdot \Delta i_{CC} \quad (\text{E.10})$$

Para obter-se um fator de potência unitário, a potência  $P_o$  é obtida na Equação (E.11).

$$P_o = 3 \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (\text{E.11})$$

onde  $V_{rms}$  e  $I_{rms}$  representam a tensão de fase imposta pela rede da concessionária e a corrente de fase que circula do conversor para a rede/carga ou vice-versa, respectivamente.

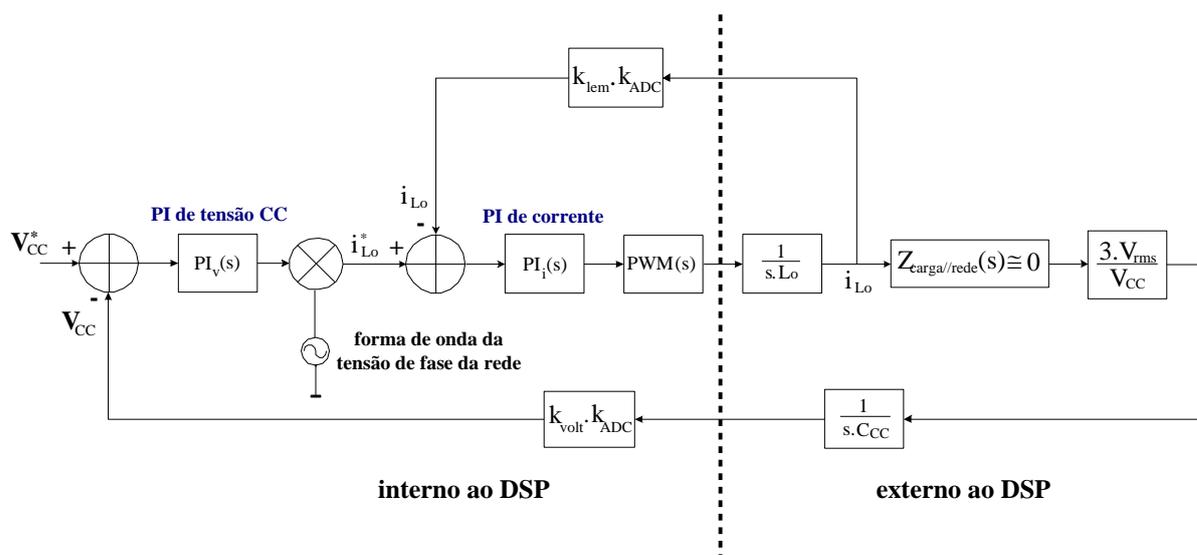


Figura E.6 – Diagrama do controle CC

Toda a variação associada a  $P_o$  é devida a  $I_{rms}$  (Equação (E.12)). Igualando as Equações (E.10) e (E.12) o resultado é  $\Delta I_{CC}$  em função de  $\Delta I_{rms}$  (Equação (E.13)).

$$\Delta P_o = 3 \cdot V_{rms} \cdot \Delta I_{rms} \quad (E.12)$$

$$\Delta I_{CC} = \frac{3 \cdot V_{rms} \cdot \Delta I_{rms}}{V_{CC}} \quad (E.13)$$

Nos passos seguintes determinam-se os ganhos proporcional e integral do controle do barramento CC. São arbitradas a margem de fase ( $mf_{CC}$ ) e a frequência de corte de malha fechada ( $F_{CLCC}$ ). De forma similar à apresentada no controle de corrente do conversor CC-CA e utilizando o diagrama de blocos da Figura E.6, obtém-se o ganho de malha aberta de acordo com a Equação E.8. Com  $F_{CLCC}$  e  $mf_{CC}$  obtém-se os ganhos, proporcional ( $k_{propCC}$ ) (Equação E.9) e integral (Equação E.10) para o compensador PI da tensão do barramento CC.

$$G_{OLCC} = \frac{3 \cdot V_{rms} \cdot k_{volt}}{V_{CC} \cdot 2^{15}} \cdot \frac{1}{C_{CC} \cdot k_{lem}} \quad (E.14)$$

$$k_{propCC} = \frac{F_{CLCC}}{G_{OLCC}} \cdot 2 \cdot \pi \quad (E.15)$$

$$k_{intCC} = \frac{k_{propCC} \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{CLCC}}{\tan(mf_{CC})} \quad (E.16)$$

O Quadro E.2 mostra os parâmetros para o projeto do controlador da tensão CC.

| $F_{CLCC}(Hz)$ | $mf_{cc}(^{\circ})$ | $V_{CC}(V)$ | $C_{CC}(\mu F)$ | $V_{rms}(V)$ | $k_{ADC}$ | $k_{volt}$ |
|----------------|---------------------|-------------|-----------------|--------------|-----------|------------|
| 15             | 75                  | 300         | 2500            | 80           | $2^{15}$  | 1/350      |

Quadro E.2 – Parâmetros do sistema – PI tensão do barramento CC

## E.6 Controle do Conversor CC-CC

Pelo fato da CaC possuir uma dinâmica largamente variável conforme as condições de carga se alteram, é mais indicado realizar o controle do conversor CC-CC no modo de

condução contínua. Assim, a fonte trabalha em um ponto de operação único e toda energia produzida ou será consumida localmente ou injetada na rede.

Usa-se o PI para obter o erro zero entre a corrente de referência e a corrente sobre a indutância  $L_{f2}$  em regime permanente. A Figura E.7 apresenta o diagrama de controle.

O critério de projeto das constantes do  $PI_{i_{L_{f2}}}(s)$  é baseado no método "state space averaging". Esse método é representado pela Equação (E.17) e é uma simplificação da função de transferência da planta. O regulador de corrente é projetado como se a carga fosse puramente indutiva.

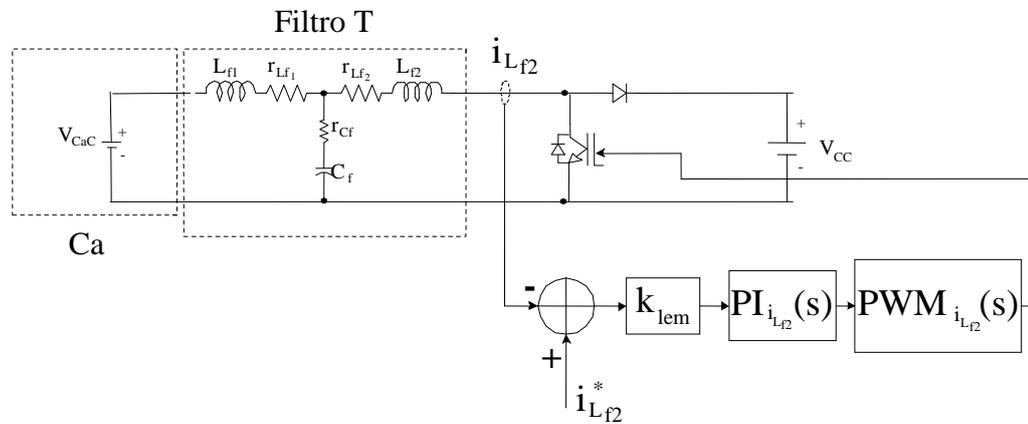


Figura E.7 – Diagrama de controle do conversor CC-CC

onde  $k_{lem}$  é o ganho do sensor de corrente (1 pu = 20 A),  $PI_{i_{L_{f2}}}(s)$  é a função de transferência do PI que controla a corrente do conversor CC e  $PWM_{i_{L_{f2}}}(s)$  é o ganho do PWM, respectivamente.

$$i_{L_{f2}} \cong \frac{V_{CC}}{s \cdot L_{f2}} \cdot \delta. \quad (E.17)$$

onde  $i_{L_{f2}}$  é a corrente média sobre a indutância  $L_{f2}$  e  $\delta$  é o ciclo de serviço.

De forma similar aos projetos anteriores, são definidos os parâmetros para  $PI_{i_{L_{f2}}}(s)$ : a margem de fase do "Boost" (mfFC) e a frequência de corte em malha fechada imposta pelo controle ( $F_{CLFC}$ ). Os parâmetros utilizados no projeto são mostrados no quadro E.3.

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

Quadro E.3 – Parâmetros do sistema – PI da fonte CC

As constantes proporcional ( $k_{propFC}$ ) e integral ( $k_{intFC}$ ) dependem do ganho em malha aberta  $G_{OLFC}$ , da frequência de corte e da margem de fase (Equações (E.18) e (E.19)).

$$k_{propFC} \cdot \frac{G_{OLFC}}{\omega_{FCLFC}} = 1 \quad (E.18)$$

$$k_{intFC} = k_{propFC} \cdot \frac{\omega_{FCLFC}}{\tan(mfFC)} \quad (E.19)$$

## E.7 Ilhamento

Este item refere-se aos resultados obtidos para a simulação do inversor trifásico em condições de ilhamento [83-86]. O objetivo é estudar a resposta do inversor trifásico quando da ocorrência de uma falha que culmine na isolação do sistema local da rede principal. Este efeito é de grande importância para um sistema de geração distribuída baseado em CaC uma vez que a operação eficiente é altamente dependente das condições de carga. É fundamental observar o comportamento do utilitário local para a ocorrência de uma falta na rede de fornecimento principal. O gerador, uma vez desconectado da rede, deve ser capaz de manter a carga em operação, dentro de condições de segurança e estabilidade, salientando-se que a integridade da fonte não pode ser comprometida. Além disso, a variação de carga durante a desconexão da rede deve ser considerada, uma vez que isso afeta a eficiência da CaC, em consequência da elevação da potência demandada colocar a CaC fora de sua melhor faixa de eficiência e conservação da pilha. Deve ser levado em conta aqui que durante a operação no modo conectado com a rede haverá compartilhamento de cargas entre o sistema de geração local e o anel de fornecimento principal.

Os critérios aplicados para a criação do algoritmo de detecção de ilhamento foram baseados na norma IEEE-1547/2003 [87]. Esta norma estabelece os requisitos e

especificações que os sistemas de conversão para geração distribuída têm que cumprir para terem sua reconexão com a rede permitida.

Em [88] são avaliadas as diferenças da aplicação das técnicas de controle de inversores no sistema de coordenadas *DQO* e por meio do controle P+Ressonante, voltadas para condições de ilhamento. Os critérios aplicados para a criação dos algoritmos de controle são baseados na norma IEEE-1547/2003 [87]. Ambos os métodos de controle são testados. Apesar de o controle P+Ressonante ser mais simples por conter apenas matrizes com constantes durante o estágio de transformação das coordenadas, o uso do sistema *DQO* é preferível nesta tese, pois pode ser aplicado com poucas modificações, tanto em circuitos monofásicos quanto em circuitos trifásicos.

O modelo para verificação do ilhamento foi testado em ambiente *MatLab<sup>TM</sup>/Simulink SimPowerSystems Toolbox*. Os laços de controle são descritos nas seções anteriores e usam o sistema *DQO* para simplificar os cálculos dos compensadores. O sistema de coordenadas *DQO* é usado para reduzir a complexidade do projeto dos compensadores. Para converter *ABC* para *DQO* a Equação (E.20) é usada.

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{2}{3} \cdot (V_a \cdot \sin \omega t + V_b \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + V_c \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3)) \\ V_q &= \frac{2}{3} \cdot (V_a \cdot \cos \omega t + V_b \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) + V_c \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3)) \end{aligned} \quad (\text{E.20})$$

onde  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  e a informação sobre  $f$  vem de um PLL [89-91], e sua estrutura básica é apresentada na Figura E.8.

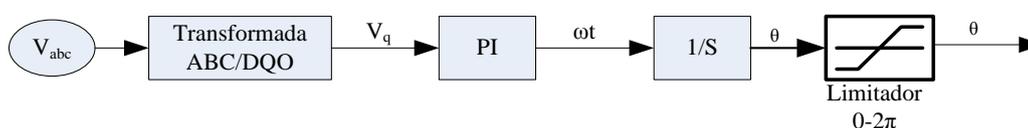


Figura E.8 – Estrutura do PLL

A Figura E.9 mostra o diagrama geral usado no simulador, incluindo medições, circuito e controle.

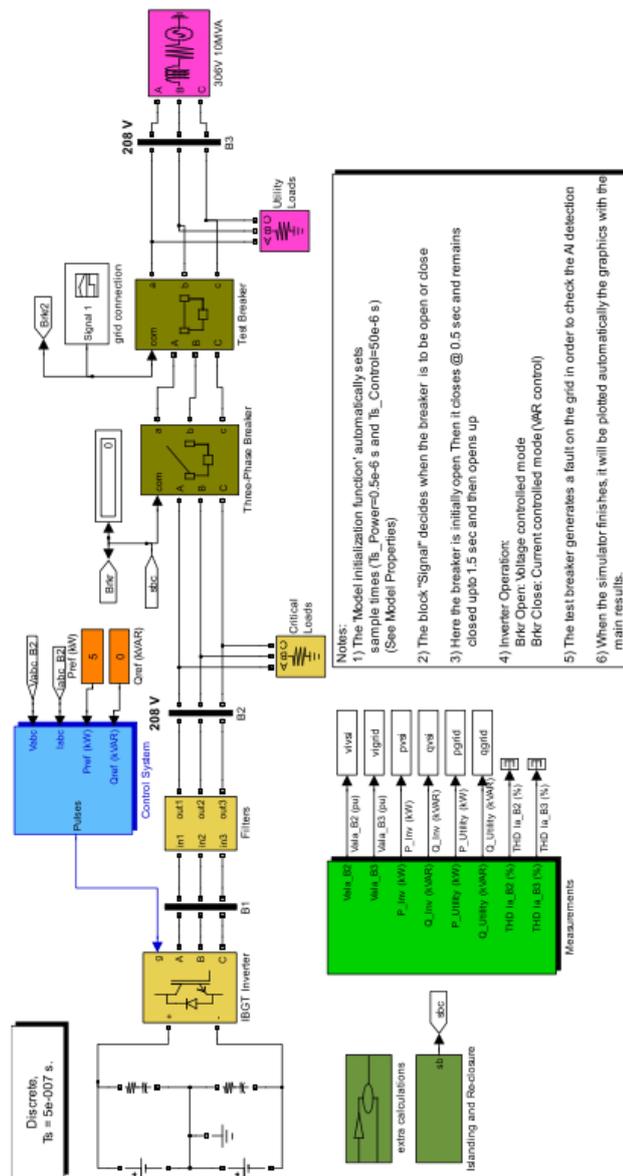
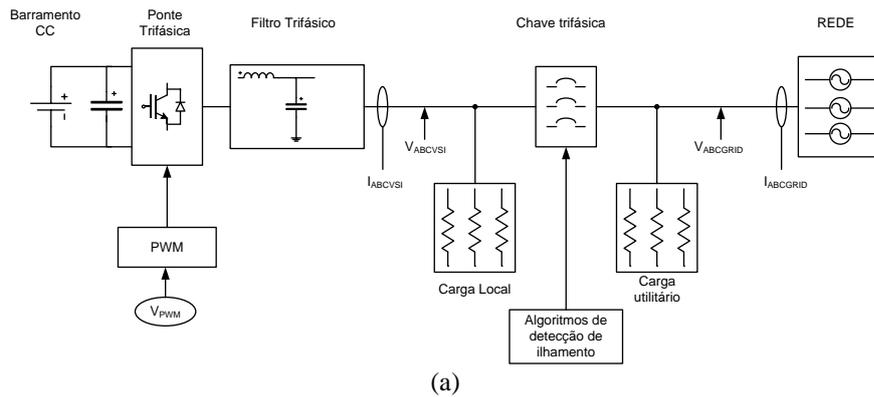


Figura E.9. (a) Diagrama geral do simulador, (b) Estrutura do modelo em Simulink™

O método de detecção de ilhamento usado é baseado em um algoritmo passivo (Figura E.10). Assumindo-se que o inversor esteja operando conectado à rede, este algoritmo compara

tensão e frequência instantâneas com as faixas nominais. Se a tensão está fora da faixa de 0,88 a 1,10  $V_{PU}$  ou a frequência está fora da faixa de 59,30 to 60,50 Hz, então o sistema local é considerado ilhado. Estas faixas de operação são definidas na norma IEEE-1547 [87].

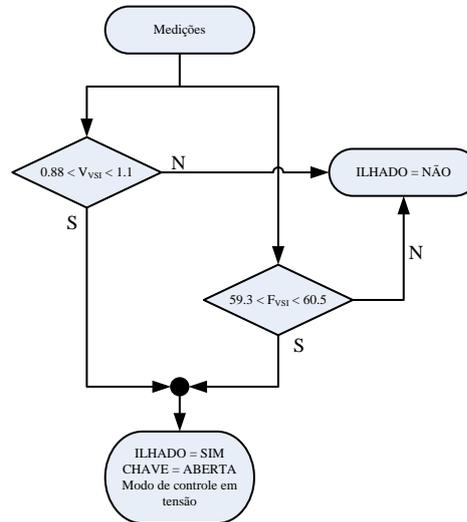


Figura E.10 – Detecção de ilhamento

No próximo parágrafo é apresentado o código-fonte (*script* do MatLAB™) usado para implementar a detecção de ilhamento nas simulações.

```

function [Sb,AI,Md] = fcn(Sbo,Vdvs_i,fvsi,Vdg,fg,th_vsi,th_g,AIo,vd_g,Mdo,delta_theta)
% Md = mode flag (islanded or connected)
% Sb = Switch breaker control
% Vdvs_i = D-axis voltage of voltage source inverter
% Vdg = D-axis voltage of grid
% fvsi = vsi frequency
% fg = grid frequency
% th_vsi = vsi phase angle
% th_g = grid angle
% AI = Anti-Islanding flag
% delta_theta = difference between th_vsi and th_g
% Sub-index 'o' means previous iteration step X(k-1)
Md = Mdo;
%-----
% Islanding testing (check IEEE-1547)
if Vdvs_i >= 1.1 || Vdvs_i <= 0.88 || fvsi >= 60.5 || fvsi <= 59.3
    AI = 1; Sb = 0; Md = 1;
else
    AI = 0; Sb = 1; Md = 0;
end
%-----
  
```

Quando o inversor opera conectado à rede, a diferença de fases é corrigida durante a geração das referências para o modulador PWM usando a Equação (E.21).

$$\begin{aligned}
V_{Aref} &= V_m \cdot \sin(\omega t + 0 - |\Delta\theta|) \\
V_{Bref} &= V_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - |\Delta\theta|) \\
V_{Cref} &= V_m \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - |\Delta\theta|)
\end{aligned}
\tag{E.21}$$

onde  $V_{A...Cref}$  são os sinais de referência para o modulador SPWM,  $V_m$  é a amplitude de referência e  $\Delta\theta$  é a diferença de fase entre o inversor e a rede, calculada de acordo com a Equação (E.22).

$$\begin{aligned}
\Delta V &= V_{VSI} - V_{rede} \\
\Delta f &= f_{VSI} - f_{rede} \\
\Delta\theta &= \theta_{VSI} - \theta_{rede}
\end{aligned}
\tag{E.22}$$

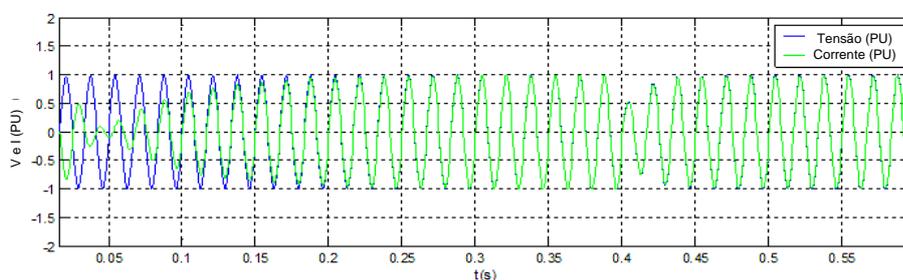
Alguns testes foram realizados com o simulador para averiguar os efeitos do ilhamento, principalmente do ponto de vista da variação da potência requerida e do compartilhamento de carga entre o gerador local e a rede primária. Os resultados das simulações são apresentados em PU (com  $V_{base} = 208 \text{ V}$  and  $P_{base} = 5 \text{ kW}$ ).

As Figuras E.11 e E.12 mostram a resposta do inversor quando da ocorrência do ilhamento, no tempo  $t = 0,4s$ . Entre  $t = 0s$  e  $t = 0,15s$  há um tempo para inicialização do modelo, o qual pode ser desprezado para fins de análise. Neste caso, o inversor foi ajustado para fornecer até  $5 \text{ kW}$ . O ilhamento ocorre em  $0,4s$ . A carga local conectada ao inversor é de  $5 \text{ kW}$  e a rede possui uma carga de  $10 \text{ kW}$ .

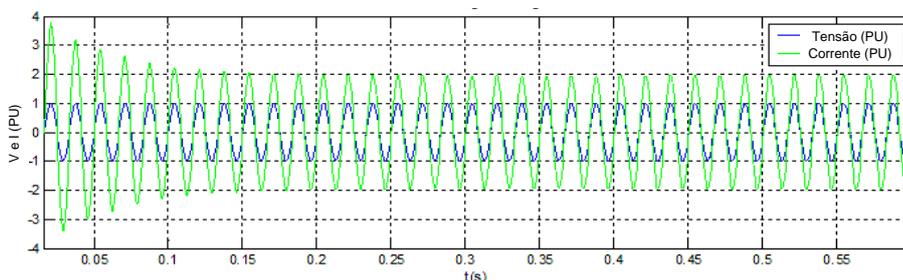
Como pode ser visto na Figura E.11, enquanto a rede é desconectada do sistema local, as mudanças nos laços de controle não afetam a carga local nem a carga da rede, exceto por um pequeno transitório inferior a três ciclos. Uma vez que o inversor conectado ao gerador local é ajustado para fornecer  $5 \text{ kW}$ , não há compartilhamento de carga entre o sistema local e a rede. No caso da Figura E.12, é possível ver-se que, devido à mudança das malhas de controle, ocorre um transitório de potência. Em virtude da CaC possuir uma dinâmica lenta com tempos de resposta, em geral, da ordem de segundos, este transitório pode ser considerado desprezível.

As Figuras E.13 e E.14 mostram a um evento de ilhamento em  $t = 0,4s$ . Neste caso, a carga local é de  $1,0 \text{ kW}$ , enquanto o inversor está ajustado para fornecer até  $5 \text{ kW}$ . Na Figura E.13, analisando a amplitude da corrente, observa-se que o inversor fornece parte da corrente demandada pela carga da rede principal. Na Figura E.14 observam-se os efeitos do

compartilhamento de carga através da medição de potência. Em modo conectado conclui-se que o gerador local é capaz de compartilhar a carga. Isto é importante do ponto de vista da central geradora baseada em CaCs, pois a não previsão desta operação pode causar danos à CaC, reduzindo a sua vida útil e/ou forçá-la a operar fora de suas faixas ideais. Isto implica que, devido a variação da potência demandada, o algoritmo de gerenciamento deve ser capaz de compensar esta variação. Assim, o sistema incluindo a pilha tem sua eficiência alterada em decorrência do grau de variação da potência requerida. Assim, para a utilização de uma CaC em sistemas de geração distribuída, a consideração do efeito ilhamento é crítica.

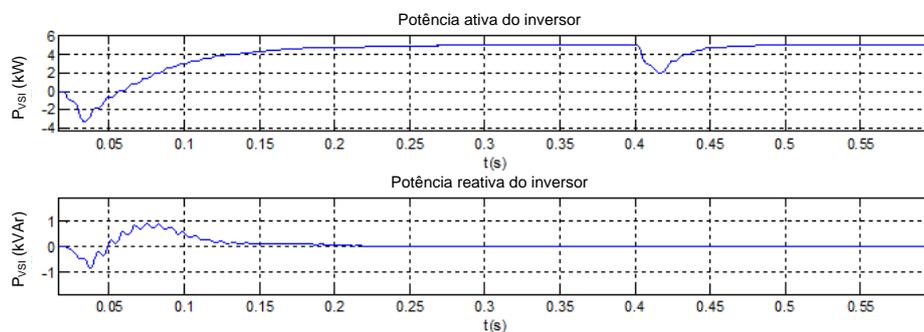


(a)

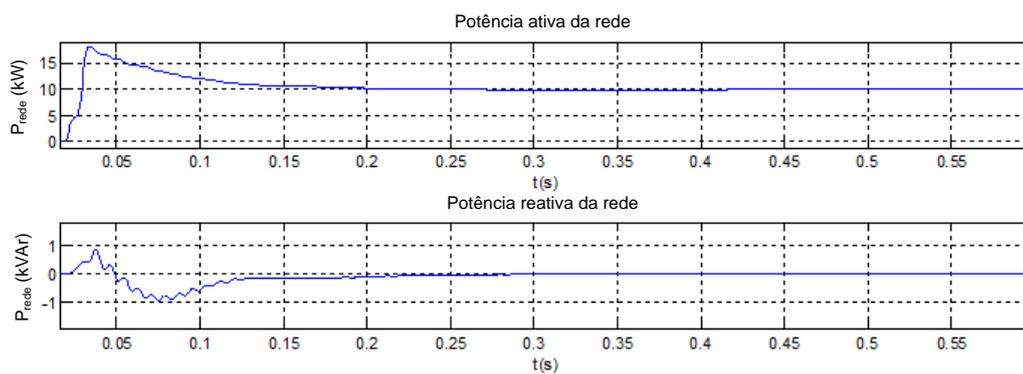


(b)

Figura E.11 – Tensão e corrente dos lados (a) do inversor e (b) da rede

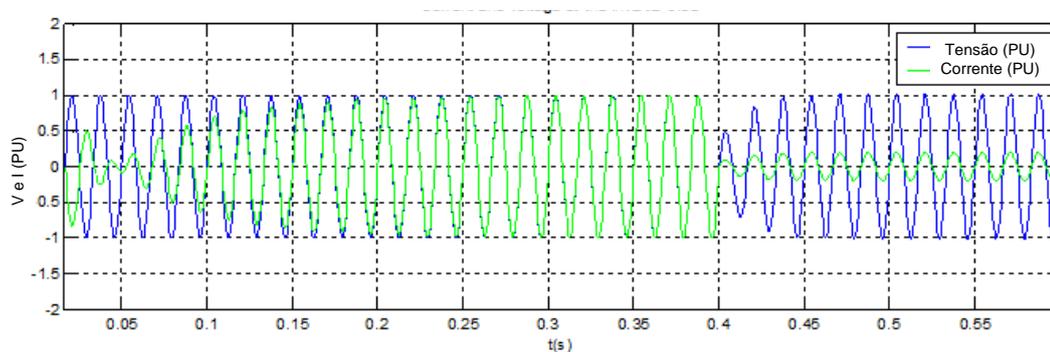


(a)

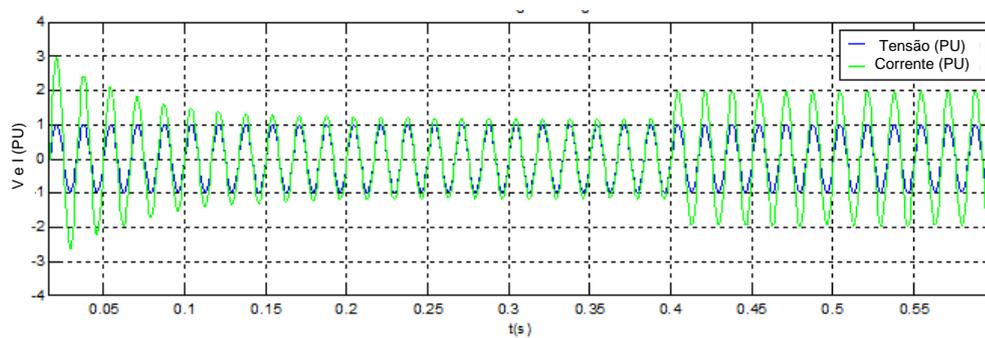


(b)

Figura E.12 – Potência real e reativa para o (a) inversor e (b) rede

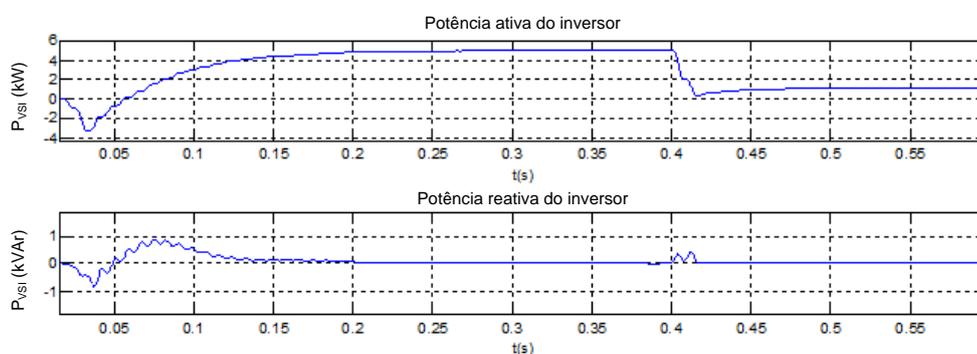


(a)



(b)

Figura E.13 – Tensão e corrente dos lados (a) do inversor e (b) da rede



(a)

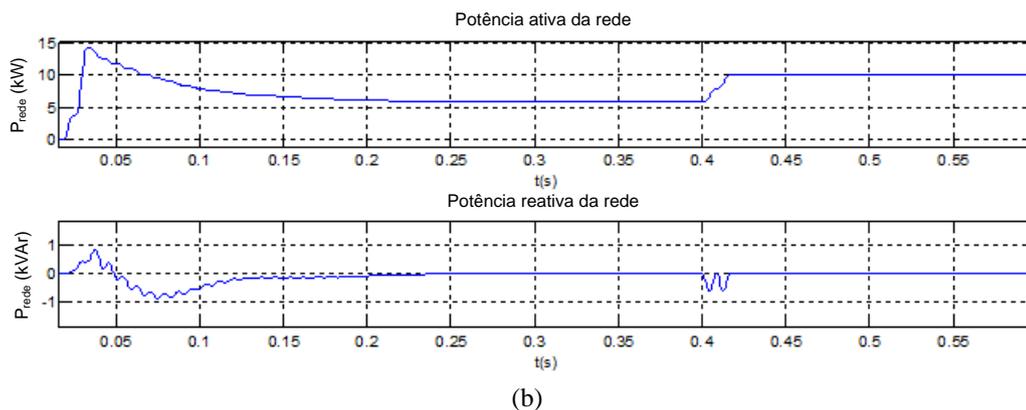


Figura E.14 – Potência real e reativa para o inversor e para a rede

Para as condições apresentadas nas Figuras E.11 a E.14 pode-se observar a ocorrência de transitórios durante o chaveamento para a condição ilhada. Entretanto, o sistema estabiliza em, aproximadamente, três ciclos de rede. Este tempo de estabilização pode ser considerado desprezível para um sistema de baixa potência se for levado em conta o impacto sobre o gerador tais são às lentas dinâmicas de resposta apresentadas pelas CaCs.

Em relação aos testes realizados, foi observado que os tempos de resposta para a detecção de ilhamento estão de acordo com as especificações da norma IEEE-1547 que limita o tempo de atuação que deve estar na faixa de  $0.16s$  para sistemas de geração distribuída inferiores à  $30kW$ .

## E.8 Resumo do apêndice

Neste apêndice é apresentado o roteiro para projetar uma interface de potência a ser usada com CaCs. Os componentes e a malha de controle são definidos para aproveitar o máximo da energia disponibilizada pelo gerador. Além disso, o projeto é realizado visando à operação da pilha em sua região linear, isto é na faixa onde sua eficiência é otimizada.

A utilização de uma CaC conectada a rede deve ser considerada com cuidado. Em situações em que há o compartilhamento de cargas nas redes local e principal, a ocorrência de ilhamento pode levar a uma variação da potência demandada pela CaC. Esta potência afeta diretamente as condições operacionais da CaC incluindo a alteração dos níveis de eficiência.

Considerando a variação de potência nos terminais da CaC, conclui-se que o algoritmo de monitoramento das condições de funcionamento deve ser capaz de reajustar cada vez os parâmetros operacionais do gerador para novos valores. Isto deve ser feito de forma a se obter os melhores níveis de eficiência, levando-se ainda em conta condições não desejadas que possam reduzir a vida útil da pilha.

## ANEXOS

---

### ANEXO A - Eficiência do Sistema de Geração

Como mencionado o sistema de geração de energia utilizando CaC pode ser composto de vários elementos, tais como: ventiladores, bombas, compressores, válvulas solenóides, umidificadores e controladores eletrônicos, além da própria pilha. Neste caso, a eficiência total do sistema deve levar em consideração estes equipamentos auxiliares, que utilizam parte da energia gerada pelas células para o seu funcionamento. Uma vez obtida a  $\eta_{CaC}$  eficiência da CaC (Equação (2.42)), a potência equivalente de entrada da CaC (potência dos gases reagentes) pode ser relacionada com a potência elétrica gerada pela CaC pela Equação (A.1).

$$P_{ent} = \frac{P_{el}}{\eta_{CaC}} \quad (A.1)$$

onde  $P_{el}$  é a potência elétrica total de saída da CaC (carga + equipamentos auxiliares) e  $P_{ent}$  é a potência equivalente de entrada da CaC.

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

$$\eta_{sist} = \frac{P_{carga}}{P_{ent}} = \eta_{CaC} \cdot \frac{P_{carga}}{P_{el}} \quad (A.2)$$

Na determinação da Equação (A.1), é considerado apenas o aproveitamento da potência elétrica gerada. Em sistemas combinados de calor e potência (*CHP – Combined Heat and Power*), o aproveitamento do calor gerado faz com que o rendimento resultante aumente, dependendo da quantidade de calor utilizada.

## ANEXO B - SENSORES DE TEMPERATURA

### B.1. Características teóricas dos termopares

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

Na Figura B.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 (B.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  $T$ .

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

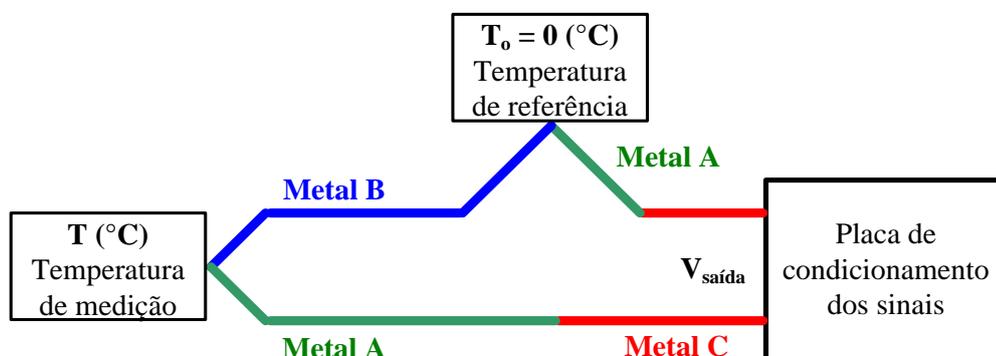


Figura B.1 - Ligação de um termopar com junção fria.

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 B.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 (B.2). Com o uso da fonte de tensão auxiliar garante-se que  $V_{T_o} = 0$ , e conseqüentemente,  $V_{real} = V_T$ .

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

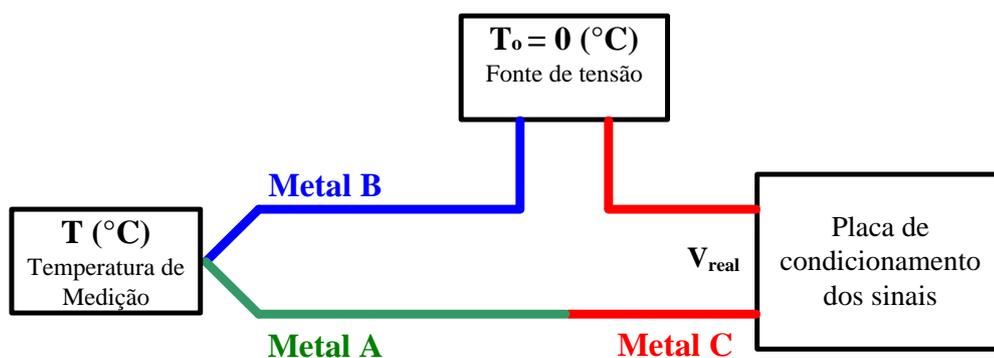


Figura B.2 - Ligação de um termopar com fonte de tensão, simulando a junção fria.

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

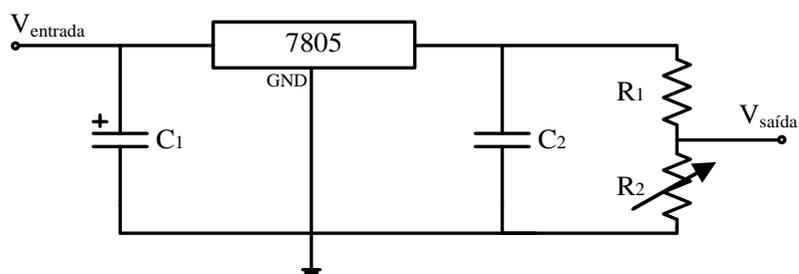


Figura B.3 - Fonte auxiliar.

## B.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.

## B.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. O primeiro estágio de amplificação trata-se de um amplificador inversor, onde seu ganho é determinado pela Equação (B.3).

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

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

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

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 (B.5).

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

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

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

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 (B.7).

$$f_{c1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_4 \cdot C_1} \quad (\text{B.7})$$

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

$$f_{c2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_9 \cdot C_2} \quad (\text{B.8})$$

#### **B.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 B.4, B.5, B.6 e B.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.

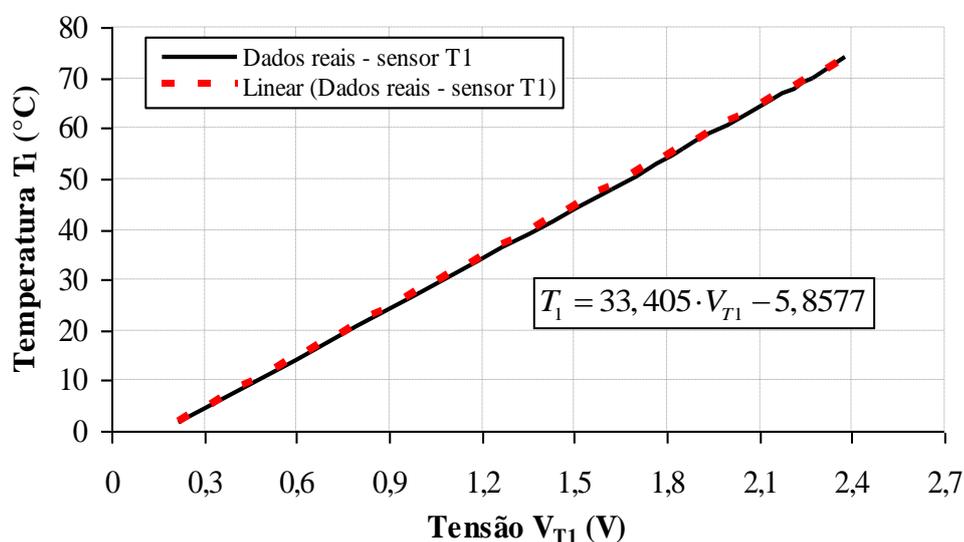


Figura B.4 - Curva de operação do termopar T<sub>1</sub>.

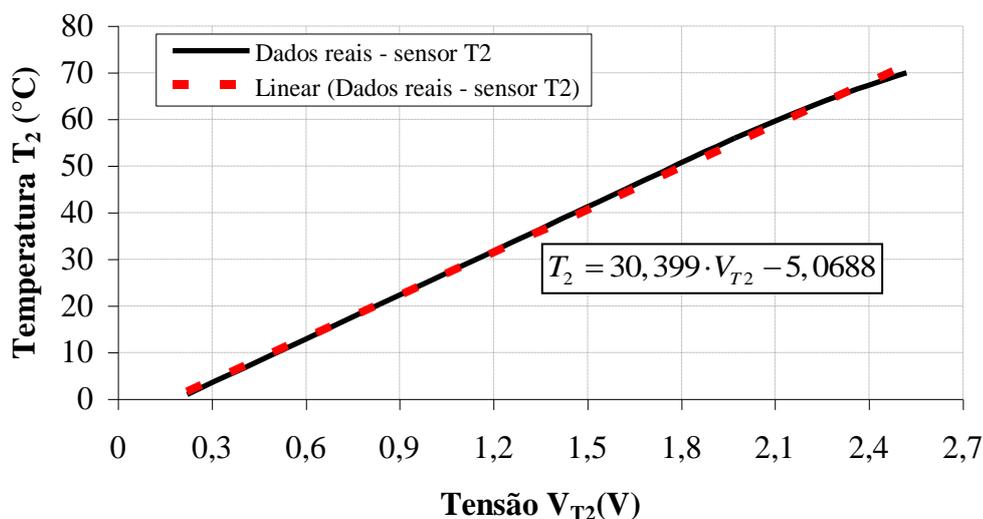


Figura B.5 - Curva de operação do termopar T<sub>2</sub>.

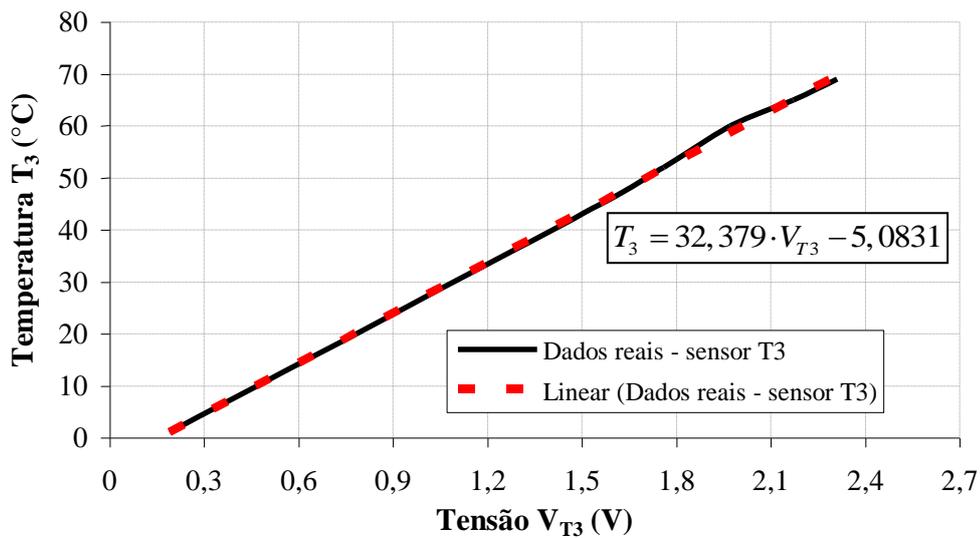


Figura B.6 - Curva de operação do termopar T<sub>3</sub>.

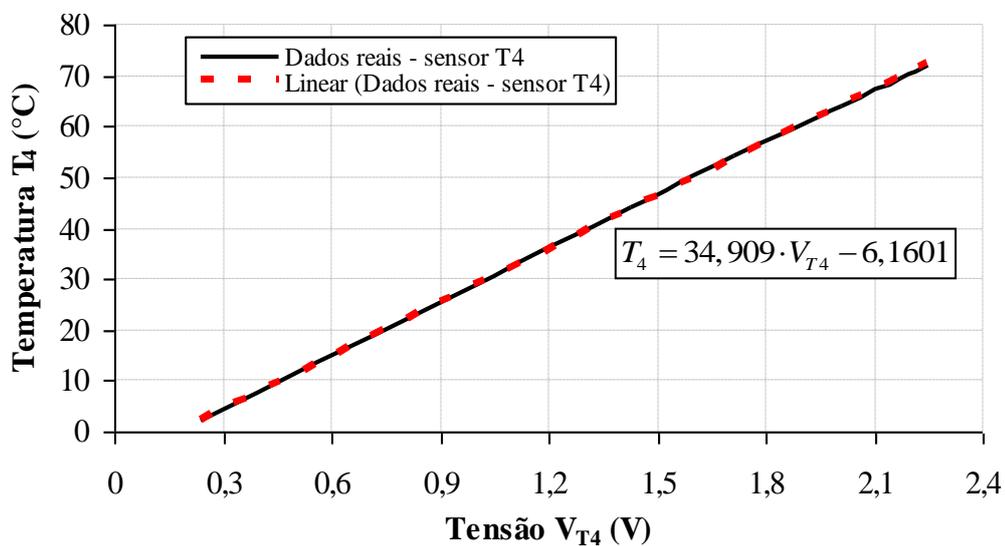


Figura B.7 - Curva de operação do termopar T<sub>4</sub>.

## ANEXO C - SENSORES DE PRESSÃO

### C.1. Descrição do sensor

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

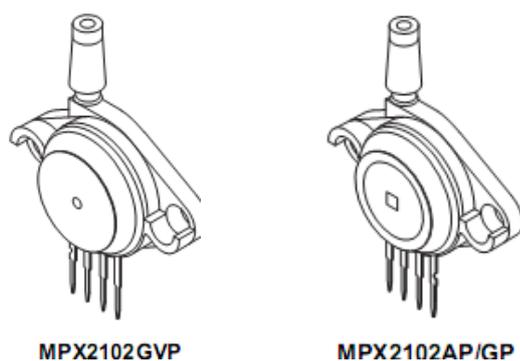


Figura C.1 - Sensores de pressão.

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

Tabela C.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 | $P_{op} = 0 \sim 100kPa$<br>$P_{op} = 0 \sim 14,5psi$<br>$1kPa = 0,145psi$ |
| Tempo de resposta   | $t_R = 1,0ms$  |

## C.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 (C.1).

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

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 (C.2).

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

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

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

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 (C.4).

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

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

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

### C.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 C.2 e C.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.

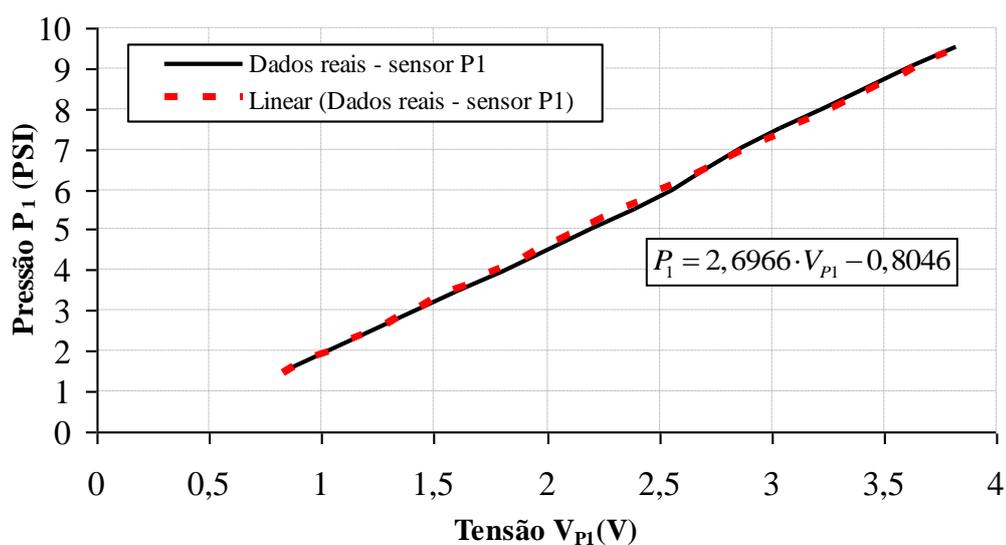


Figura C.2 - Curva de operação do sensor de pressão  $P_1$ .

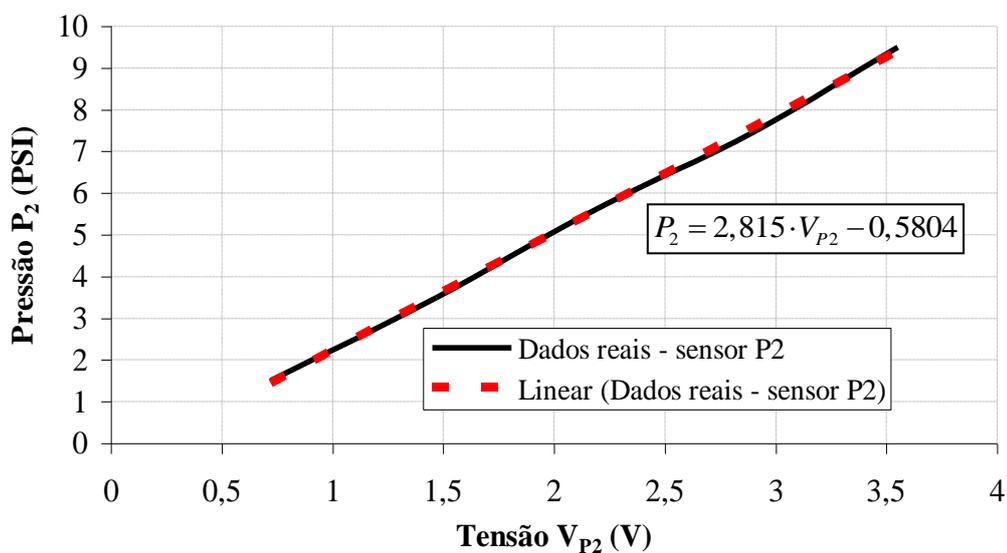


Figura C.3 - Curva de operação do sensor de pressão  $P_2$ .

## ANEXO 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.

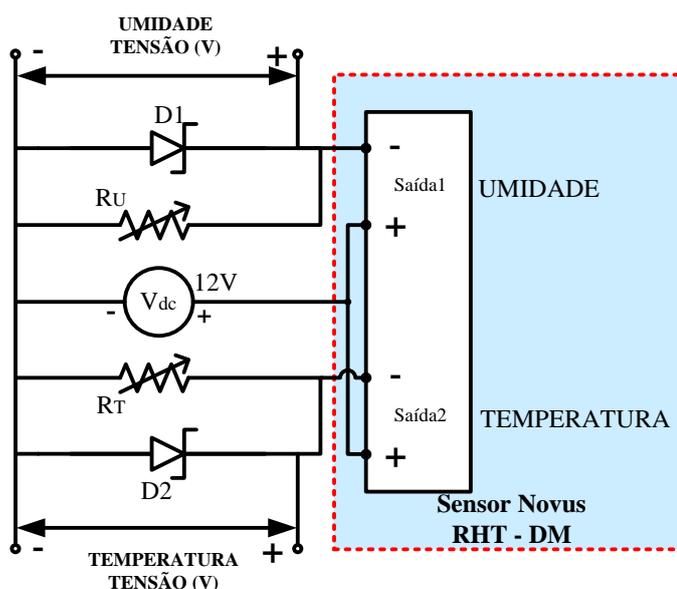


Figura C.1 - Esquema de ligação do sensor.

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.

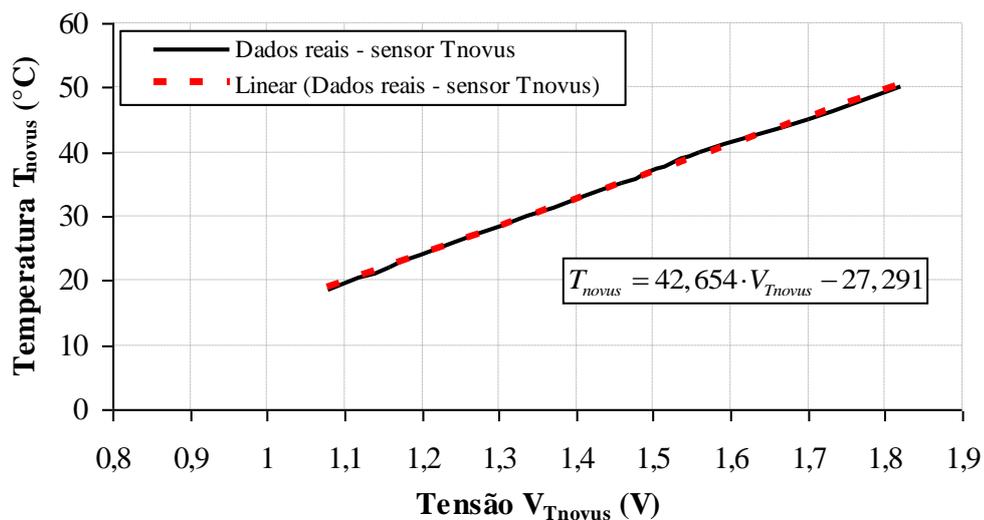


Figura C.2 - Curva de operação sensor Novus de temperatura.

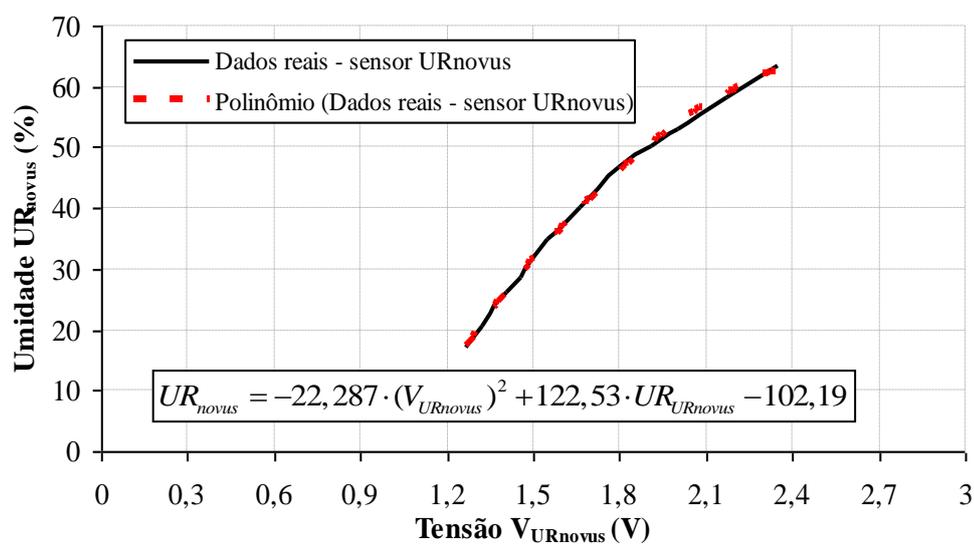


Figura C.3 - Curva de operação sensor Novus de umidade.

## ANEXO D - CIRCUITO PARA OS TERMOPARES

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

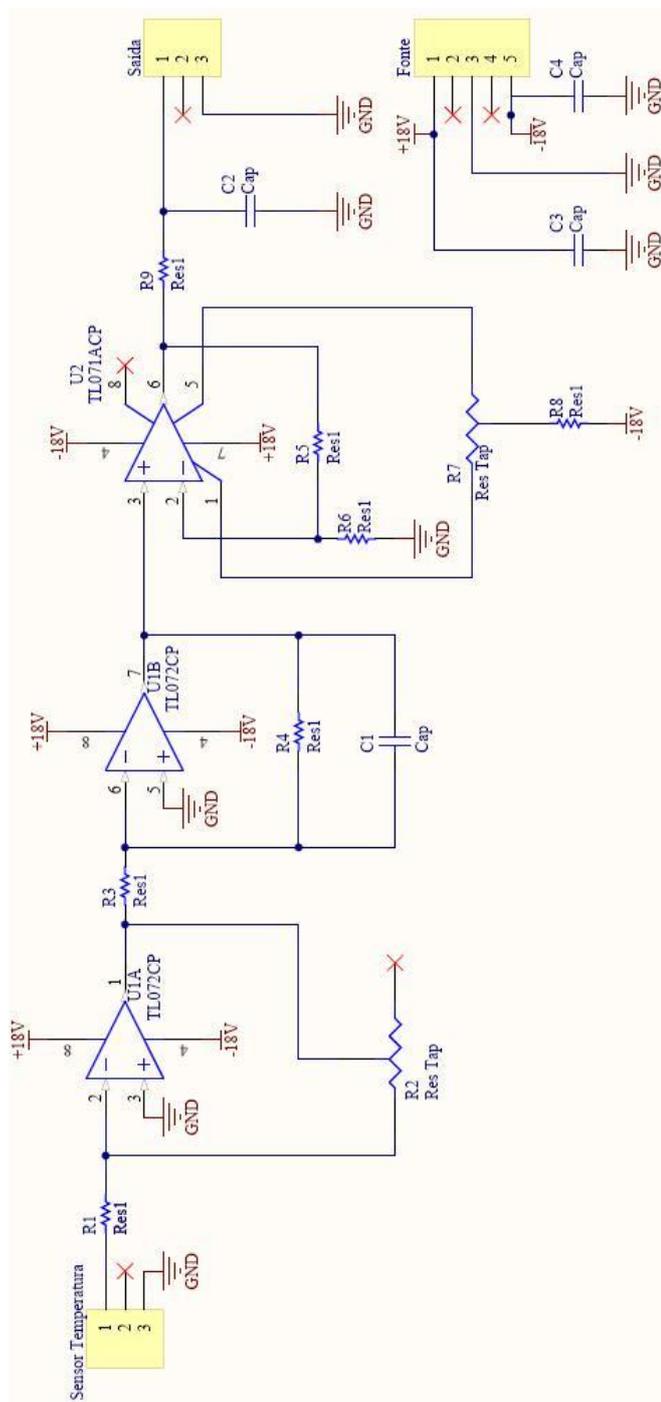


Figura D.1 - Circuito para tratamento do sinal dos termopares.

## ANEXO E - CIRCUITO PARA O SENSOR DE PRESSÃO

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

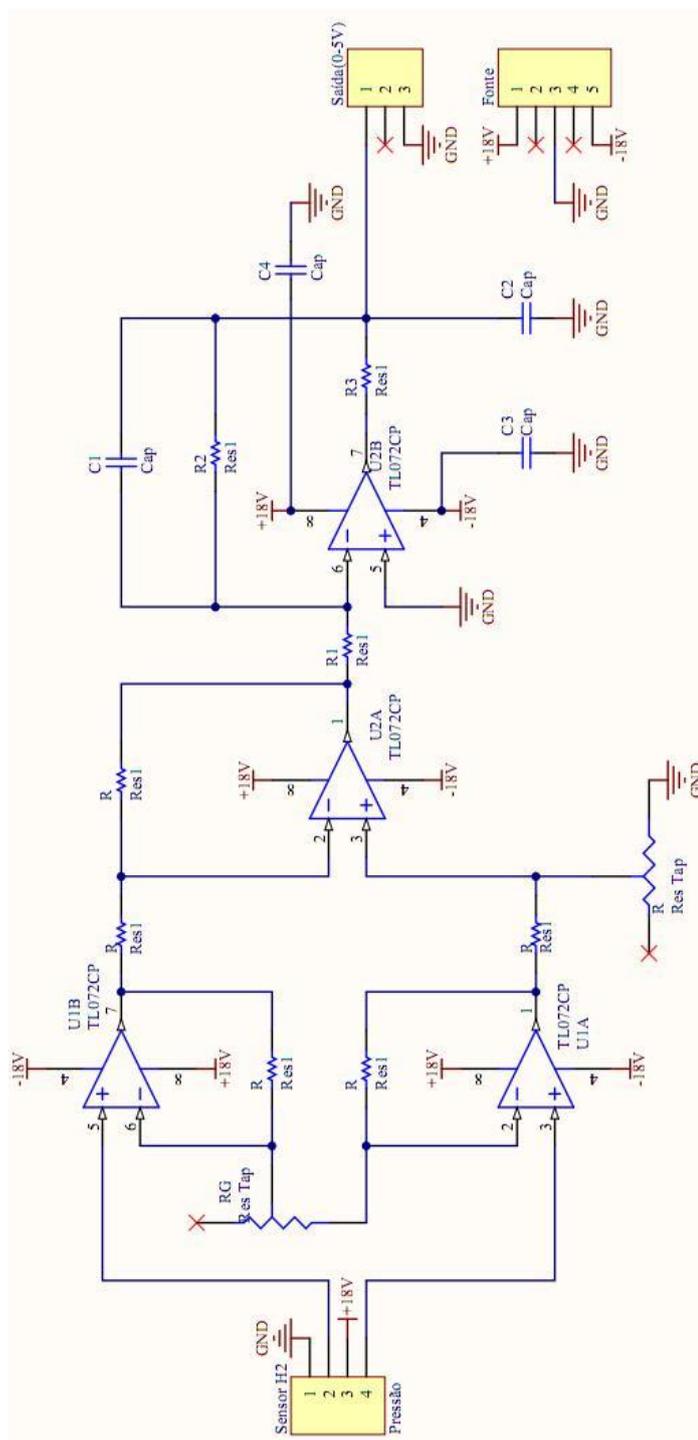


Figura E.1 - Circuito para tratamento do sinal dos sensores de pressão.

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

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

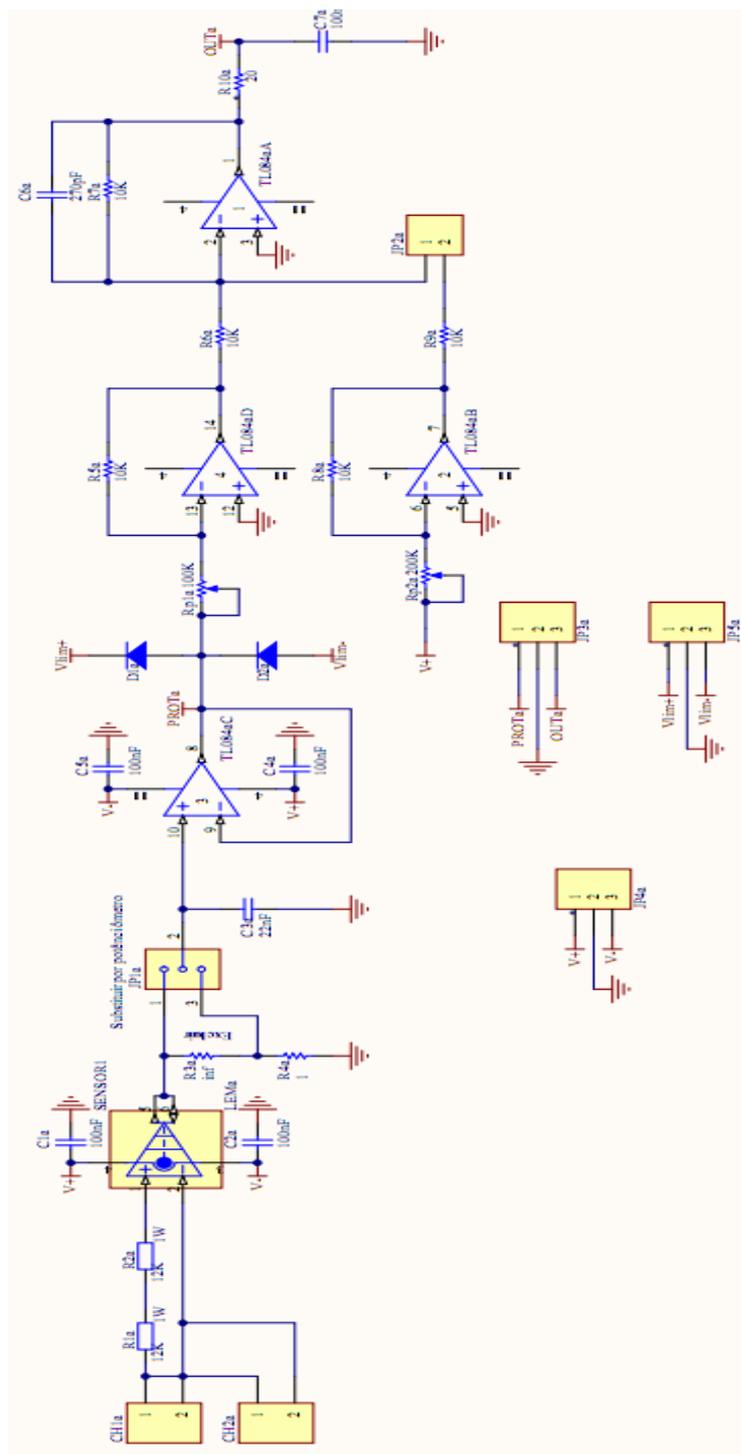


Figura F.1 - Circuito para tratamento do sinal dos sensores de corrente e tensão.

## ANEXO G - CARGA VARIÁVEL

Na Figura G.1 mostra-se o circuito simplificado correspondente à carga variável usada nos ensaios da CaC.

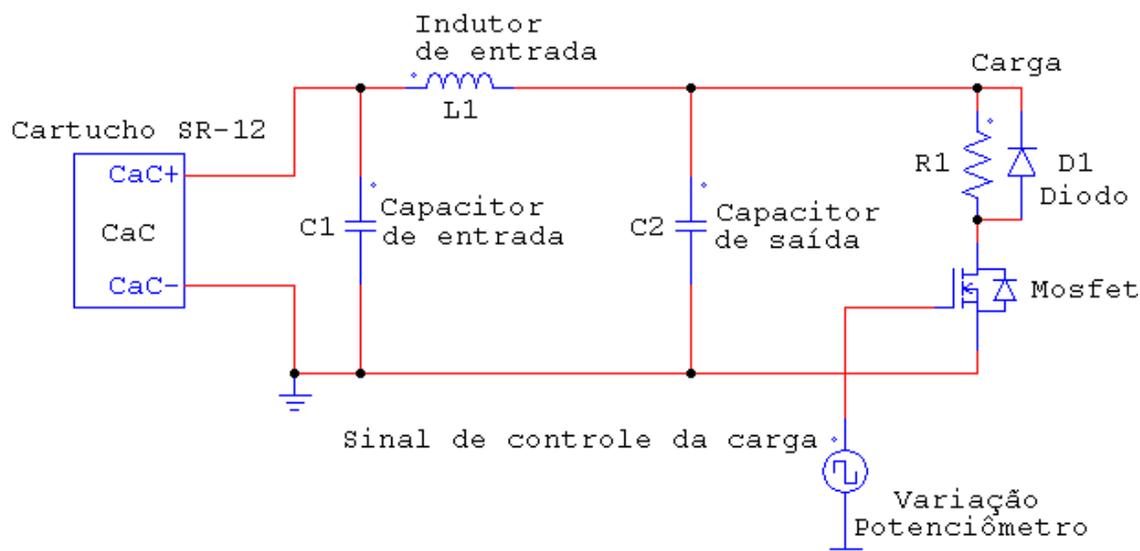


Figura G.2 - Esquema simplificado da carga variável usada.

## Anexo H – Materiais utilizados

### H.1 Introdução

Para comprovar as afirmações teóricas da tese, toma-se como referência uma CaC real de pequena potência para o estudo do comportamento dinâmico. Esta CaC, disponível no laboratório do CEEMA é parte de um gerador SR-12 de 500W, fabricado pela empresa Avista Labs<sup>TM</sup>. O gerador original é composto de 48 células autoumidificadas, empilhadas em grupos de quatro, sob a forma de “cartuchos”. Um dos cartuchos é usado na experimentação prática desta tese. O teste com base em apenas um cartucho justifica-se pelo fato de o gerador completo possuir um sistema de gerenciamento automatizado próprio pois os periféricos do gerador podem interferir nos resultados experimentais. Assim, os resultados foram projetados para uma única CaC, sobre o qual as hipóteses desta tese estão formuladas.

Neste anexo é apresentada a estrutura geral do protótipo usado e o estabelecimento das principais condições sob as quais a CaC é testada. Os recursos tecnológicos do laboratório para a validação dos resultados teóricos obtidos nesta tese são listados no sentido de se clarificar as condições físicas nas quais os testes experimentais foram conduzidos.

## H.2 Equipamento utilizado e descrição geral do protótipo

Para os ensaios realizados no laboratório do CEEMA, o cartucho SR-12 foi acomodado em um gabinete propriamente adaptado para receber os instrumentos de medida e controle. Este cartucho é composto de quatro membranas do tipo PEM, conectadas em paralelo sendo duas a duas em série, cada uma com área de  $62,50 \text{ cm}^2$ . A compressão do ar de reação vem de um ventilador Nidec/BetaSL 0,16 A/12 V, 80,0 mm de diâmetro, com capacidade máxima para bombeamento de ar até 3066,00 L/min à 20,0 V. A Figura H.1 ilustra a estrutura montada para a realização dos ensaios com a pilha onde pode-se visualizar a pilha utilizada para os ensaios iniciais, instalada na bancada de testes. Os equipamentos instalados incluem a alimentação da CaC com  $H_2$  e ar e os recursos para aquisição de dados no laboratório, consistindo de osciloscópio, sensores, placa de aquisição de dados e outros. Nos próximos parágrafos este protótipo está melhor detalhado. O diâmetro interno do duto de alimentação de  $H_2$  é de 5,0 mm.

Os dados de corrente, tensão, pressão do  $H_2$ , fluxo do ar, temperatura e umidade são adquiridos por meio da placa de aquisição de dados National Instruments NI USB-6251. Os valores de pressão são coletados com um sensor Freescale MPX2102G, com resolução de 0~14,5 PSI. Leituras de temperatura e umidade são feitas na entrada e na saída da CaC. A instalação e características dos sensores estão indicadas na Tabela H.1. A calibração dos sensores de temperatura, pressão e umidade, incluindo os respectivos circuitos de tratamento de sinal são detalhados com suas especificações nos anexos desta tese.

Os circuitos para leitura de tensão usam um transdutor LEM (LV 25-NP). Este sensor proporciona isolamento do sinal medido e tem o sinal de tensão de saída proporcional ao sinal de entrada. O sensor de corrente utilizado é da marca Secon, modelo SECOHR (50CI-15). Esse é um sensor de corrente efeito hall realimentado que pode ser usado para medições em CC e CA, com isolamento galvânica e sinal de saída em corrente (alta imunidade ao ruído).

O levantamento da curva característica de polarização da CaCs deve ser feito com uma carga que permita o aumento linear da corrente, isto é uma transição de carga sem interrupções. Isto se deve ao fato de que, se circuito for aberto entre as leituras a célula sofre uma recuperação de tensão e, com isso, um novo tempo de acomodação será requerido para a nova medição, invalidando o experimento. Para contornar este problema usa-se uma carga eletronicamente variável para os ensaios. Esta carga é chaveada, com capacidade para até

200W, construída no laboratório do CEEMA com Mosfets, e controlada por um potenciômetro. No Anexo G ilustra-se o circuito simplificado da carga eletrônica. Os ensaios com o cartucho SR-12 foram realizados com variações de carga de 0,5A em intervalos de 20 s, conforme orientações da folha de demonstração que acompanha o manual do gerador SR-12. A corrente é elevada até o valor máximo permitido pelo gerador (aproximadamente, 6,50 A), dadas as condições operacionais.



Figura H.1 – Estrutura laboratorial para aquisição de dados no cartucho SR-12

Tabela H.1 – Sensores utilizados e instalação

| Sensores                                | Tipo  | Local de instalação  |
|---|---|--|
| $T_1, T_2, T_3$ e $T_4$ ( $^{\circ}C$ ) | Termopares tipo T   | Próximos à membrana das células $CaC-1, CaC-2, CaC-3$ e $CaC-4$ , respectivamente. |
| $P_{H_2}$ (PSI)                         | MPX2102G – sensor de pressão diferencial                              | Sensor de pressão do $H_2$ , inserido no duto de gás                               |
| $T_{novus}$ ( $^{\circ}C$ )             | Sensor de temperatura Novus RHT-DM                                    | Duto de entrada do ar de reação  |
| $UR_{novus}$ (%)                        | Sensor de umidade relativa Novus RHT-DM                               | Duto de entrada do ar de reação  |
| $Q_{ar}$ (L/min)                        | Vazão de ar de reação – sensor de tensão no ventilador que fornece ar | Ventilador instalado no duto de entrada do ar de reação                            |
| $V_{CaC}$ (V)                           | Sensor de tensão  | Terminais de tensão da célula  |
| $I_{CaC}$ (A)                           | Sensor de corrente da CaC   | Circuito de carga  |

A montagem física e adequação do protótipo, bem como o detalhamento da instalação dos periféricos são apresentadas nas Figuras H.2 a H.5. A Figura H.2 apresenta o esquema do cartucho SR-12 (CaC livre de acessórios). As Figuras H.3 a H.5 mostram vistas lateral, dianteira e traseira do gabinete, respectivamente, com a indicação dos periféricos instalados. Na Tabela H.2 são sumarizados os itens indexados nas Figuras H.3 a H.5.

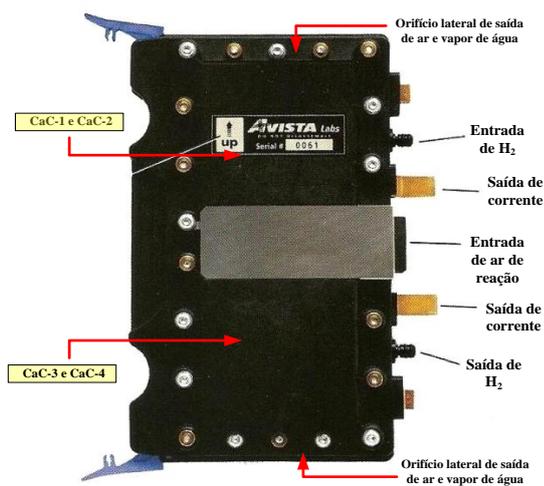


Figura H.2 – Cartucho SR-12 usado na experimentação prática



Figura H.3 – Vista lateral com indicação dos periféricos

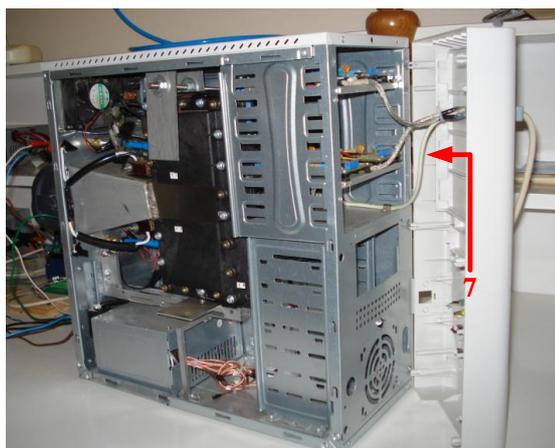


Figura H.4 – Vista frontal com indicação dos periféricos

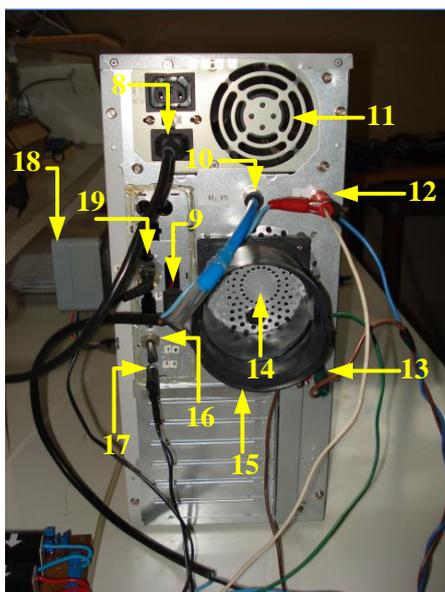


Figura H.5 – Vista traseira com indicação dos periféricos

A saída de gás utilizada é do tipo “*dead-end mode*”. Isto implica que a saída é bloqueada por uma válvula normalmente fechada e é aberta periodicamente para a realização da purga, devido à acumulação de resíduos ou água. Esta frequência de purga depende da pureza do  $H_2$ , taxa de permeação de  $N_2$  e transporte de água através da membrana. Como o protótipo utilizado é de pequeno porte, durante as séries de experimentos, verificou-se que a produção/saída de resíduos neste dreno é ínfima e imperceptível. Assim, por opção, a regularidade da purga no duto de  $H_2$  não é considerada. Em sistemas de grande porte, esta saída deve ter sua manutenção realizada regularmente, pois influi na eficiência do gerador.

Tabela H.2 – Sumário dos índices das Figuras H.3 a H.5

| Índice | Item                         | propósito  |
|--------|------------------------------|--|
| [1]    | Fonte de alimentação         | Alimentação das placas de condicionamento de sinal.  |
| [2]    | Duto de ar                   | Duto metálico para passagem do ar de reação onde está instalado o ventilador Nidec/BetaSL 80mm. Também consta um filtro simples de ar para impedir a passagem de substâncias e resíduos que possam causar prejuízo a CaC.  |
| [3]    | Ventilador                   | Controle da temperatura da pilha   |
| [4]    | Sensor de pressão ( $H_2$ )  | Sensor de pressão instalado na canalização de hidrogênio   |
| [5]    | Termopares                   | A instalação dos quatro termopares é representada neste índice. Estes sensores estão introduzidos através do canal de saída de ar e vapor de água. As junções dos termopares estão soldadas por fusão e são eletricamente isoladas da CaC por meio de verniz isolante. |
| [6]    | Placas de sensores           | Local de acondicionamento das placas de tratamento dos sinais dos sensores   |
| [7]    | Gavetas das placas de sinais | Detalhe das gavetas onde estão instaladas as placas de condicionamento dos sinais dos sensores de pressão, temperatura (termopares) e sensor de umidade e temperatura do ar de reação.   |
| [8]    | Entrada de energia           | Alimentação da fonte interna do gabinete   |

|      |                            |   |
|------|----------------------------|---|
| [9]  | Chave liga/desliga         | Acionamento externo do ar de reação. Essa chave é mantida desligada enquanto a alimentação do ar de reação é feita por fonte externa com controle automático (via LabVIEW™). A posição ligada é mantida quando a alimentação é provida pela fonte interna do gabinete e o controle sobre o ar é manual, através de potenciômetro. |
| [10] | Entrada do H <sub>2</sub>  | Conexão de entrada do gás de alimentação  |
| [11] | Ventilação de refrigeração | Instalação do ventilador para controle da temperatura   |
| [12] | Terminal positivo          | Terminal de tensão $V_{CaC}$ (+)  |
| [13] | Terminal negativo          | Terminal de tensão $V_{CaC}$ (-)  |
| [14] | Duto de admissão de ar     | Duto e orifícios de entrada do ar de reação. Por este canal também é realizada a manutenção da umidade do ar de entrada da CaC, por meio de um umidificador.  |
| [15] | Conexão de saída de gás    | Tomada de purga do hidrogênio   |
| [16] | Conexão de alimentação     | Conexão externa de alimentação do ventilador de ar de reação  |
| [17] | Conector                   | Terminal de alimentação externa do ventilador do ar de reação   |
| [18] | Sensor Novus               | Sensor de temperatura e umidade do ar   |
| [19] | Conexão de alimentação     | Alimentação do ventilador de refrigeração   |

Para avaliar o impacto da umidade sobre a eficiência construiu-se, inicialmente, o umidificador de ar ilustrado na Figura H.6. A umidade do ar é lida por um sensor de umidade (sensor Novus) instalado no interior do cone metálico indicado. Entretanto, no decorrer dos experimentos, observou-se que o umidificador projetado e construído de forma artesanal e simplificado não foi capaz de umidificar de forma homogênea o ar de reação para o protótipo usado aqui. Para tanto, optou-se pelo uso de um vaporizador comercial marca FK (importado), modelo AS 7760-10, sem filtro de água, 1100W/220V, com capacidade de reservatório de 300 ml e tempo de aquecimento de 30s. Esta alternativa de umidificação permite a obtenção de um cone de spray de vapor de água compatível com o diâmetro de 80mm do ventilador do ar de reação. Assim, a insuflação de umidade no ar de reação se torna mais homogênea e compatível com os experimentos.

Para aquecer o ar de reação, usa-se um elemento resistivo de 60 W, controlado por potenciômetro. Isto permite aquecer o ar de reação com temperaturas até a faixa dos 45~50°C, aproximadamente. Esta faixa de temperatura é adequada aos experimentos, considerando-se que a faixa de temperatura de operação da CaC especificada pelo fabricante varia entre 5 ~ 35°C. A Figura H.7 apresenta o esquema completo de montagem do protótipo.

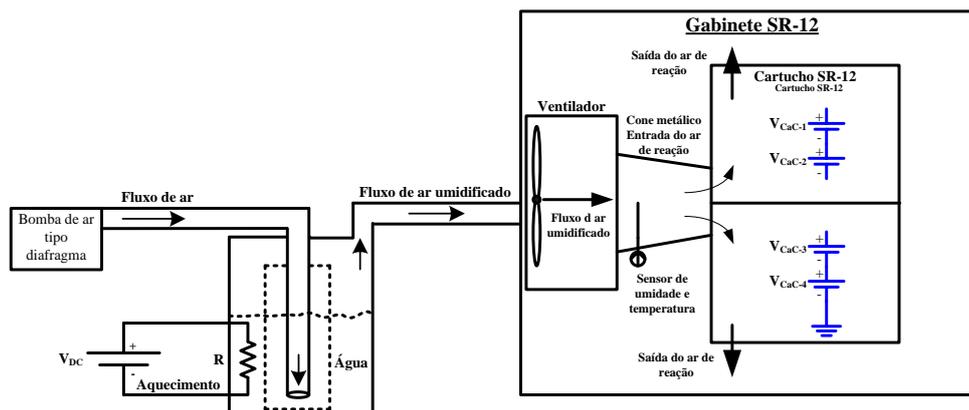


Figura H.6 – Esquema da umidificação do ar de reação.

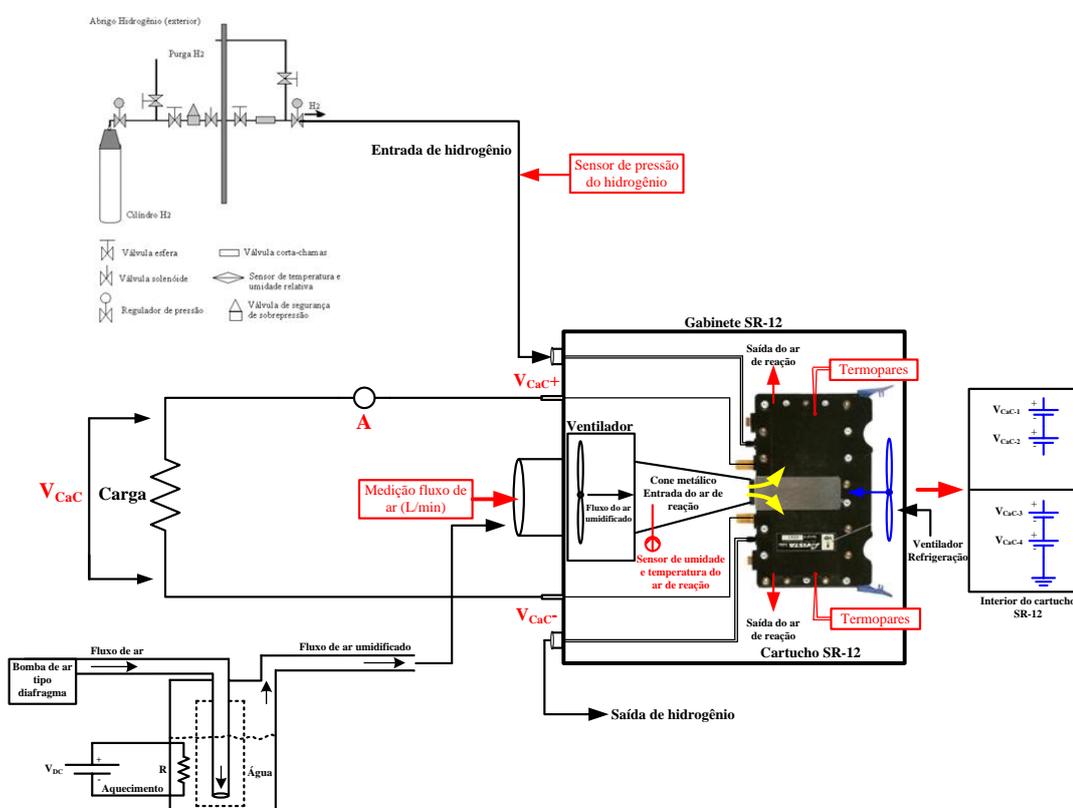


Figura H.7 – Esquema completo de montagem

## H.1 Resumo do Anexo

Este anexo descreve as condições físicas das instalações e o protótipo desenvolvido que servem de ferramental auxiliar para os testes das hipóteses assumidas nesta tese. Muitos dos equipamentos e estruturas utilizadas são construídos nos próprios laboratórios do CEEMA, para domínio de tecnologia e pelos custos adicionais de compra e manutenção destes. Este é o caso do gabinete específico da CaC ensaiada e da carga eletrônica desenvolvida, por exemplo. Deve-se ter em mente que a CaC, por si só, já demanda um custo elevado de aquisição, chegando a US\$ 4.000,00/kW, para pequenos usuários.