



BALANÇO DE PLANTA PARA PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO  
ALIMENTADA COM ETANOL

Alberto Coralli

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Rio de Janeiro  
Outubro de 2018

BALANÇO DE PLANTA PARA PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO  
ALIMENTADA COM ETANOL

Alberto Coralli

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

---

Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, D.Sc.

---

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.Ing.

---

Prof. Jean Marcel Ribeiro Gallo, D.Sc.

---

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

---

Dra. Selma Aparecida Venâncio, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2018

Coralli, Alberto

Balço de Planta para Pilha a Combustível de Óxido Sólido Alimentada com Etanol/ Alberto Coralli. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXI, 195 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 174-183.

1. Pilha a combustível de óxido sólido. 2. Microcogeração. 3. Etanol. I. Miranda, Paulo Emílio Valadão de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos primeiros professores que tive na vida: meus pais Palma e Sergio, que desde quando eu era criança cultivaram minha curiosidade e meus talentos, me apoiando em todo o longo percurso de estudos que me trouxe até aqui.

Quero agradecer também ao meu orientador, professor Paulo Emílio Valadão de Miranda, por ter me proporcionado um ótimo ambiente de trabalho e ter sido um bom guia, me permitindo desenvolver o projeto com grande autonomia.

Gostaria de reconhecer ainda o apoio de todos os pesquisadores, técnicos e estudantes do Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ, em particular o Dr. Bernardo Sarruf e o Dr. Ugo Icardi. Também agradeço a ajuda dos funcionários da *Tracel Veículos Elétricos*, especialmente do Eng. Fábio Ferreira.

Finalmente, reconheço o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), além das empresas EnergiaH Ltda., Oxiteno S.A. e Furnas S.A., pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento dessa tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

BALANÇO DE PLANTA PARA PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO  
ALIMENTADA COM ETANOL

Alberto Coralli

Outubro/2018

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Essa tese de doutorado tem como objetivo o projeto, realização e teste do conjunto dos equipamentos auxiliares necessários para o funcionamento de um protótipo de microcogenerador, baseado em uma pilha a combustível de óxido sólido alimentada com etanol. Baseando-se nos resultados das simulações com um modelo matemático preliminar, todas as partes do sistema foram adquiridas ou projetadas e fabricadas. Cada componente foi caracterizado separadamente para verificar a adequação às condições de projeto. O protótipo foi montado e testado como um conjunto, validando assim os métodos utilizados para o projeto e a construção do protótipo e das partes do mesmo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## BALANCE OF PLANT FOR AN ETHANOL-FUELED SOLID OXIDE FUEL CELL

Alberto Coralli

October/2018

Advisor: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Department: Metalurgical and Materials Engineering

The aim of this thesis is to design, construct and test all the auxiliary equipment that is necessary to build a micro-CHP system, based on a solid oxide fuel cell fueled with ethanol. The parts of the system were bought or designed and fabricated, based on the results of a simulation made using an initial mathematical model. Each component was tested separately, in order to check that it works properly, according to the project. The complete prototype was assembled and tested, validating the methods used for the project and the construction of the system and of the single parts.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. EMPILHAMENTO DE PILHAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO	6
2.1.1. Materiais para PaCOS	7
2.1.2. Reações químicas nas PaCOS	8
2.1.3. Curva de polarização de uma pilha a combustível	10
2.2. LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO COMBUSTÍVEL	12
2.2.1. Regulagem da vazão	12
2.2.2. Dessulfurador	13
2.2.3. Processamento químico do combustível	15
2.2.4. Regulagem da temperatura	20
2.3. LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO OXIDANTE	21
2.3.1. Regulagem da vazão	21
2.3.2. Regulagem da temperatura	21
2.4. LINHA DE EXAUSTÃO DOS GASES	22
2.5. SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO TÉRMICO	22
2.5.1. Aquecedor de inicialização	23
2.5.2. Preaquecimento de combustível e oxidante	24
2.5.3. Recuperação do calor de descarte	24
2.6. SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO ELÉTRICO	25
2.6.1. Conversor CC/CC	25
2.6.2. Baterias para armazenamento de energia elétrica	26
2.6.3. Inversor	26
2.7. SUBSISTEMA DE CONTROLE E SEGURANÇA	27
<b>3. METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>28</b>
3.1. MODELAMENTO MATEMÁTICO	28
3.1.1. Modelo matemático da PaCOS	31
3.1.2. Modelo matemático do pós-combustor	35
3.1.3. Modelo matemático do soprador e das bombas	36
3.1.4. Modelo matemático dos trocadores de calor	37
3.1.5. Modelo matemático da eletrônica de potência	38
3.2. PESQUISA DE MERCADO E PROJETO DOS COMPONENTES	39
3.2.1. Empilhamento PaCOS	39

3.2.2.	Área de alta temperatura.....	40
3.2.3.	Bombas e soprador .....	40
3.2.4.	Trocadores de calor .....	41
3.2.5.	Aquecedor de inicialização.....	43
3.2.6.	Conversor CC/CC.....	46
3.2.7.	Inversor.....	50
3.2.8.	Banco de baterias.....	51
3.2.9.	Sistema de controle.....	53
3.3.	TESTES DOS COMPONENTES.....	54
3.3.1.	Empilhamento PaCOS.....	54
3.3.2.	Bombas e soprador .....	59
3.3.3.	Trocadores de calor .....	60
3.3.4.	Combustor .....	61
3.3.5.	Conversor CC/CC.....	62
3.3.6.	Inversor.....	63
3.3.7.	Sistema de controle.....	64
3.4.	TESTES DO SISTEMA COMPLETO.....	64
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
4.1.	MODELAMENTO MATEMÁTICO.....	66
4.1.1.	Sistema alimentado com etanol puro.....	68
4.1.2.	Sistema alimentado com etanol e água.....	71
4.1.3.	Recirculação anódica.....	72
4.1.4.	Recirculação catódica.....	75
4.2.	PROJETO DOS COMPONENTES.....	77
4.2.1.	Área de alta temperatura.....	77
4.2.2.	Trocadores de calor .....	83
4.2.3.	Combustor .....	86
4.2.4.	Conversor CC/CC.....	89
4.2.5.	Banco de baterias.....	92
4.2.6.	Sistema de controle.....	94
4.3.	TESTES DOS COMPONENTES.....	100
4.3.1.	Empilhamentos PaCOS .....	100
4.3.2.	Bombas .....	107
4.3.3.	Soprador .....	108
4.3.4.	Trocadores de calor .....	111
4.3.5.	Combustor .....	113
4.3.6.	Conversor CC/CC.....	115



4.3.7.	Inversor .....	117
4.4.	TESTES DO SISTEMA COMPLETO .....	118
4.4.1.	Montagem do sistema .....	118
4.4.2.	Aquecimento do sistema.....	123
4.4.3.	Geração elétrica .....	126
4.4.4.	Eficiência energética do balanço de planta.....	133
4.4.5.	Resfriamento do sistema.....	134
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>137</b>
5.1.	MODELAMENTO MATEMÁTICO .....	137
5.2.	TESTES DOS COMPONENTES.....	141
5.2.1.	Empilhamento PaCOS .....	141
5.2.2.	Bomba peristáltica .....	143
5.2.3.	Sopradores .....	144
5.2.4.	Trocadores de calor .....	146
5.2.5.	Combustor .....	147
5.2.6.	Conversor CC/CC.....	148
5.2.7.	Inversor .....	149
5.3.	TESTES DO SISTEMA COMPLETO.....	150
5.3.1.	Aquecimento do sistema.....	150
5.3.2.	Geração elétrica .....	152
5.3.3.	Eficiência energética do balanço de planta.....	159
5.3.4.	Resfriamento do sistema.....	162
5.4.	ANÁLISE DA GERAÇÃO COM ETANOL .....	163
5.4.1.	Comparação com a literatura .....	164
5.4.2.	Balanço energético de uma PaCOS unitária.....	165
5.4.3.	Fatores limitantes do desempenho em regime de reforma interna .....	168
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>172</b>
6.1.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	173
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>174</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>184</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de cogeração baseado em PaCOS. ....	6
Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma PaCOS. ....	9
Figura 3 - Curva de polarização de uma pilha a combustível, adaptada de [1]. ....	10
Figura 4 - Efeito da concentração de enxofre no combustível sobre o desempenho de uma PaCOS, adaptado de [34]. ....	13
Figura 5 - Desempenho de adsorventes de enxofre comerciais, adaptado de [35]. ....	14
Figura 6 - Esquema de princípio do conjunto PaCOS-BdP modelado [53]. ....	30
Figura 7 - Esquema do conversor CC/CC <i>buck-boost</i> . ....	46
Figura 8 - Esquema do conversor CC/CC <i>boost+buck</i> . ....	48
Figura 9 - Esquema da bancada de testes para empilhamentos PaCOS. ....	55
Figura 10 - Esquema do sistema de controle da bancada de teste para empilhamento PaCOS. ....	56
Figura 11 - Bancada de testes para empilhamento PaCOS: frente (A), verso (B). ....	57
Figura 12 - Esquema do sistema de teste da bomba peristáltica e dos sopradores de ar. ....	60
Figura 13 - Esquema do sistema de testes dos trocadores de calor ....	61
Figura 14 - Esquema do sistema de teste do combustor de inicialização. ....	62
Figura 15 - Esquema do sistema de teste do conversor CC/CC. ....	62
Figura 16 - Esquema do sistema de testes do inversor CC/CA. ....	63
Figura 17 - Bancada de teste do inversor. ....	64
Figura 18 - Eficiência elétrica global em função de $\lambda C_2H_6O$ . ....	70
Figura 19 - Eficiência elétrica da PaCOS em função de $\lambda C_2H_6O$ . ....	70
Figura 20 - Eficiência térmica global em função de $\lambda C_2H_6O$ . ....	71
Figura 21 - Eficiências elétricas, etanol diluído com água. ....	72
Figura 22 - Eficiências elétricas, recirculação anódica $VE = 2$ . ....	74
Figura 23 - Eficiências elétricas, recirculação anódica $VE = 4$ . ....	74
Figura 24 - Potência elétrica consumida pelo soprador e potência térmica recuperada com recirculação catódica. ....	76
Figura 25 - Recirculação catódica: eficiências elétricas da PaCOS e global, eficiência térmica global. ....	77
Figura 26 - Sistema de compressão do empilhamento. ....	79
Figura 27 - Área de alta temperatura do sistema. ....	81
Figura 28 - Representação tridimensional da área de alta temperatura do sistema: vista lateral esquerda (A), lateral direita (B), frontal (C) e de trás (D). ....	82

Figura 29 - Tubulação de entrada do combustível no empilhamento.....	83
Figura 30 - Atualização e amplificação da curva de carga diária obtida na literatura. ..	92
Figura 31 - Carga, potência fornecida pelo banco de baterias e energia armazenada no mesmo banco, ao longo de um dia padrão.....	93
Figura 32 - Sensores do sistema de controle. ....	95
Figura 33 - Atuadores do sistema de controle. ....	96
Figura 34 - Esquemático da lógica de controle da eletrônica de potência. ....	99
Figura 35 - Curvas de polarização medidas na operação do empilhamento <i>Almus AG</i> . .....	100
Figura 36 - Curvas de potência medidas na operação do empilhamento <i>Almus AG</i> . ...	101
Figura 37 - Pilhas a combustível desmontadas do empilhamento da <i>Almus AG</i> . ....	102
Figura 38 - Curvas de polarização medidas na operação do primeiro empilhamento <i>SOFCCMan NIMTE-A-Stack-301</i> . ....	102
Figura 39 - Curvas de potência medidas na operação do primeiro empilhamento <i>SOFCCMan NIMTE-A-Stack-301</i> . ....	103
Figura 40 - Curvas de polarização medidas na operação do segundo empilhamento <i>SOFCCMan NIMTE-A-Stack-301</i> . ....	105
Figura 41 - Curvas de potência medidas na operação do segundo empilhamento <i>SOFCCMan NIMTE-A-Stack-301</i> . ....	105
Figura 42 - Potência e eficiência do segundo empilhamento <i>SOFCCMan</i> <i>NIMTE-A-Stack-301</i> em função da vazão de ar. ....	106
Figura 43 - Potência e eficiência do segundo empilhamento <i>SOFCCMan</i> <i>NIMTE-A-Stack-301</i> em função da vazão de hidrogênio. ....	107
Figura 44 - Vazão da bomba peristáltica em função do sinal de controle aplicado. ....	108
Figura 45 - Característica vazão/pressão do soprador <i>Vairex VBR2-2 48VCC</i> para diferentes valores do sinal de controle. ....	109
Figura 46 - Característica potência/vazão do soprador <i>Vairex VBR2-2 48VCC</i> para diferentes valores de diferença de pressão. ....	109
Figura 47 - Característica vazão/pressão do soprador <i>Hi-Blow FC-8040</i> para diferentes valores do sinal de controle. ....	110
Figura 48 - Característica potência/vazão do soprador <i>Hi-Blow FC-8040</i> para diferentes valores de diferença de pressão. ....	110
Figura 49 - Resultados dos testes do evaporador do etanol.....	111
Figura 50 - Resultados dos testes do evaporador da água. ....	112
Figura 51 - Resultados dos testes do pré-aquecedor do ar. ....	112
Figura 52 - Perda de pressão no pré-aquecedor do ar.....	113
Figura 53 - Teste do combustor de etanol integrado no sistema. ....	114
Figura 54 - Realização prática do conversor CC/CC. ....	115
Figura 55 - Resultados dos testes do conversor CC/CC.....	116

Figura 56 - Desempenho do inversor <i>MultiPlus Compact</i> injetando energia na rede..	117
Figura 57 - Montagem: mica de proteção (A); êmbolo de compressão e coletor de corrente positivo (B); sistema de compressão (C); caixa do empilhamento (D).....	120
Figura 58 - Montagem: área de combustão interna (A); lado inferior da caixa do empilhamento (B); evaporadores montados no isolamento térmico (C); entrada anódica do empilhamento (D).....	121
Figura 59 - Montagem: finalização do isolamento térmico (A); duto de exaustão (B).	122
Figura 60 - Aquecimento do protótipo: temperaturas. ....	125
Figura 61 - Aquecimento do sistema protótipo: vazões e pressões. ....	125
Figura 62 - Geração elétrica com H <sub>2</sub> : vazões e pressões. ....	127
Figura 63 - Geração elétrica com H <sub>2</sub> : temperaturas. ....	127
Figura 64 - Geração elétrica com H <sub>2</sub> : variáveis elétricas. ....	128
Figura 65 - Geração elétrica com H <sub>2</sub> : curvas de polarização e de potência. ....	129
Figura 66 - Geração elétrica com C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O: pressões e vazões. ....	130
Figura 67 - Geração elétrica com C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O: temperaturas.....	131
Figura 68 - Geração elétrica com C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O: variáveis elétricas. ....	132
Figura 69 - Geração elétrica com C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O: curvas de polarização e de potência. ....	132
Figura 70 - Resfriamento do sistema: pressão e vazão do ar.....	135
Figura 71 - Resfriamento do sistema: temperaturas. ....	135
Figura 72 - Eficiências globais simuladas do sistema, comparação.....	139
Figura 73 - Potências simuladas do sistema, comparação.....	139
Figura 74 - Vazão de água correspondente à vazão de etanol alimentada, para diferentes valores de <i>VE</i> .....	144
Figura 75 - Extrapolação linear da tendência da eficiência do conversor CC/CC. ....	149
Figura 76 - Comparação entre curvas de polarização e potência obtidas com H <sub>2</sub> nos testes de bancada do <i>NIMTE-A-Stack-30I</i> e na operação do protótipo.....	152
Figura 77 - Transitório das temperaturas do protótipo entre estado de sistema inativo e regime de produção elétrica com H <sub>2</sub> .....	155
Figura 78 - Comparação entre curvas de polarização e potência obtidas com C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O na operação do protótipo e nos testes de bancada do <i>NIMTE-A-Stack-30I</i> . ....	156
Figura 79 - Potência consumida pelo balanço de planta e injetada na rede. ....	161
Figura 80 - Composição do consumo de potência do balanço de planta.....	162
Figura 81 - Geração com etanol: comparação com a literatura. ....	164
Figura 82 - Representação dos fluxos de matéria e energia na operação de uma PaCOS unitária. ....	166
Figura 83 - Fatores limitantes do desempenho do empilhamento no funcionamento com etanol em regime de reforma interna. ....	170

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perda de pressão nos componentes do sistema [21].....	37
Tabela 2 - Parâmetros do modelo fixados e estimados. ....	67
Tabela 3 - Dados de projeto dos trocadores de calor.....	84
Tabela 4 - Resultado do dimensionamento dos trocadores de calor.....	85
Tabela 5 - Dados de projeto e resultados do dimensionamento da área de combustão..	88
Tabela 6 - Dados de projeto e resultados do dimensionamento do conversor CC/CC...	89
Tabela 7 - Resultados da simulação em <i>Matlab-Simulink</i> dos conversores CC/CC. ....	90
Tabela 8 - Características de um banco de 7 unidades da bateria <i>TS-LYP160AHA</i> . ....	93
Tabela 9 - Resultados dos testes do empilhamento <i>Almus AG</i> .....	101
Tabela 10 - Resultados dos testes do primeiro empilhamento <i>NIMTE-A-STACK-301</i> .	103
Tabela 11 - Condições de teste do segundo empilhamento <i>NIMTE-A-STACK-301</i> . ...	106
Tabela 12 - Dados de funcionamento do conversor CC/CC próximo da potência de projeto do protótipo. ....	117
Tabela 13 - Desempenho do inversor <i>MultiPlus Compact</i> alimentando cargas.....	118
Tabela 14 - Consumo elétrico dos dispositivos auxiliares durante o aquecimento.....	126
Tabela 15 - Produção e consumo de potência elétrica dos componentes do protótipo.	134
Tabela 16 - Consumo elétrico dos dispositivos auxiliares durante o resfriamento. ....	136
Tabela 17 - Comparação entre as condições de operação com melhor desempenho para as diferentes topologias analisadas. ....	138
Tabela 18 - Comparação entre testes de bancada do <i>NIMTE-A-Stack-301</i> e a operação do protótipo, funcionamento com $H_2$ . ....	153
Tabela 19 - Comparação entre testes de bancada do <i>NIMTE-A-Stack-301</i> e operação do protótipo, funcionamento com $C_2H_6O$ . ....	157

# LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Vista tridimensional isométrica da área de alta temperatura do sistema. ....	184
Anexo 2 - Vista tridimensional explodida da área de alta temperatura do sistema. ....	185
Anexo 3 - Desenho técnico do evaporador do etanol. ....	186
Anexo 4 - Desenho técnico do evaporador da água. ....	187
Anexo 5 - Desenho técnico do pré-aquecedor do ar. ....	188
Anexo 6 - Trocadores de calor fabricados: evaporador do etanol (A), pré-aquecedor do ar (B) e evaporador da água (C). ....	189
Anexo 7 - Desenho técnico do combustor de inicialização. ....	190
Anexo 8 - Esquema do conversor CC/CC. ....	191
Anexo 9 - Frente e verso da placa do conversor CC/CC. ....	192
Anexo 10 - Esquema da placa de amostragem de tensão e corrente. ....	193
Anexo 11 - Eletrônica de interface entre o controlador <i>NI9082</i> e os atuadores. ....	193
Anexo 12 - Interface homem/máquina do sistema de controle do protótipo. ....	194
Anexo 13 - Montagem do combustor. ....	194
Anexo 14 - Combustor em operação. ....	195
Anexo 15 - Combustor integrado no sistema. ....	195

# LISTA DE ABREVIACÕES

BdP	Balanço de Planta
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PaC	Pilha a Combustível
PaCOS	Pilha a Combustível de Óxido Sólido

# LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	altura do casco dos trocadores de calor
$A_p$	área de uma pilha unitária do empilhamento
$A_{ref}$	área de referência do projeto do combustor
$a_T$	primeira constante de Tafel
$A_{tc}$	área do tubo de chama do combustor
$A_{TR}$	área de troca térmica de um trocador de calor
$b$	fator de correção de temperatura
$Bo$	número de ebulição
$b_T$	segunda constante de Tafel
$c_{p,i}(T)$	calor específico molar a pressão constante da espécie química $i$ ( $f$ indica o fluido frio de um trocador de calor) à temperatura $T$
$C_x$	capacitância do capacitor $x$
$D$	ciclo de trabalho do conversor CC/CC
$D_{boost}$	ciclo de trabalho do estágio <i>boost interleaved</i>
$D_{buck}$	ciclo de trabalho do estágio <i>buck</i>
$d_{ext,x}$	diâmetro externo do tubo $x$
$d_h$	diâmetro hidráulico
$d_{tc}$	diâmetro do tubo de chama
$DTML$	diferença de temperatura média logarítmica
$E_{bat}$	energia acumulada nas baterias
$(E_{bat})_h$	energia acumulada nas baterias ao final da hora $h$
$E_{bat,pico}$	valor de pico da energia acumulada nas baterias ao longo do dia
$E_{max}$	valor máximo permitido de energia armazenada nas baterias
$E_{min}$	valor mínimo permitido de energia armazenada nas baterias
$E_{obj}$	valor objetivo de energia armazenada nas baterias
$ER_a$	energia consumida pelo setor residencial no Brasil no ano $a$
$e_{t,x}$	espessura da parede do tubo $x$
$F$	constante de Faraday (carga elétrica de um mol de elétrons)
$F_{amp}$	fator de amplificação do consumo de energia do setor residencial
$F_{at}$	fator de atualização do consumo de energia do setor residencial
$f_c$	frequência de chaveamento do conversor CC/CC



$f_{i,ext}$	fração da espécie química $i$ alimentada à PaCOS do exterior
$f_{rec,A}$	fração de recirculação anódica
$f_{rec,C}$	fração de recirculação catódica
$h_e$	coeficiente de troca térmica ao externo dos tubos de um trocador de calor
$h_i$	coeficiente de troca térmica ao interno dos tubos de um trocador de calor
$h_l$	coeficiente de troca térmica do líquido
$I$	corrente produzida pelo empilhamento
$i$	densidade de corrente de uma pilha unitária
$I_{CA}$	corrente na saída (alternada) do inversor
$I_{CC}$	corrente na entrada (contínua) do inversor
$I_{D,boost}$	corrente média nos diodos do estágio <i>boost interleaved</i>
$I_{D,buck}$	corrente média nos diodos do estágio <i>buck</i>
$I_e$	corrente na entrada do conversor CC/CC
$I_{L,boost}$	corrente média nos indutores do estágio <i>boost interleaved</i>
$I_{L,buck}$	corrente média nos indutores do estágio <i>buck</i>
$I_s$	corrente na saída do conversor CC/CC
$I_{s,boost}$	corrente na saída do estágio <i>boost interleaved</i>
$k$	condutividade térmica do fluido
$k_{t,x}$	condutividade térmica da parede de um tubo $x$
$l$	largura do casco dos trocadores de calor
$L_x$	indutância do indutor $x$
$l_{zc}$	comprimento total da zona de combustão
$l_{zd}$	comprimento da zona de diluição
$l_{zp}$	comprimento da zona de combustão primária
$l_{zs}$	comprimento da zona de combustão secundária
$\dot{m}_{ar,comb}$	vazão mássica do ar na entrada da câmara de combustão
$\dot{n}_{ar}$	vazão molar de ar alimentada
$\dot{n}_{C_2H_6O}$	vazão molar de etanol alimentada
$Nc_a$	número de consumidores residenciais no Brasil no ano $a$
$N_{e^-}$	número de elétrons por molécula de combustível que reage na semi-reação anódica
$\dot{n}_f$	vazão molar do fluido frio em um trocador de calor
$\dot{n}_{H_2}$	vazão molar de hidrogênio alimentada

$\dot{n}_{H_2O}$	vazão molar de água alimentada
$\dot{n}_{H_2O,A}$	vazão molar de água que entra no compartimento anódico
$\dot{n}_{i,comb}$	vazão molar da espécie química $i$ na entrada da câmara de combustão
$\dot{n}_{i,comb,s}$	vazão molar da espécie química $i$ na saída da câmara de combustão
$\dot{n}_{i,EST}$	vazão molar estequiométrica da espécie química $i$ necessária às reações eletroquímicas
$\dot{n}_{i,k}$	vazão molar da espécie química $i$ na posição $k$ do sistema
$\dot{n}_{O_2,C}$	vazão molar de oxigênio que entra no compartimento catódico
$N_p$	número de pilhas unitárias no empilhamento
$Nu$	número de Nusselt
$P$	potência elétrica útil produzida pelo sistema de geração
$p$	pressão
$p_{amb}$	pressão ambiente
$\bar{P}_{at}$	potência consumida média diária do perfil de carga atualizado
$P_B$	potência elétrica consumida pelas bombas
$(\bar{P}_{bat})_h$	potência média fornecida pelas baterias na hora $h$
$P_{BdP}$	potência elétrica consumida pelo balanço de planta
$P_{CA}$	potência na saída (corrente alternada) do inversor
$(\bar{P}_{carga})_h$	potência média consumida pelas cargas na hora $h$
$P_{CC}$	potência na entrada (corrente contínua) do inversor
$P_{CC/CC}$	potência elétrica de projeto do conversor CC/CC
$p_{comb}$	pressão na entrada da câmara de combustão
$P_e$	potência elétrica na entrada do conversor CC/CC
$P_{EP}$	potência elétrica perdida no conversor CC/CC e no inversor
$P_{PaC}$	potência elétrica produzida pelo empilhamento
$PQ$	energia química por segundo associada ao combustível introduzido na PaCOS
$P_S$	potência elétrica consumida pelo soprador
$P_s$	potência elétrica na saída do conversor CC/CC
$p_s$	pressão na saída do soprador do ar
$Q_{conv}$	potência térmica absorvida por convecção dos gases que circulam no empilhamento
$Q_{d,x}$	potência térmica perdida para o exterior no componente $x$

$Q_f$	potência térmica absorvida pelo fluido frio em um trocador de calor
$Q_{i,k}$	potência térmica associada ao fluxo do fluido $i$ (quente $q$ ou frio $f$ ) na posição $k$ (entrada $e$ ou saída $s$ ) de um trocador de calor
$Q_k$	potência térmica associada à vazão circulante na posição $k$
$Q_{L,i}$	potência térmica latente associada à condensação ou vaporização do fluido $i$ (quente $q$ ou frio $f$ )
$q_{L,i}$	calor latente específico molar associado à vaporização da espécie química $i$ ( $f$ indica o fluido frio de um trocador de calor)
$Q_{PaC}$	potência térmica trocada pelo empilhamento
$Q_{REC}$	potência térmica absorvida pela água fria no recuperador de calor
$R$	constante universal dos gases perfeitos
$R_f$	fator de fuligem
$R_p$	resistência ôhmica de uma pilha unitária
$S_{\eta_{el}}^p$	sensibilidade de $\eta_{el}$ à variação do parâmetro $p$
$T$	temperatura
$T_{amb}$	temperatura ambiente
$t_{ciclo}$	tempo total do ciclo de chaveamento do conversor CC/CC
$T_{comb}$	temperatura de entrada dos fluidos na câmara de combustão
$T_{comb,max}$	temperatura máxima teórica dos gases na saída do combustor
$T_{comb,min}$	temperatura mínima de projeto dos gases na saída do combustor
$t_h$	intervalo de tempo onde é calculada a média da potência consumida pelas cargas elétricas no perfil de carga
$T_{i,k}$	temperatura do fluido $i$ ( $f$ indica fluido frio, $q$ fluido quente) na posição $k$ ( $e$ entrada, $s$ saída) de um trocador de calor
$T_k$	temperatura na posição $k$ do sistema
$t_{off}$	tempo máximo de inatividade da PaCOS em temperatura
$t_{on}$	tempo durante o qual uma chave permanece fechada
$T_{PaC}$	temperatura de operação da pilha a combustível
$T_{S,isentrópica}$	temperatura na saída do soprador (compressão isentrópica)
$U_D$	coeficiente global de troca térmica
$V$	tensão aos terminais do empilhamento
$V_{bat}$	tensão nominal das baterias
$V_{CA}$	tensão na saída (corrente alternada) do inversor
$V_{CC}$	tensão na entrada (corrente contínua) do inversor

$\frac{V}{E}$	razão entre vazão molar de vapor d'água e de etanol
$V_e$	tensão na entrada do conversor CC/CC
$V_{e,max}$	tensão máxima de projeto na entrada do conversor CC/CC
$V_{e,min}$	tensão mínima de projeto na entrada do conversor CC/CC
$V_{eq}$	potencial teórico de equilíbrio de uma pilha unitária
$\dot{V}_i$	vazão volumétrica do fluido $i$
$V_p$	tensão de uma pilha unitária
$V_p^{I=0}$	potencial de circuito aberto de uma pilha unitária
$V_s$	tensão na saída do conversor CC/CC
$V_{s,boost}$	tensão de saída do estágio <i>boost interleaved</i>
$V_{s,max}$	tensão máxima de projeto na saída do conversor CC/CC
$V_{s,min}$	tensão máxima de projeto na saída do conversor CC/CC
$x_i$	coeficiente estequiométrico da espécie química $i$
$x_{i,k}$	coeficiente estequiométrico da espécie química $i$ na posição $k$ do sistema
$y_i$	fração molar da espécie química $i$
$\alpha$	coeficiente estequiométrico do etanol como reagente na semi-reação anódica
$\beta$	coeficiente estequiométrico do dióxido de carbono como reagente na semi-reação anódica
$\gamma$	coeficiente de expansão adiabática
$\delta$	coeficiente estequiométrico do hidrogênio como reagente na semi-reação anódica
$\Delta E_{bat}$	capacidade do banco de baterias
$\Delta G^0$	variação de energia livre de Gibbs de formação em condições padrão
$\Delta h_{B,i}$	variação de entalpia específica molar entre a entrada e a saída da bomba do fluido $i$
$\Delta h_{C_2H_6O}$	entalpia de combustão do etanol
$\Delta h_{dv}$	variação de entalpia relativa à reação de deslocamento do vapor d'água
$\Delta h_{H_2}$	entalpia de combustão do hidrogênio
$\Delta h_{rv}$	variação de entalpia relativa à reação de reforma a vapor do etanol
$\Delta h_s$	variação de entalpia específica molar entre entrada e saída do soprador

$\Delta I$	oscilação de corrente no conversor CC/CC
$\Delta I_{buck}$	oscilação de corrente no estágio <i>buck</i>
$\Delta p$	diferença de pressão
$\Delta p_A$	queda de pressão na linha anódica
$\Delta p_{B,i}$	diferença de pressão entre entrada e saída da bomba do fluido <i>i</i>
$\Delta p_C$	queda de pressão na linha catódica
$\Delta T_{a,b}$	diferenças de temperatura entre os fluidos às extremidades <i>a</i> e <i>b</i> de um trocador de calor
$\Delta V$	oscilação de tensão máxima de projeto no conversor CC/CC
$\varepsilon_{TR}$	eficiência de troca térmica de um trocador de calor
$\mu$	coeficiente estequiométrico do oxigênio como reagente na semi-reação catódica
$\nu$	coeficiente estequiométrico do nitrogênio como reagente na semi-reação catódica
$\zeta$	coeficiente estequiométrico da água como reagente na combustão
$\eta_{BdP}$	rendimento elétrico global do balanço de planta
$\eta_{B,i}$	rendimento isentrópico da bomba do fluido <i>i</i>
$\eta_{CC/CC}$	eficiência elétrica do conversor CC/CC
$\eta_{comb}$	eficiência da combustão da câmara de combustão
$\eta_{el}$	eficiência elétrica global do sistema de geração
$\eta_{EP}$	eficiência elétrica da eletrônica de potência
$\eta_{PaC}$	eficiência elétrica do empilhamento
$\eta_S$	rendimento isentrópico do soprador
$\eta_t$	eficiência térmica global do sistema de geração
$\theta$	parâmetro de correlação
$\vartheta$	coeficiente estequiométrico do dióxido de carbono como reagente na combustão
$\lambda_{comb}$	relação entre razão etanol/ar estequiométrica e real na combustão
$\lambda_i$	razão entre quantidade da espécie química <i>i</i> alimentada ao empilhamento e quantidade estequiométrica necessária às reações eletroquímicas
$\zeta$	coeficiente estequiométrico do hidrogênio como reagente na combustão
$\tau$	coeficiente estequiométrico do oxigênio como reagente na combustão
$\varphi$	coeficiente estequiométrico do nitrogênio como reagente na combustão

# 1. INTRODUÇÃO

A área de novos conversores de energia é objeto de pesquisa intensa nas últimas décadas, principalmente com a finalidade de melhorar o desempenho energético dos sistemas, além de enfrentar os desafios relativos à redução das emissões de poluentes. Nesse contexto, uma das tecnologias mais promissoras são as Pilhas a Combustível (PaC), dispositivos de produção de energia elétrica de elevada eficiência [1] e baixas emissões de poluentes, cuja geração de energia é resultado da conversão direta da energia química do combustível através de reações eletroquímicas. Além das próprias pilhas, arranjadas em empilhamentos, os sistemas de produção elétrica baseados em PaC necessitam de vários equipamentos auxiliares, o conjunto dos quais é chamado de Balanço de Planta (BdP) da pilha a combustível [2].

Um dos tipos de PaC que atrai grande interesse na comunidade científica é a Pilha a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS), que emprega um eletrólito cerâmico de óxido sólido capaz de conduzir íons [1]. Os eletrólitos normalmente empregados nesse tipo de pilhas podem conduzir íons  $O^{2-}$  do catodo para o anodo ou íons  $H^+$  do anodo para o catodo. A temperatura de operação varia entre 650 °C e 1000 °C. O combustível pode ser hidrogênio, mas também hidrocarbonetos de cadeia simples, que podem ser decompostos em CO e  $H_2$  no anodo da PaCOS, ou gás de síntese obtido através de tratamento químico prévio de hidrocarbonetos complexos. As vantagens desse tipo de PaC são a capacidade de funcionar utilizando combustíveis diferentes do hidrogênio puro e o fato de gerar calor em alta temperatura como coproduto da produção de energia elétrica. Devido às suas características, as PaCOS são particularmente adequadas para aplicações de geração estacionária de energia elétrica e térmica, simultaneamente, com alta eficiência e baixo impacto ambiental. As potências desse tipo de aplicação das PaCOS variam amplamente, a partir de 500 - 1000 W até plantas da ordem de algumas centenas de kW [1]. Isso é devido do fato que o desempenho energético dos sistemas de geração baseados em pilhas a combustível é aproximadamente constante com a variação da potência produzida.

Uma das aplicações mais interessantes para as PaCOS de pequena potência é a microgeração (geração concomitante de potência elétrica e térmica, com potência elétrica menor que 50 kW, de acordo com a definição da União Europeia [3]). Essa é

uma área tecnológica onde estão concentrados relevantes esforços de desenvolvimento, particularmente com intuito de se criarem redes de geração e distribuição de energia elétrica mais eficientes, sustentáveis e estáveis com a utilização difundida de microgeradores de eficiência elevada (geração distribuída) [4]. Todavia, para atingir o resultado de aumentar a eficiência global do sistema de geração elétrica é fundamental que a eficiência dos microgeradores seja parecida com aquela dos modernos sistemas de geração centralizada, que atualmente supera o 60 % [5], descontada das perdas de transmissão devidas ao transporte de eletricidade de longa distância. Esse requisito não pode ser facilmente satisfeito empregando tecnologias convencionais, como motores a combustão interna ou microturbinas, mas pode ser alcançado utilizando sistemas baseados em PaC, que apresentam eficiências muito elevadas, mesmo trabalhando com baixa potência. Como consequência, as pilhas a combustível são potenciais candidatas para a difusão maciça de sistemas de microgeração. Nesse âmbito a tecnologia PaCOS aparece particularmente promissora [6], oferecendo as vantagens já mencionadas antes sobre outros tipos de PaC. Nos últimos anos, a pesquisa nessa área foi intensa, levando à criação de vários protótipos e produtos que alcançaram um grau de maturidade tecnológica relevante [1]. Diferentes programas de instalação para a demonstração da tecnologia estão sendo desenvolvidos há alguns anos [7, 8]. Resultado desse esforço foi que a tecnologia de óxido sólido é uma das mais difundidas no mercado das pilhas a combustível, registrando um significativo crescimento no volume de vendas [9]. Um dos produtos baseado em PaCOS mais comum é justamente o microgerador PaCOS alimentado com gás natural, introduzido no mercado como substituto dos tradicionais aquecedores domésticos, muito difundidos para uso residencial nos países de clima frio. Dada a aplicação prevista, o projeto desses equipamentos tenta maximizar o rendimento global (soma dos rendimentos térmico e elétrico) e garantir uma potência térmica relevante, considerando a energia elétrica apenas como um coproduto útil da produção de calor.

No Brasil, o panorama da geração e da utilização de energia tem um perfil peculiar, bem diferente da situação da maioria dos outros países economicamente relevantes. Algumas características importantes são a elevada percentagem de energia elétrica de fontes renováveis (principalmente hidrelétrica), a pequena necessidade de energia térmica para aquecimento doméstico e a grande capacidade produtiva e infraestrutura de distribuição de bioetanol [10]. Ao mesmo tempo, o Brasil está enfrentando importantes desafios na tentativa de expandir a capacidade de geração elétrica, fator importante para permitir o

desenvolvimento do país, mantendo a elevada porcentagem de energia de origem renovável e garantindo a possibilidade de armazenar essa energia, regularizando a produção. Alcançar esses objetivos é cada vez mais difícil, devido à rapidez da expansão da demanda e à ausência de reservatórios hídricos de grande porte na maioria dos novos projetos de usinas hidrelétricas [11]. Além disso, apesar da geração elétrica ser realizada no Brasil primordialmente com fontes renováveis, o seu impacto ambiental não é desprezível. Sendo principalmente de origem hidrelétrica, envolve considerável produção de metano por decomposição de matéria orgânica nos lagos de contenção de água. Ainda, por ser centralizada, requer grande infraestrutura de transmissão e distribuição, o que gera perdas de eficiência, com elevados custos financeiros e ambientais, especialmente considerando que a maior parte do potencial hidrelétrico residual está localizada na região Norte [11], muito longe dos grandes centros de consumo do país. Uma possível resposta a esses desafios é o aproveitamento de uma fonte renovável facilmente armazenável como o bioetanol de cana de açúcar, um combustível líquido de logística simples, baixa toxicidade e caracterizado por um pequeno impacto ambiental, já produzido no Brasil em grande escala e com elevada eficiência de processo [10, 12, 13]. O uso do etanol apresenta também vantagens com respeito a fontes renováveis intermitentes como energia solar e eólica, permitindo a geração de eletricidade no lugar e no momento mais adequado.

O uso desse combustível em sistemas energéticos baseados em PaCOS garantiria elevada eficiência de geração e baixas emissões de poluentes, representando uma solução de geração muito interessante. Microcogeradores PaCOS alimentados com etanol poderiam então ser empregados em várias situações no Brasil, produzindo benefícios ambientais e econômicos [14]. Uma primeira aplicação possível é a substituição dos geradores de alto impacto ambiental (na maioria dos casos motores à combustão interna) que são atualmente utilizados em algumas situações específicas, como a geração de potência nos períodos de pico da demanda elétrica e alto preço da energia, ou o fornecimento de eletricidade a localidades remotas não conectadas com a rede nacional de distribuição. Seria possível substituir esses geradores por sistemas PaCOS mantendo a mesma qualidade de serviço e infraestrutura de abastecimento, mas aumentando notavelmente a eficiência de geração e reduzindo as emissões de poluentes. Em segundo lugar, a instalação difundida de microcogeradores PaCOS alimentados com bioetanol, sob a ótica de geração distribuída com o objetivo de fornecer potência básica à rede, representaria também uma modalidade conveniente de geração elétrica



renovável com impacto ambiental reduzido, permitindo aumentar a potência instalada, evitando ao mesmo tempo os problemas associados com a geração centralizada e com as renováveis intermitentes mencionados acima. Para serem introduzidos com sucesso no mercado brasileiro, os sistemas instalados no país deveriam então apresentar algumas diferenças com respeito aos produtos atualmente comercializados no mundo, como a utilização do etanol ao invés de metano e o funcionamento dedicado essencialmente à produção elétrica (apesar de existir também áreas do país que possuem períodos de clima frio, onde poderá ser interessante a cogeração doméstica de eletricidade e calor). Nessa perspectiva foi empreendido um projeto de pesquisa focado no desenvolvimento do balanço de planta para um gerador elétrico PaCOS alimentado com etanol de potência na faixa da microcogeração, adaptado às condições do Brasil.

O balanço de planta é formado por todos os dispositivos auxiliares que permitem a operação segura e eficiente do empilhamento e o condicionamento das energias elétrica e térmica produzidas de tal maneira que seja possível transferi-las aos utilizadores. Para utilizar etanol em um sistema PaCOS, várias mudanças no estado da arte da tecnologia são requeridas, particularmente na parte do protótipo encarregada do condicionamento do combustível antes de alimentar o empilhamento. Característica importante do sistema concebido é a estrutura híbrida: a PaCOS produz uma potência elétrica útil constante, fazendo parte de um sistema mais complexo que inclui um banco de baterias, utilizado para compensar as variações da carga elétrica. Assim sendo, é possível reduzir os transientes de potência suportados pela PaC, prolongando a sua vida útil. De fato, vários estudos existentes na literatura relacionam a degradação do desempenho das pilhas a combustível de óxido sólido com frequentes variações de suas condições de operação [15]. Desta forma, o presente trabalho de tese continua a linha de pesquisa sobre sistemas híbridos e suas aplicações na área das PaC desenvolvida no Laboratório de Hidrogênio (PEMM/COPPE), que já produziu uma tese de doutorado focada na aplicação teórica de algoritmos genéticos no projeto de sistemas PaCOS híbridos [16, 17], além de uma patente que fornece o detalhamento técnico de um equipamento híbrido genérico de produção de energia [18]. Outro desenvolvimento do Laboratório de Hidrogênio de interesse para a presente tese é o de um material anódico projetado para o funcionamento com etanol anidro [19, 20], que permite a utilização direta do combustível sem nenhum processamento químico prévio (normalmente aplicado para decompor a molécula em compostos mais simples), evitando assim a necessidade de um reator químico adicional, que incrementa o custo e a complexidade do sistema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo procurou-se dar uma abordagem ampla sobre os sistemas energéticos baseados em PaCOS, com enfoque especial sobre a estrutura do sistema e os componentes auxiliares empregados no balanço de planta. Qualquer sistema energético é composto por um componente principal (que desempenha a função essencial do sistema, a saber, converter o conteúdo energético de uma fonte de energia para outra forma de energia) e alguns dispositivos auxiliares, utilizados para fornecer e retirar do cerne do sistema todos os fluxos de matéria e energia requeridos. Por exemplo, no sistema de propulsão de um automóvel o motor a combustão interna é o cerne do sistema, enquanto os dispositivos auxiliares são todos os componentes das linhas de abastecimento do combustível e do ar, do sistema elétrico, da linha de exaustão dos gases de escape, do sistema de resfriamento, e assim por diante. Essa distinção pode ser feita para qualquer outro sistema energético, como usinas elétricas convencionais e de energias renováveis, sistemas de propulsão e fontes de potência portáteis. O conjunto dos componentes auxiliares é usualmente denominado Balanço de Planta (BdP) do sistema energético. O balanço de planta é caracterizado por diferentes níveis de complexidade dependendo da aplicação: em alguns casos, pode ser muito simples; em outros, constitui a maior parte do sistema, influenciando de maneira relevante o funcionamento do mesmo.

No caso dos sistemas baseados em pilhas a combustível, o BdP condiciona fortemente o projeto e as estratégias operacionais do equipamento. De fato, a PaC, componente onde acontece a conversão eletroquímica do conteúdo energético do combustível em energia elétrica e calor, requer um balanço de planta bastante complexo para funcionar corretamente. Nesse caso, o BdP desempenha vários papéis: fornecimento de combustível e oxidante à PaC; retirada e condicionamento das potências elétrica e térmica produzidas; descarte dos subprodutos da reação eletroquímica. Além disso, as pilhas a combustível são dispositivos caros e sensíveis, características que impõem um projeto acurado do BdP e da estratégia de controle do mesmo.

Os vários tipos de pilhas a combustível requerem balanços de planta diferentes. No caso das pilhas a combustível de óxido sólido, os fatores que mais influenciam o projeto do balanço de planta são a elevada temperatura de funcionamento, que impõe um

cuidadoso manejo térmico do sistema; a tipologia de pré-processamento do combustível, que controla a composição do gás que entra no anodo das pilhas; a estratégia de operação do empilhamento (produção elétrica constante ou variável, proporção entre potência elétrica e térmica produzidas).

Na Figura 1 é representado um diagrama de blocos genérico de um sistema energético baseado em PaCOS, que compreende, além do empilhamento em si, as linhas de alimentação do combustível e do oxidante, os equipamentos de manejo das energias elétrica e térmica produzidas, o sistema de exaustão dos gases e os dispositivos de controle e segurança. Os vários subsistemas serão analisados nas seções seguintes.

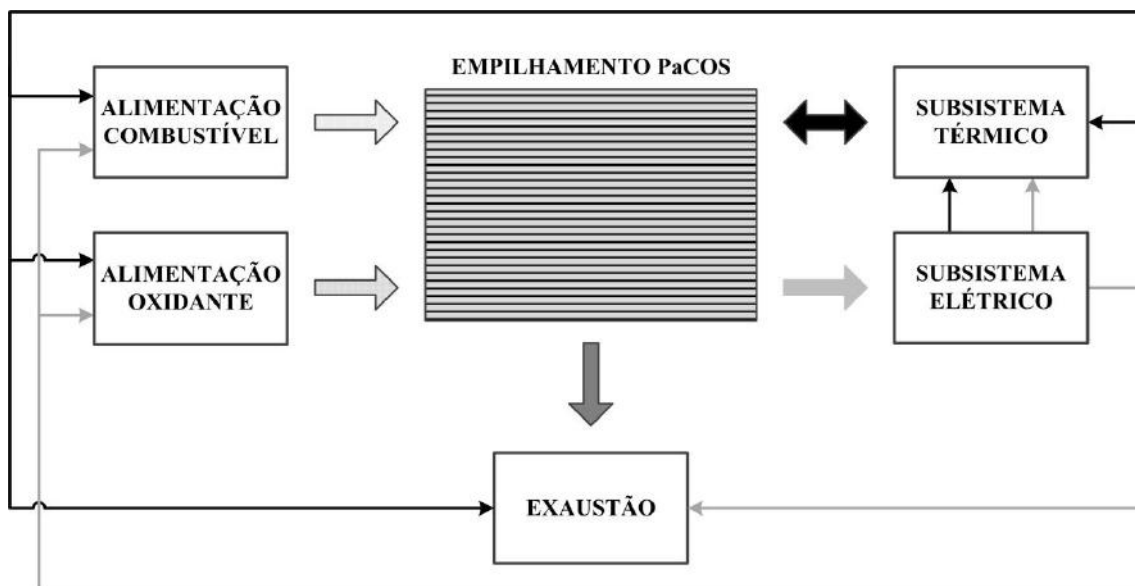


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de cogeração baseado em PaCOS.

## 2.1. EMPILHAMENTO DE PILHAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO

O empilhamento PaCOS é o elemento principal do sistema de geração, responsável da conversão eletroquímica da energia química do combustível em energia elétrica e térmica. É composto por uma série de pilhas unitárias, cada uma formada por uma sucessão de anodo, eletrólito e catodo. O contato elétrico entre o catodo de uma pilha e o anodo da pilha seguinte é normalmente garantido por um interconector metálico, que desempenha também o papel de distribuir os reagentes na superfície dos eletrodos. As reações eletroquímicas acontecem nas regiões de tripla fase, onde os reagentes entram em contato contemporaneamente com eletrólito e eletrodo, materiais responsáveis pela

condução dos íons e dos elétrons produzidos nas reações. Os íons circulam através do eletrólito de um eletrodo para o outro, enquanto os elétrons são conduzidos através dos interconectores, criando a corrente elétrica útil. Nos itens seguintes são expostas algumas características importantes dos empilhamentos PaCOS.

### **2.1.1. Materiais para PaCOS**

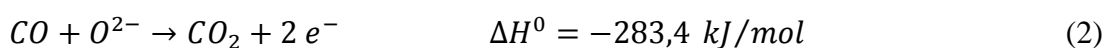
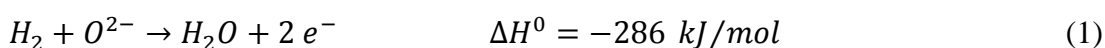
As pilhas a combustível de óxido sólido são caracterizadas pelo uso de um eletrólito cerâmico de óxido sólido, usualmente zircônia estabilizada com ítria ou com scandia capaz de conduzir íons oxigênio ( $O^{2-}$ ) do catodo para o anodo [21, 22]. O eletrólito deve ser denso, impedindo a passagem de gás de um eletrodo ao outro, e apresentar uma condutibilidade eletrônica desprezível, para forçar os elétrons a circular externamente à pilha. A condutibilidade iônica do cerâmico, desprezível à temperatura ambiente, assume valores suficientemente elevados quando a temperatura é maior. A faixa de operação normal situa-se entre 650 °C e 1000 °C. Os materiais habitualmente empregados para os eletrodos são *cermet* de níquel e zircônia estabilizada com ítria (para o anodo) e óxidos de tipo perovskita baseados em lantânio (para o catodo). Ambos os eletrodos devem ser porosos, para permitir aos gases de penetrar até as regiões de tripla fase, e possuir uma elevada condutibilidade eletrônica. Todos os materiais empregados para eletrodos, eletrólito e interconectores têm que ser compatíveis quimicamente e fisicamente, não reagindo entre si e apresentando coeficientes de expansão térmica parecidos.

Existem relevantes esforços de pesquisa para desenvolver materiais adequados à operação em temperaturas abaixo de 600 °C; de fato, nessa faixa de temperatura é possível utilizar materiais mais baratos e simplificar o manejo térmico do sistema [1]. Além disso, a temperatura do eletrólito não pode ser variada com taxas maiores a poucos graus por minuto, devido às características de resistência mecânica do material cerâmico. Consequentemente, os transitórios de aquecimento e resfriamento dos empilhamentos PaCOS tem duração tipicamente superior a uma hora. Empregar uma temperatura de operação menor influi positivamente também sobre esse aspecto, permitindo de reduzir o tempo necessário a ativar e desativar o sistema de geração. A elevada duração dos transitórios térmicos, junto com a já mencionada degradação acelerada associada a frequentes transitórios da potência produzida pelo empilhamento, faz com que a maior parte dos sistemas energéticos baseados em PaCOS sejam projetados visando uma operação do empilhamento contínua e com potência constante.

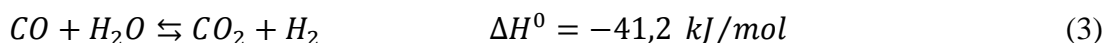
Outra linha de pesquisa importante na área dos materiais para PaCOS é o desenvolvimento de materiais para o anodo capazes de funcionar em regime de utilização direta de hidrocarbonetos e álcoois, na forma descrita no item 2.2.3. Nessa modalidade de funcionamento, o material anódico normalmente empregado nas PaCOS resulta inadequado, devido ao fato que o níquel catalisa a formação e deposição de carbono sólido, que pode danificar irreversivelmente o anodo. Consequentemente, foram testados numerosos materiais alternativos, entre os quais: *cermet* de níquel e zircônia dopados com outros elementos; óxidos de tipo perovskita baseados em lantânio ou estrôncio; anodos de cobre e zircônia e/ou céria [19]. Como já mencionado, nesse contexto o Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ desenvolveu um material anódico para a utilização direta de etanol anidro, composto por cobre, céria, alumina e zircônia estabilizada com ítria [20].

### 2.1.2. Reações químicas nas PaCOS

Normalmente, os compostos que participam como combustíveis das reações eletroquímicas no anodo das pilhas a combustível de óxido sólido são hidrogênio e monóxido de carbono. Tais compostos combinam-se com os íons oxigênio que passa através do eletrólito, produzindo, respectivamente, água e dióxido de carbono, além de elétrons, transferidos ao catodo através de um condutor externo à pilha. As semi-reações anódicas que envolvem esses combustíveis são as reações (1) e (2):



Todavia, é importante especificar que nas condições de trabalho dos empilhamentos PaCOS e em presença de água, a reação (2) é aproximadamente quatro vezes mais lenta que a reação (3) [21], chamada reação de deslocamento do vapor d'água:



A reação (3) é exotérmica, sendo que o valor da variação de entalpia padrão  $\Delta H^0$  associado à reação é negativo.

O princípio operacional de uma PaCOS convencional está representado na Figura 2: como indicado na Figura, em uma PaCOS acontecem reações de oxidação no anodo e de redução no catodo. O efeito global dessas duas semi-reações é a oxidação dos

combustíveis, sem que aconteça a queima dos mesmos, junto com a geração de uma corrente elétrica no condutor que conecta anodo e catodo.

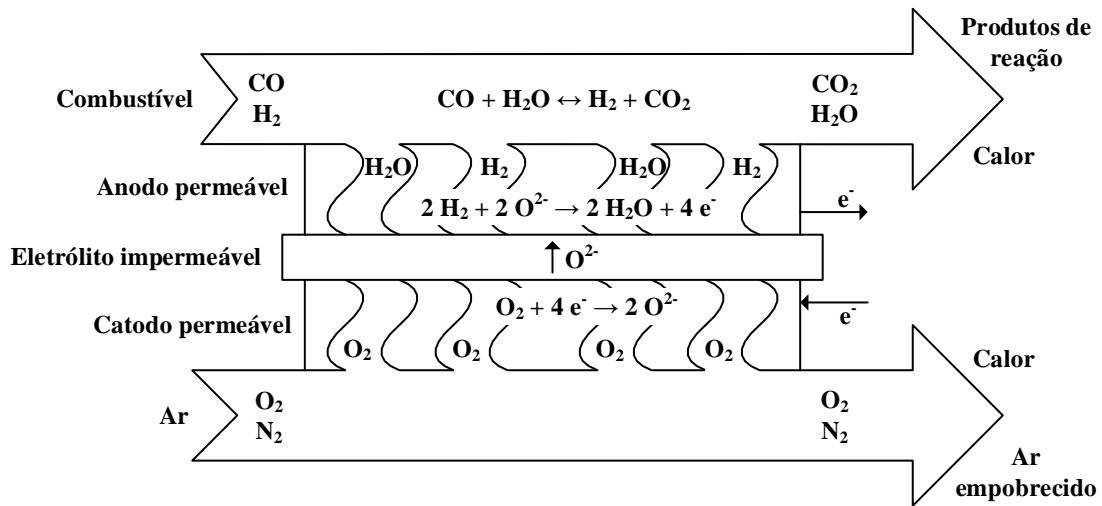
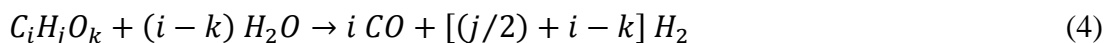


Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma PaCOS.

Na maior parte dos casos práticos, a presença de monóxido de carbono está associada à presença de hidrogênio. Isso é devido ao fato que o monóxido de carbono alimentado é normalmente produzido por conversão química de um hidrocarboneto, internamente ou externamente à PaCOS, empregando reações que geram também hidrogênio como produto. No caso em que o monóxido de carbono é alimentado juntamente com o hidrogênio, a água presente no anodo como produto da reação (1) faz com que quase todo o CO seja convertido através da reação (3) antes que possa acontecer a (2).

Uma possibilidade muito explorada na pesquisa sobre as PaCOS é a da reforma interna do combustível [23 - 25], ou seja, da alimentação direta de hidrocarbonetos de cadeia simples ao anodo das PaCOS, com subsequente conversão química dos mesmos em uma mistura gasosa rica em CO e H<sub>2</sub> através da reação de reforma a vapor (4):



Essa possibilidade é garantida pelos materiais empregados no anodo (o níquel é um catalisador da reação de reforma) e pela temperatura de operação, suficientemente alta para que a reação aconteça. Além disso, o fato da reação (4) ser fortemente endotérmica ( $\Delta H^0$  é 206,9 kJ/mol se o hidrocarboneto for metano, 157,09 kJ/mol se for etanol) facilita a realização do balanço térmico do sistema, sendo o calor necessário fornecido diretamente pelas reações eletroquímicas, exotérmicas.

### 2.1.3. Curva de polarização de uma pilha a combustível

Por curva de polarização entende-se um gráfico da tensão presente nos terminais do empilhamento em função da corrente produzida, tipicamente utilizado na caracterização de pilhas a combustível. Para obter esse gráfico, muda-se gradativamente o nível de carga elétrica, registrando para cada patamar de carga a tensão aos terminais do empilhamento e a corrente gerada. Na Figura 3 é representada uma típica curva de polarização de uma pilha a combustível.

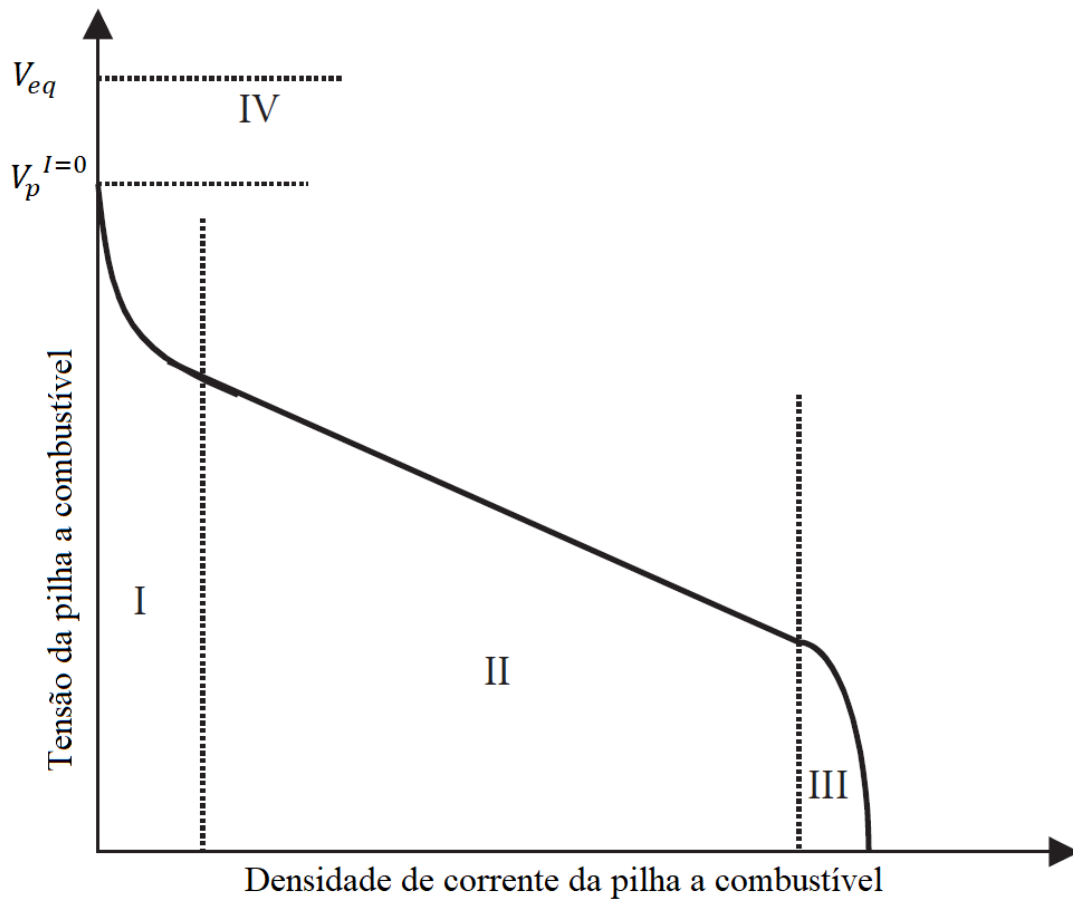


Figura 3 - Curva de polarização de uma pilha a combustível, adaptada de [1].

Ao aumentar da corrente gerada pela PaC a tensão da mesma cai, a partir do potencial de circuito aberto  $V_p^{I=0}$  (valor de tensão da PaC na situação de corrente nula) até chegar a anular-se, na situação de corrente máxima. A queda de tensão é devida às irreversibilidades do processo, provocadas por diferentes efeitos físicos, cada um predominante em uma das diferentes regiões da curva (indicadas com números romanos) [1]. Na região I, a causa principal da queda de tensão são as chamadas perdas de ativação, relacionadas com as barreiras energéticas que é necessário superar porque

aconteçam as semi-reações, de oxidação no anodo e de redução no catodo. A entidade da queda de tensão na região I é então indicação da qualidade dos eletrocatalisadores empregados para reduzir a energia de ativação das semi-reações eletroquímicas. Na região II predominam em vez as perdas ôhmicas, devidas à resistência à passagem de elétrons nos eletrodos e de íons no eletrólito. Nessa região a queda de tensão segue a lei de Ohm, sendo linearmente proporcional à corrente circulante na pilha. A constante de proporcionalidade é inversamente proporcional à soma da condutibilidade elétrica dos eletrodos e da condutibilidade iônica do eletrólito. As perdas principais na região III são chamadas de concentração e são relacionadas com a escassez de reagentes na proximidade das áreas de tripla fase. De fato, um elevado nível de corrente elétrica produzida pela PaC é associado a uma elevada taxa de reação dos gases. Todavia, o transporte de reagentes através da matriz porosa dos eletrodos acontece com velocidade limitada: quando a densidade de corrente é alta, a velocidade com a qual os reagentes são consumidos supera a velocidade com a qual eles difundem até as áreas de tripla fase, dando origem à redução da concentração dos reagentes e à queda acelerada da tensão da PaC. A entidade das perdas de concentração é relacionada com a microestrutura dos eletrodos: perdas elevadas são indicação de baixa porosidade e consequente dificuldade na difusão dos reagentes. Na região IV evidencia-se um efeito sobre o potencial de circuito aberto, que baixa do valor teórico de equilíbrio  $V_{eq}$  até o valor real  $V_p^{I=0}$ . Essa diferença de tensão é devida ao fato que o eletrólito não é perfeitamente impermeável aos reagentes e permite que pequenas quantidades de gás passem de um eletrodo para o outro sem participar das reações eletroquímicas, reduzindo a concentração de reagentes disponíveis. Além disso, o eletrólito não é um perfeito isolante elétrico, admitindo um pequeno fluxo de elétrons do anodo para o catodo. Essa pequena corrente elétrica não pode ser aproveitada para alimentar as cargas externas, constituindo uma perda adicional. Esses dois efeitos são presentes também quando não tem corrente circulante no empilhamento, influenciando diretamente o valor de  $V_p^{I=0}$ , que consequentemente depende da qualidade do eletrólito.

De maneira parecida a quanto é feito para construir a curva de polarização, pode-se traçar uma curva de potência, onde é representada a potência gerada pelo empilhamento, novamente em função da corrente produzida. A potência gerada é obtida simplesmente multiplicando a tensão pela corrente. O dado principal indicado na curva de potência é a potência elétrica máxima que pode ser produzida pela PaC.



## **2.2. LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO COMBUSTÍVEL**

Essa parte do balanço de planta é encarregada de manter o fluxo de combustível que entra no empilhamento nas condições de vazão, composição química, temperatura e pressão requeridas.

### **2.2.1. Regulagem da vazão**

Esse papel é normalmente cumprido por um controlador de fluxo de massa, uma válvula calibrada ou um soprador (ou bomba, no caso de combustível líquido) de velocidade variável ou fixa. Se a pressão presente no reservatório do combustível não é suficiente para vencer as perdas de pressão no sistema, o uso de um soprador (ou bomba) é compulsório. A tecnologia empregada para essa parte do sistema em protótipos e produtos é habitualmente convencional, requerendo, todavia, algumas adaptações às condições de trabalho específicas. Isso significa que, de maneira geral, é impossível empregar componentes comerciais projetados para outras aplicações.

Um componente que, quando utilizado, requer projeto cuidadoso é o soprador: para reduzir a potência consumida, a tecnologia desse dispositivo deve ser escolhida considerando as condições particulares de vazão e pressão desejadas (normalmente caracterizadas por vazão e pressão bastante baixas) e o dimensionamento deve ser acurado; ademais, deve-se trabalhar de maneira contínua com o combustível escolhido. A presença de hidrogênio no fluxo de combustível impõe de fato o uso de materiais especiais, uma vez que esse gás pode fragilizar muitos materiais metálicos. Como consequência, projetar e construir um dispositivo que respeita esses rigorosos requisitos sem preço excessivo é desafiador.

Em algumas configurações consideradas para a construção de sistemas PaCOS, o fluxo de gases na saída dos anodos das pilhas é recirculado para a entrada dos mesmos, enquanto apenas parte do combustível é introduzido do reservatório. Nesse caso, para gerar o fluxo de recirculação é preciso utilizar um componente capaz de aguentar a alta temperatura dos gases que saem do empilhamento. Dispositivos considerados na literatura para esse escopo são ejetores [26 - 29] ou sopradores de recirculação [30 - 33]. Nesse último caso, as dificuldades relacionadas com a elevada temperatura de operação adicionam-se àquelas já mencionadas para a realização de sopradores para o combustível eficientes e econômicos.

### 2.2.2. Dessulfurador

Vários combustíveis frequentemente utilizados nas pilhas a combustível contêm, originalmente, pequenas quantidades de compostos do enxofre. A presença desses compostos representa um grave problema para os sistemas PaCOS. De fato, o enxofre é adsorvido quimicamente pelo níquel, elemento presente em muitos dos catalisadores comumente utilizados para promover as reações de processamento químico prévio do combustível (ver item 2.2.3) e um dos materiais utilizados nos anodos das PaCOS. A presença do enxofre pode então levar ao envenenamento dos catalisadores mencionados acima e ao bloqueio das reações eletroquímicas, provocando uma rápida degradação de desempenho do sistema [34]. A Figura 4 demonstra o efeito da concentração de enxofre no combustível alimentado sobre tensão de circuito aberto (linha contínua) e razão potência produzida/potência máxima do empilhamento (linha tracejada).

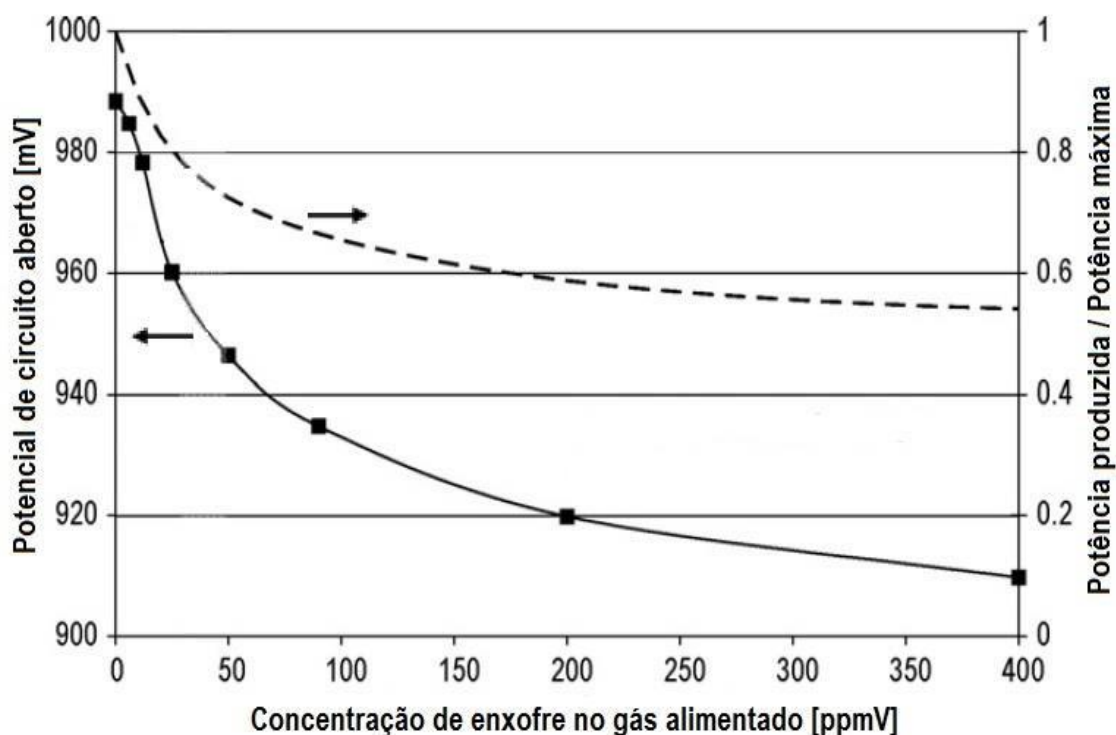


Figura 4 - Efeito da concentração de enxofre no combustível sobre o desempenho de uma PaCOS, adaptado de [34].

Como consequência, quando o combustível empregado contém compostos do enxofre é preciso incluir no sistema um dessulfurador. Esse componente é normalmente um reator de leito fixo, carregado com um composto adsorvente apropriado (como os indicados na Figura 5) e operante a temperatura ambiente, localizado ao início da linha de

alimentação do combustível, logo após do equipamento de regulação da vazão. A Figura 5 apresenta o desempenho de alguns adsorventes de enxofre comerciais, listados à direita [35]. Em cada linha são representadas as concentrações de vários compostos do enxofre no combustível que sai de um reator carregado com o adsorvente correspondente.

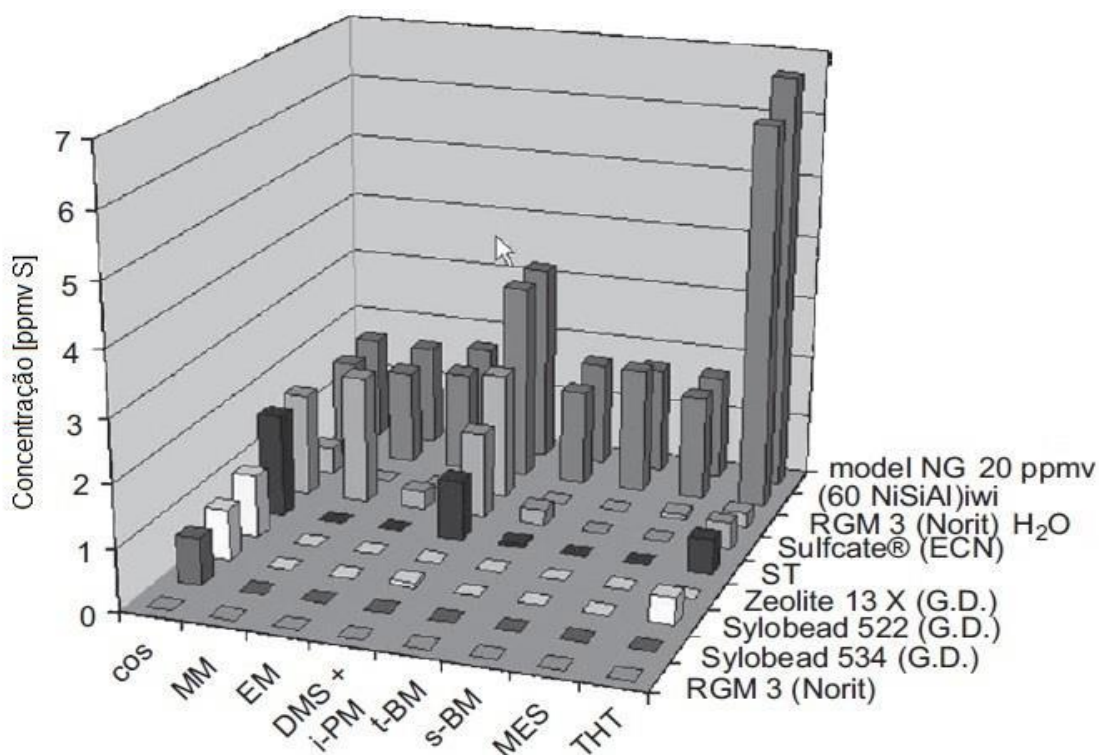


Figura 5 - Desempenho de adsorventes de enxofre comerciais, adaptado de [35].

Os compostos de enxofre detectados são:

- cos sulfeto de carbonilo;
- MM metilmercaptano;
- EM etilmercaptano;
- DMS sulfeto de dimetila;
- i-PM isopropilmercaptano;
- t-BM terbutilmercaptano;
- s-BM sec-butilmercaptano;
- MES sulfeto de etila e metila;
- THT tetrahidrotiofeno.

### **2.2.3. Processamento químico do combustível**

Em comparação com outras tipologias de PaC, as de óxido sólido são caracterizadas por uma notável flexibilidade na escolha do combustível a utilizar [36]. Isso é devido ao fato que nas PaCOS pode reagir eletroquimicamente também o monóxido de carbono, gás produzido na maior parte das reações comumente utilizadas para converter hidrocarbonetos complexos em misturas gasosas de compostos que podem participar nas reações eletroquímicas. Outros tipos comuns de PaC, como a PaC de membrana polimérica, não toleram a presença do CO no combustível alimentado [1], sendo esse gás um veneno para o catalisador empregado. Ademais, em condições adequadas as PaCOS apresentam a possibilidade de funcionar reformando o combustível diretamente no interior do empilhamento, como já mencionado na seção 2.1.

Apesar da possibilidade de alimentar alguns hidrocarbonetos diretamente no empilhamento, na maior parte das aplicações práticas de sistemas PaCOS é aplicada alguma forma de processamento químico prévio do combustível. Isso é feito para introduzir nas pilhas compostos que possam reagir diretamente com os íons oxigênio, fato que garante o melhor desempenho das mesmas. De fato, quando todo o combustível é reformado internamente, podem surgir inconvenientes como a queda da tensão de circuito aberto e tensões térmicas ocasionadas pela absorção de calor pela reação endotérmica de reforma a vapor. As considerações expostas até agora levaram à idealização e à realização de sistemas PaCOS caracterizados para diferentes estratégias de processamento do combustível. As principais soluções objeto de pesquisa são listadas abaixo:

#### **→ Processamento externo**

O combustível empregado, antes de entrar no empilhamento, é completamente convertido em uma mistura gasosa que contém principalmente  $H_2$ , CO,  $H_2O$  e  $CO_2$  (em alguns casos também  $O_2$  e  $N_2$ ). Como já mencionado, nesse caso os compostos combustíveis (CO e  $H_2$ ) podem participar diretamente das reações eletroquímicas [21]. Para essa solução é habitualmente empregado um reator de leito fixo, carregado com um catalisador apropriado e localizado a montante do empilhamento. Essa opção apresenta a vantagem de fornecer ao empilhamento um combustível de composição ótima, melhorando a eficiência das pilhas. Todavia, a presença de um reator adicional aumenta a complexidade e o custo do sistema, apesar do processamento requerido para as PaCOS ser bem mais simples do que aquele empregado em sistemas baseados em

pilhas a combustível de membrana polimérica (onde o envenenamento do catalisador causado pelo CO é um problema sério) [1]. Algumas das principais dificuldades na implementação eficiente dessa solução são a necessidade de acoplar termicamente o reator de processamento (que requer calor) com o empilhamento (que fornece calor) e o atraso no tempo de resposta do sistema introduzido pelas reações de conversão do combustível. O processamento externo pode ser aplicado utilizando várias reações (equações (4) - (7)), mas o reator deve ser projetado de acordo com a reação aplicada.

#### → **Processamento externo parcial**

A maioria dos protótipos existentes utiliza essa estratégia de processamento do combustível. As reações aplicadas podem ser as mesmas que no caso anterior, mas o reator externo é projetado fazendo com que apenas parte do fluxo reaja, enquanto o restante entra inalterado no empilhamento, onde a conversão é completada. Dessa forma, o reator externo pode ser menor e mais barato. Além disso, os problemas listados para o processamento externo são mitigados. Ao mesmo tempo, todavia, surgem alguns dos inconvenientes relacionados com o processo de reforma interna. O processamento externo parcial deriva então de um compromisso entre essas duas vias de processamento do combustível.

#### → **Processamento interno**

Nesse caso, cuja viabilidade é demonstrada na literatura [37], o combustível é alimentado diretamente ao empilhamento junto com uma corrente de vapor d'água e a conversão acontece completamente ao interior do empilhamento. Não existe um reator dedicado para reforma: as reações (3) e (4) acontecem nos compartimentos anódicos das pilhas. Como já mencionado, essa solução é viável desde que os materiais empregados para o anodo sejam eficazes catalisadores para a reação de reforma a vapor. Além disso, a temperatura de operação das PaCOS é suficientemente alta para a reação acontecer. Essa estratégia de operação apresenta vantagens importantes com respeito ao processamento externo: o sistema é mais simples e mais barato, enquanto a reação eletroquímica, exotérmica, é perfeitamente acoplada termicamente com a reação de reforma a vapor, endotérmica. Todavia, em alguns casos essa última característica pode provocar o resfriamento excessivo de algumas partes das PaCOS, particularmente na vizinhança da admissão do combustível, onde a maior parte do combustível é convertido através da reação de reforma a vapor e a baixa concentração de H<sub>2</sub> e CO

inibe a oxidação eletroquímica. É possível que a diferença de temperatura entre as diferentes partes possa causar estresses mecânicos que danifiquem as PaC. Além disso, nessa condição parte da área útil das pilhas é dedicada à conversão do combustível, sendo indisponível pela produção elétrica. Nesse caso, é ainda necessário incluir no sistema uma fonte de vapor d'água.

#### → **Utilização direta**

Essa solução prevê que o combustível seja alimentado ao empilhamento sem nenhum processamento prévio nem adição de vapor d'água. Antes de chegar ao interior da matriz porosa do anodo, os hidrocarbonetos que chegam aos compartimentos anódicos podem ser quebrados por reações de pirólise em compostos mais simples, ou convertidos em hidrogênio e monóxido de carbono através das reações (4) ou (6), aproveitando do vapor d'água e do dióxido de carbono produzidos na oxidação eletroquímica, sem adição de vapor d'água do exterior do empilhamento (como verificado na literatura [38, 39]). O H<sub>2</sub> e o CO produzidos podem reagir nos sítios ativos onde ocorre a reação eletroquímica. O processo global é ainda mais simples que o de reforma interna, não sendo necessária a alimentação de vapor. Todavia, a baixa concentração de água nos anodos pode não ser suficiente para evitar problemas de deposição de carbono sólido, com conseqüente desativação do material anódico. Os componentes do sistema que podem ser afetados pela formação de fuligem são as partes da linha de alimentação do combustível onde a temperatura é suficientemente alta para favorecer reações de pirólise do combustível, a tubulação de entrada de combustível no empilhamento e os compartimentos anódicos das pilhas. A pirólise pode ser favorecida também pelo contato entre o combustível e algumas substâncias, que agem como catalisadores, abaixando a temperatura na qual a formação de carbono sólido começa a ser relevante. Para evitar esse inconveniente, é preciso então empregar na produção do anodo materiais especiais, atualmente em fase de desenvolvimento [19, 20], que não favoreçam ou que impeçam o depósito de carbono.

Como mencionado anteriormente, na maior parte dos sistemas PaCOS é utilizada alguma forma de processamento do combustível previamente à alimentação do mesmo ao empilhamento. Geralmente, o processamento tem como objetivo converter os hidrocarbonetos, que compõem o combustível, em uma mistura gasosa formada principalmente por hidrogênio, monóxido de carbono, água e dióxido de carbono,

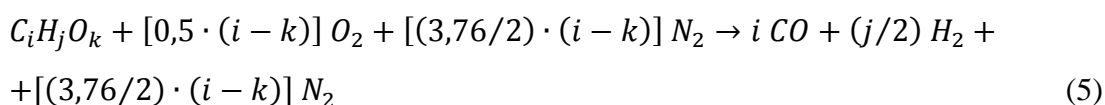
através de uma reação que envolve um fluxo de vapor, ar ou CO<sub>2</sub>. Na literatura [23 - 25, 40 - 46] são propostas várias reações, dentre as quais as mais importantes são:

#### → **Reforma a vapor**

A reação envolve o combustível e vapor, gerando uma mistura rica em hidrogênio e CO e pode ser escrita na forma genérica da reação (4). A reforma a vapor é a reação de conversão mais eficiente, mas tem um inconveniente relevante, ou seja, o fato que tal reação é fortemente endotérmica, requerendo conseqüentemente uma fonte de calor para manter o equilíbrio térmico do reator. Outro aspecto negativo é a necessidade de um gerador de vapor. Essas características complicam o projeto e a operação de sistemas de reforma a vapor. Os catalisadores utilizados para promover essa reação são variados, dependendo do hidrocarboneto processado [46]. Em muitos casos, concomitantemente à reação de reforma a vapor tenta-se promover também a reação (3) de deslocamento do vapor de água, com o objetivo de incrementar a porcentagem de hidrogênio no gás produzido. De fato, tal reação leva à conversão adicional de CO para H<sub>2</sub>. A reação de deslocamento do vapor d'água pode acontecer em um reator dedicado ou no mesmo onde procede a reforma a vapor. Nesse segundo caso, a composição do catalisador é escolhida de maneira a promover as duas reações ao mesmo tempo. Um benefício adicional da reação de deslocamento do vapor d'água é que ela é levemente exotérmica e pode assim fornecer parte do calor requerido pela reforma a vapor.

#### → **Oxidação parcial**

Nesse processo, um agente oxidante (usualmente ar) é misturado com o hidrocarboneto, para oxidar a CO o carbono contido no combustível. A reação genérica pode ser idealizada como na reação (5):



A reação é exotérmica no caso do metano ( $\Delta H^0 = -36 \text{ kJ/mol}$ ) e levemente endotérmica no caso do etanol ( $\Delta H^0 = 14 \text{ kJ/mol}$ ). Claramente, a oxidação do hidrogênio para formar água está em competição com essa reação. Para obter uma elevada produção de hidrogênio é então necessário garantir alta seletividade da oxidação do carbono com respeito àquela do hidrogênio. Esse resultado pode ser obtido utilizando um catalisador adequado no reator de oxidação (oxidação parcial catalítica)

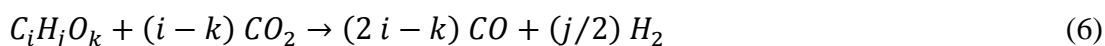
[41] ou confinando a reação em um meio poroso inerte (oxidação parcial térmica) [42]. O conteúdo em hidrogênio no gás produzido é notavelmente menor que no caso da reforma a vapor. Além disso, nesse processo podem surgir problemas de produção de carbono sólido no reator. Todavia, a oxidação parcial apresenta a vantagem de não necessitar fornecimento de grandes quantidades de energia e nem produção de vapor d'água. Isso garante maior simplicidade de construção e operação do reator [40]. Também nesse caso, a reação de deslocamento do vapor d'água é geralmente aplicada após a reação inicial.

#### → **Reforma autotérmica**

Esse processo resulta de uma combinação de reforma a vapor e oxidação parcial [25]. No mesmo reator, alimentado com hidrocarboneto, ar e vapor d'água em proporções adequadas, acontecem ao mesmo tempo as reações (4) e (5). Assim sendo, evita-se a necessidade de um complexo sistema de troca térmica entre a reação endotérmica de reforma e aquela exotérmica de oxidação, reduzindo ao mesmo tempo o risco de produção de fuligem próprio dos reatores de oxidação parcial. A eficiência do processo e a porcentagem de hidrogênio no gás produzido situam-se em níveis intermediários entre aqueles que caracterizam reforma a vapor e oxidação parcial.

#### → **Reforma com dióxido de carbono**

A reação aplicada (fortemente endotérmica e operada entre 700 e 1000 °C) prevê a combinação do hidrocarboneto com dióxido de carbono, com produção de CO e H<sub>2</sub>, de acordo com a reação (6):

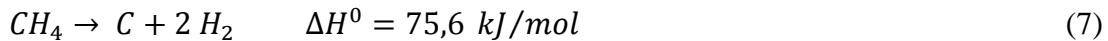


O valor de  $\Delta H^0$  associado à reação (6) é 247 kJ/mol e 296,8 kJ/mol para metano e etanol respectivamente. Um problema na aplicação prática desse processo é que existem várias reações em competição com a reação (6), algumas das quais termodinamicamente favorecidas, que levam à recombinação do hidrogênio produzido, reformando hidrocarbonetos. Além disso, esse processo é dificultado pela tendência à formação de carbono sólido, que desativa rapidamente o catalisador [43].



### → **Decomposição do metano**

Essa solução é objeto de pesquisa devido à possibilidade de produzir hidrogênio puro, tendo como único coproduto carbono em forma sólida, facilmente separável [44]. Essa característica é muito interessante na ótica da redução das emissões de gases de efeito estufa; de fato, as outras estratégias de processamento de combustível não permitem a separação de CO e CO<sub>2</sub>, ao menos de não utilizar complexos sistemas de sequestro e captura após o uso do combustível. Nesse caso, é aplicada a reação (7):



O gás produzido com a decomposição do metano (reação endotérmica) é formado quase unicamente de hidrogênio, apesar da quantidade total desse gás produzido no processo ser menor do que no caso da reforma a vapor combinada com a reação de deslocamento do vapor d'água. Outra característica positiva desse processo é que a energia requerida pela reação é inferior àquela absorvida pela reforma a vapor.

#### **2.2.4. Regulagem da temperatura**

De maneira geral, é importante que a diferença de temperatura entre o empilhamento e os fluxos que entram no mesmo não seja muito grande, para evitar tensões térmicas nos componentes do sistema e manter o eletrólito a uma temperatura suficiente para garantir uma condutividade iônica suficientemente alta [47]. Além disso, no caso em que seja empregado um reator externo de processamento químico do combustível, é necessário aproximar a temperatura do fluxo alimentado ao reator ao limite de operação do mesmo. O controle da temperatura do combustível nas tubulações e nos componentes a montante do empilhamento (ou do reator de processamento químico, se presente) é também um fator fundamental para evitar problemas de deposição de carbono sólido, inconveniente que pode aparecer quando o combustível é alimentado puro ou misturado com uma baixa quantidade de água. Como consequência, é preciso incluir no sistema algum dispositivo que possa aquecer o combustível até o nível de temperatura desejado. Isso pode ser feito utilizando resistências elétricas ou queimadores de combustível, mas usualmente são utilizados trocadores de calor, que transferem calor dos fluxos que saem do empilhamento para aqueles que entram no mesmo. Essa última solução garante a maior eficiência global do sistema, dado que o combustível é aquecido aproveitando-se do conteúdo energético residual dos gases de exaustão, sem consumir energia adicional.

As características dos trocadores de calor utilizáveis em sistemas PaCOS são discutidas na seção 2.5.

## **2.3. LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO OXIDANTE**

Essa linha é encarregada de manter o fluxo de oxidante que entra no empilhamento nas condições de vazão, temperatura e pressão requeridas. Na grande maioria dos casos, o oxidante utilizado é ar atmosférico, filtrado para eliminar as partículas sólidas eventualmente presentes e comprimido para superar as perdas de pressão no sistema.

### **2.3.1. Regulagem da vazão**

Os dispositivos utilizados para regular a vazão do oxidante são os mesmos que podem ser empregados no caso do combustível: controlador de fluxo de massa; válvula calibrada; soprador de velocidade fixa ou variável. Quando o oxidante é o ar atmosférico, caso mais comum, o uso de um soprador é compulsório para gerar o fluxo de ar. Embora esse tipo de componente ser empregado em inúmeras diferentes aplicações, as especificações requeridas pelos sistemas energéticos baseados em PaCOS são particularmente difíceis de alcançar, motivando ao longo dos anos numerosos projetos de desenvolvimento tecnológico [31 - 33, 48]. De fato, os sistemas PaCOS precisam de condições particulares de vazão e pressão (normalmente uma vazão relativamente alta com respeito à pressão), além de requerer um baixo custo e uma elevada eficiência energética do componente (para maximizar a eficiência global do sistema de geração). Como consequência, de maneira geral é impossível empregar componentes comerciais projetados para outras aplicações. Ao mesmo tempo, no projeto de um dispositivo fabricado em laboratório a escolha da tecnologia empregada e o dimensionamento do soprador devem ser particularmente acurados para garantir o cumprimento dos requisitos estabelecidos.

### **2.3.2. Regulagem da temperatura**

Como já mencionado, nos sistemas PaCOS é importante que os fluxos entrantes no empilhamento sejam caracterizados por uma temperatura não muito inferior àquela do próprio empilhamento. Dessa forma, é oportuno incluir também na linha do oxidante algum componente capaz de aquecer o gás antes de alimentá-lo às pilhas, tais como:

resistências elétricas, queimadores de combustível ou, mais frequentemente, trocadores de calor que transferem calor dos fluxos que saem do empilhamento para aqueles que entram no mesmo. O emprego de trocadores de calor garante a maior eficiência global do sistema, dado que o oxidante é aquecido aproveitando o conteúdo energético residual dos gases de exaustão, sem consumir energia adicional. As características dos trocadores de calor utilizáveis em sistemas PaCOS são discutidas na seção 2.5.

#### **2.4. LINHA DE EXAUSTÃO DOS GASES**

É composta pelos componentes necessários para descarregar na atmosfera os gases de exaustão que saem do empilhamento, depois de tratamento apropriado, realizado para evitar que representem poluição. Além das tubulações onde passam as correntes de gás, essa parte do sistema compreende usualmente um pós-combustor, ou seja, uma câmara de combustão onde os compostos combustíveis não reagidos no empilhamento combinam-se com o oxidante, queimando. De fato, usualmente entre 20 e 30 % do combustível introduzido na PaCOS não é oxidado nos anodos [47]. Sendo assim, o pós-combustor representa uma solução conveniente para aproveitar o conteúdo energético do combustível não reagido, evitando ao mesmo tempo introduzir na atmosfera compostos poluidores ou tóxicos (como hidrocarbonetos não queimados e CO). Outros componentes que normalmente fazem parte dessa linha são os trocadores de calor utilizados para o aquecimento de combustível e oxidante e para a recuperação do conteúdo energético residual dos gases na saída do sistema, logo antes de serem emitidos para a atmosfera. Os detalhes desses trocadores de calor são analisados na seção 2.5.

#### **2.5. SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO TÉRMICO**

Esse subsistema compreende todos os dispositivos empregados para elevar a temperatura do sistema ao nível de operação e para equilibrar o balanço térmico, mantendo a temperatura do empilhamento e dos outros componentes do gerador ao nível de projeto. A colocação dos vários equipamentos no esquema do sistema depende de muitos fatores e é um dos pontos chave para obter uma geração eficiente e confiável.

Outro elemento importante para assegurar o equilíbrio térmico do sistema é o isolamento térmico. De fato, as elevadas temperaturas que caracterizam a operação dos empilhamentos PaCOS fazem com que a redução das perdas de calor seja difícil de alcançar. Como consequência, na construção dos sistemas PaCOS a escolha do material isolante e o seu posicionamento no sistema são pontos importantes para obter uma boa eficiência de geração.

### **2.5.1. Aquecedor de inicialização**

Atualmente, as pilhas a combustível de óxido sólido comercialmente disponíveis podem gerar corrente elétrica exclusivamente se a temperatura do eletrólito se situa acima de 600 °C [1]. A principal fonte de calor utilizada para manter as PaCOS em elevada temperatura de operação é representada pelo calor produzido nas reações eletroquímicas. Todavia, quando o empilhamento está frio, essa fonte é indisponível e não pode ser utilizada para aquecer o sistema da temperatura ambiente até a temperatura de operação. Como consequência, na fase de inicialização do sistema é preciso prever um dispositivo auxiliar que possa aumentar a temperatura da pilha a combustível e da parte quente do sistema (trocadores de calor e tubulações de alimentação de combustível e oxidante), até o nível de operação. Uma vez alcançado esse nível, a temperatura desejada será mantida utilizando o calor produzido pela reação eletroquímica de oxidação do combustível. Existem duas alternativas de aplicação mais imediata para operar o aquecimento inicial:

- resistências elétricas, opção que apresenta vantagens, como a rapidez do aquecimento e a facilidade de integração, operação e controle. Todavia, essa solução requer o emprego de energia elétrica, uma forma de energia de elevada qualidade, produzida utilizando outras fontes de energia primária (no caso do microgerador, a energia química do mesmo combustível que alimenta o sistema), em conversores caracterizados por um rendimento limitado. Empregar esse tipo de energia prejudica o rendimento global do sistema de geração. Além disso, na aplicação objeto dessa pesquisa a eletricidade seria fornecida pelo banco de baterias, causando complicações na estratégia de gerenciamento do sistema devido ao alto consumo elétrico das resistências;
- combustor auxiliar, onde acontece a queima de parte do combustível que constitui a fonte de energia primária do sistema, enviando em seguida os gases de combustão aos componentes que necessitam de aquecimento. As vantagens e desvantagens

dessa solução são contrárias ao caso das resistências elétricas. A fonte de energia utilizada não é obtida através de outras conversões prévias, e é a mesma empregada no funcionamento de regime do sistema, o que garante uma maior eficiência do sistema. Por outro lado, o aquecimento do sistema é normalmente mais lento e o dispositivo de aquecimento é mais complexo de construir, instalar e controlar.

### **2.5.2. Preaquecimento de combustível e oxidante**

Como mencionado nas seções 2.2 e 2.3, é oportuno elevar a temperatura dos fluxos de combustível e oxidante antes de alimentá-los ao empilhamento. O método mais comum para fazer isso é empregando trocadores de calor, nos quais acontece a transferência de calor dos gases quentes que saem do pós-combustor (ou do empilhamento, no caso em que o pós-combustor não seja utilizado) aos gases frios, antes deles entrarem nas pilhas (ou no reator de processamento químico, quando presente). As características ideais que esses trocadores de calor devem possuir são: elevada eficiência de troca térmica (que comporta o uso de tecnologias de alto desempenho como a dos trocadores de calor de placas e a espessura reduzida das paredes metálicas), baixa perda de pressão entre entrada e saída, dimensão compacta e capacidade de trabalhar com elevada temperatura (até 900 °C em alguns casos) sem vazamentos entre os dois lados do trocador [33]. O compromisso entre eficiência, perda de pressão e dimensão do trocador é obtido em fase de projeto dependendo dos requisitos do integrador do sistema. A elevada temperatura de operação e a composição típica dos gases em um sistema PaCOS impõem o uso de aços especiais e de técnicas de junção adequadas. Analisando as características das várias técnicas de junção, as únicas aplicáveis são a solda e a brasagem. A técnica escolhida deve prever o uso de ligas de solda compatíveis com os fluidos presentes e que não emitam grandes quantidades de produtos de oxidação nas condições de trabalho.

### **2.5.3. Recuperação do calor de descarte**

Os gases na saída do sistema, logo antes de ser emitidos na atmosfera, ainda podem ter um conteúdo energético interessante, em forma de calor sensível e/ou latente. Em algumas aplicações, pode então ser interessante recuperar essa energia, utilizando um trocador de calor, denominado recuperador de calor de descarte, para absorver o calor dos gases de exaustão [47]. Em muitos casos, o fluido que absorve o fluxo térmico é água, mas pode ser outro fluido adequado. Usualmente, esse trocador de calor trabalha

em temperatura menor com respeito aos outros, sendo o último elemento da linha de exaustão dos gases. Como consequência, a fabricação do recuperador é mais simples e não requer que os materiais resistam a temperaturas elevadas.

## **2.6. SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO ELÉTRICO**

O conjunto de equipamentos que compõem esse subsistema é responsável pela coleta, o armazenamento e a transferência às cargas da energia elétrica produzida pelo empilhamento, depois de adequado condicionamento. Entre os equipamentos usualmente empregados destacam-se os dispositivos de eletrônica de potência, que empregam componentes eletrônicos para a conversão da potência elétrica.

### **2.6.1. Conversor CC/CC**

Uma importante tarefa desempenhada pelo subsistema de gerenciamento elétrico é a regulação do nível de tensão na saída do empilhamento, para compatibilizá-lo com o nível de tensão requerido pelos outros equipamentos interligados ao subsistema, gerenciando ao mesmo tempo o fluxo de potência que sai do empilhamento. Isso é necessário porque a tensão gerada pelo empilhamento tem valores muito diferentes nas condições de circuito aberto (nenhuma carga aplicada, tensão máxima) e de carga máxima (tensão mínima). Além disso, os outros componentes do subsistema podem trabalhar com diferentes níveis de tensão. Finalmente, é preciso evitar impor transientes de potência muito rápidos ao empilhamento. Tudo isso comporta a impossibilidade de ligar diretamente o empilhamento com os outros componentes e a necessidade de um sistema que possa receber como entrada a tensão do empilhamento, disponibilizando na saída a tensão apropriada. Além disso, esse sistema deve poder aplicar gradativamente a carga elétrica ao empilhamento, passando do estado de circuito aberto ao nível de carga máxima. Para esse papel é normalmente empregado um conversor eletrônico CC/CC. A tecnologia desses conversores desenvolveu-se muito nas últimas décadas e hoje em dia são empregados em vários campos. Para obter uma melhor eficiência, os conversores CC/CC são geralmente projetados especificadamente para a aplicação particular, tomando em conta os níveis de tensão de entrada e saída e a potência que precisa converter. Existem várias topologias construtivas de conversores CC/CC, com diferentes características [49 - 52].

### **2.6.2. Baterias para armazenamento de energia elétrica**

Em alguns sistemas de geração baseados em PaCOS, a pilha a combustível é associada a um banco de baterias, formando um sistema híbrido. Esse termo é empregado para evidenciar que o sistema utiliza em cada momento múltiplas fontes de energia (nesse caso, a PaCOS e as baterias) para o fornecimento de energia elétrica às cargas. A vantagem dessa solução é que o empilhamento pode funcionar com potência constante, enquanto o banco de baterias compensa as variações da carga elétrica, absorvendo ou produzindo potência elétrica dependendo da necessidade do momento. Desta forma, é possível reduzir os transientes de potência suportados pela PaCOS, prolongando a sua vida útil. De fato, a degradação das pilhas a combustível de óxido sólido foi relacionada com frequentes variações de suas condições de operação [15]. Outra função do banco de baterias é fornecer a energia necessária à inicialização do sistema, viabilizando a inicialização do mesmo sem que seja necessária uma conexão com a rede elétrica. De fato, os componentes do balanço de planta devem ser ligados, gerando as condições que as PaCOS precisam para funcionar, antes que o empilhamento possa iniciar a produção de potência. Uma vez que isso acontece, o sistema poderá utilizar parte da potência elétrica produzida para alimentar os componentes auxiliares, transmitindo o restante para as baterias e as cargas. As tecnologias disponíveis para o banco de baterias são muitas e com características muito diferentes. A escolha da tecnologia, da tensão de trabalho e da capacidade do banco depende das especificações do sistema de geração e do tipo de cargas a serem alimentadas.

### **2.6.3. Inversor**

Enquanto a maioria dos dispositivos elétricos comumente utilizados funciona com corrente alternada, as pilhas a combustível e as baterias para armazenamento de energia elétrica são dispositivos eletroquímicos que geram ou absorvem corrente elétrica contínua. Isso significa que, para alimentar as cargas conectadas ao sistema de geração, é necessário converter a corrente contínua em corrente alternada (conversão CC/CA). Normalmente, esse papel é desempenhado por um inversor, um dispositivo de eletrônica de potência capaz de transformar a corrente contínua em alternada [49, 50]. Nas últimas décadas foram obtidos grandes avanços na tecnologia dos inversores, que atualmente são utilizados em numerosas aplicações. Também nesse caso, como no do conversor CC/CC, o projeto próprio do dispositivo garante a melhor eficiência, sendo o mesmo adaptado aos níveis de tensão de entrada e saída e à potência convertida. Todavia, no

caso em que o sistema de geração funcione em paralelo à rede de distribuição de eletricidade convencional, trocando fluxos de energia, é preciso que o inversor incorporado ao sistema respeite vários critérios técnicos e normativos, que permitam também a devolução de energia à rede. Nesse caso, às vezes é preferível a aquisição de um componente comercial ao invés de projetar um dispositivo especial. De fato, satisfazer os requisitos necessários para conectar o inversor à rede não é trivial, requerendo um projeto acurado e complexo, que pode inviabilizar a realização de um inversor específico para o sistema. Ao contrário, os inversores comerciais já são dotados de todas as características e certificações necessárias, apesar de não serem completamente aptos à integração no sistema, que às vezes requer pequenas adaptações para a ligação com o inversor.

## **2.7. SUBSISTEMA DE CONTROLE E SEGURANÇA**

Essa parte do sistema é encarregada de controlar o funcionamento do conjunto de dispositivos que compõem o balanço de planta, assegurando a geração eficiente e segura de energia. O subsistema compreende vários componentes: sensores (pressão, temperatura, tensão, corrente, composição de gás, ...), placas de aquisição e geração de sinais analógicos e digitais, controladores programáveis, atuadores. Os dispositivos *hardware* são geralmente componentes convencionais utilizados em automação industrial e de laboratório. Pelo contrário, o *software* de gerenciamento do sistema é programado em cada caso dependendo das características específicas do sistema.



## **3. METODOLOGIA DE PESQUISA**

Nesse capítulo são apresentadas as metodologias experimentais que foram utilizadas no âmbito da tese. Utilizando os dados recolhidos na pesquisa bibliográfica foi formulado um modelo matemático simplificado do sistema, que permitiu avaliar os parâmetros operacionais ótimos e a melhor topologia construtiva. Os dados obtidos através da simulação do sistema foram empregados para definir a estrutura e as especificações do protótipo, realizando o projeto básico do balanço de planta, focando na determinação dos dispositivos necessários e na interconexão entre eles. A pesquisa continuou com a fase de aquisição, construção e teste dos componentes do BdP do sistema. Os componentes necessários foram procurados no mercado; nos casos em que não foi possível encontrar dispositivos comerciais de características adequadas, foram projetados e fabricados componentes no próprio laboratório ou com o apoio de empresas externas à universidade. Todos os dispositivos foram caracterizados em um amplo intervalo de condições operacionais, com particular atenção aos pontos de funcionamento previstos na fase de projeto do sistema, verificando que o funcionamento na prática permita o uso no protótipo. Na fase final do projeto, os componentes selecionados e construídos foram interconectados entre eles através de ligações elétricas e mecânicas para formar o protótipo completo, incluindo todos os sensores e atuadores necessários ao funcionamento e ao teste do sistema. O protótipo resultante foi testado no ponto de operação escolhido para verificar a capacidade de gerar eletricidade e verificar o desempenho do sistema.

### **3.1. MODELAMENTO MATEMÁTICO**

A primeira etapa do projeto do protótipo foi a criação de um modelo matemático simplificado do sistema (excluindo nessa fase as baterias e a interface entre gerador e rede elétrica), baseando-se nos dados obtidos através de pesquisa bibliográfica (em particular as estruturas dos sistemas objeto das análises teóricas). Através desse modelo, foi possível simular o comportamento do protótipo com diferentes topologias

construtivas e parâmetros operacionais, determinando assim a estrutura e os parâmetros operacionais ótimos do sistema, para utilizar no prosseguimento do projeto [53].

Na literatura existente foram identificados vários modelos teóricos de sistemas de geração elétrica com PaCOS alimentadas com etanol [54 - 59] e estudos experimentais de pilhas a combustível unitárias com características adequadas à operação com etanol anidro [20, 38, 60, 61] ou hidratado [62 - 65]. Por outro lado, não foram identificados trabalhos focados em resultados experimentais da operação de empilhamentos comerciais ou laboratoriais com etanol como combustível (tanto puro quanto misturado com água). Por comparação com as estruturas descritas na literatura [55, 66] foi criada a lista dos principais componentes esperados para a construção do conjunto PaCOS-BdP. Esses componentes foram incluídos no modelo matemático do sistema. Foram consideradas diferentes variantes para a construção do sistema; os resultados fornecidos pelo modelo foram utilizados para escolher a mais adequada. Além disso, tais resultados poderão ser úteis à determinação do valor das variáveis operacionais do sistema. Alguns dos componentes elencados (indicados como “opcionais”) não estão presentes em todas as variantes consideradas:

- bomba de etanol, utilizada para alimentar o combustível ao sistema;
- tanque de etanol;
- bomba d'água (opcional), pode ser empregada para alimentar a água necessária a fim de impedir a formação e deposição de carbono sólido nas tubulações do sistema e na PaCOS;
- tanque de água (opcional);
- soprador, utilizado para criar a vazão de ar necessária às reações do empilhamento;
- pós-combustor, onde acontece a queima do combustível em excesso, não reagido na PaCOS e não recirculado para a mesma;
- trocadores de calor de preaquecimento do combustível e do ar;
- ejetores de recirculação (opcionais), utilizados para promover a recirculação parcial dos gases de saída do anodo e do catodo, para retornar às entradas dos respectivos compartimentos do empilhamento. Os fluxos de combustível e ar, enviados utilizando bomba e soprador, transferem parte da quantidade de movimento deles à vazão de gases de saída do anodo ou do catodo, gerando uma recirculação parcial desses gases de saída para reentrar na PaCOS;

- sistema de eletrônica de potência, que condiciona adequadamente a potência elétrica produzida pela pilha;
- recuperador de calor, um trocador que utiliza o conteúdo energético residual dos gases de saída para aquecer uma vazão de água.

A Figura 6 apresenta a estrutura do sistema; os índices numéricos reportados são utilizados na descrição do modelo para indicar os diversos pontos do sistema. As tubulações opcionais são representadas com linha tracejada.

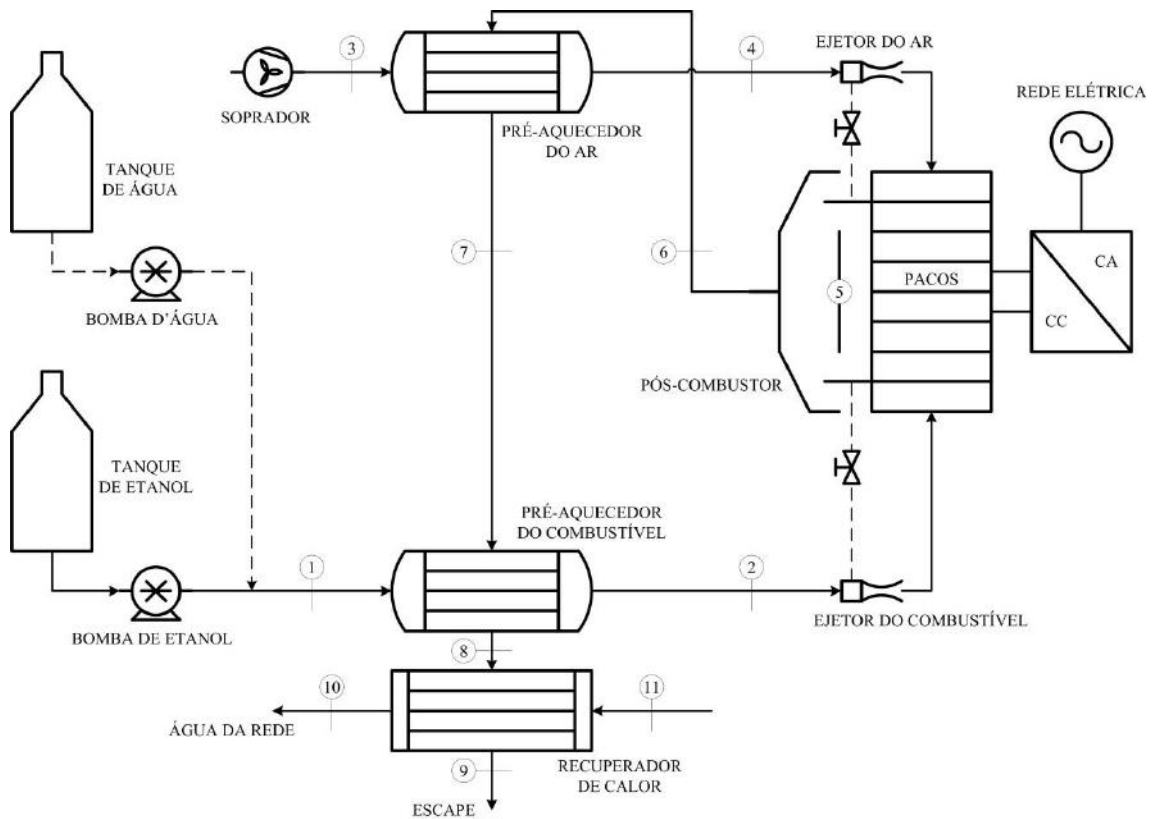


Figura 6 - Esquema de princípio do conjunto PaCOS-BdP modelado [53].

Nesse projeto, o empilhamento modelado tem a finalidade de geração de energia elétrica funcionando com potência constante, tendo em conta que as flutuações de potência requeridas pela carga serão absorvidas por um banco de baterias, não incluído no modelo. Como consequência, o modelo descreve apenas o funcionamento em regime estacionário da PaCOS e de seu BdP. Isso resulta em uma formulação mais simples de aplicação mais imediata.

### 3.1.1. Modelo matemático da PaCOS

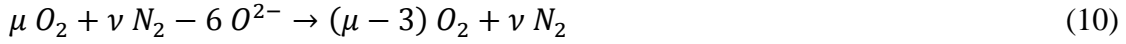
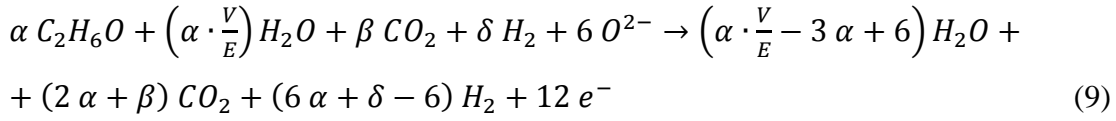
O sistema de geração de energia elétrica é a PaCOS; um dispositivo eletroquímico capaz de converter a energia química do etanol alimentado diretamente em energia elétrica. Antes de chegar em contato com os anodos da PaCOS, o etanol decompõe-se em outros compostos através de diferentes reações a que se submete previamente à possível ocorrência de oxidação direta no anodo. Como resultado, há produção de hidrogênio, água, monóxido e dióxido de carbono. Os elementos que participam das reações eletroquímicas são então essencialmente monóxido de carbono e hidrogênio no anodo (reações (1) e (2)), e oxigênio no catodo, (reação (8)):



Nesse modelo é suposto que todo o etanol é convertido em CO e H<sub>2</sub> na pilha a combustível ou nas tubulações de alimentação dos gases, antes de chegar aos sítios ativos onde acontecem as reações eletroquímicas. Como mencionado no capítulo 2, existem diferentes estratégias para obter esse resultado em um sistema real. O presente projeto é focado na pesquisa de soluções que não envolvam a utilização da reforma externa, razão pela qual essa opção não foi incluída na modelagem. As opções da reforma interna e da utilização direta do combustível foram, por sua vez, consideradas.

O presente modelo é limitado ao funcionamento do sistema em regime permanente. Nessa situação, o anodo da PaCOS também contém água no caso da utilização direta do etanol. Para simplificar, o modelo foi então aplicado apenas com combinações dos parâmetros operacionais que garantem que a quantidade de vapor no empilhamento é suficiente para converter todo o etanol através da reação (4). Além disso, de acordo com a literatura [21] a reação (3) acontece aproximadamente quatro vezes mais rapidamente que a reação (2) nas condições de operação consideradas. No modelo, a reação de deslocamento do vapor d'água é considerada como o único mecanismo que consome o monóxido de carbono (a oxidação eletroquímica não é considerada). O resultado global das reações (1) - (4) e (8) é a conversão do etanol em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> com subsequente oxidação eletroquímica do hidrogênio. O modelo é construído supondo que as reações (1) - (4) e (8) aconteçam ao mesmo tempo e que todo carbono proveniente do etanol reage formando dióxido de carbono. É então possível escrever reações globais, que consideram também a possibilidade de recirculação parcial dos produtos da reação entre as saídas e as entradas anódica e catódica. As expressões foram derivadas aplicando as reações (3) e (4) sobre todo o etanol alimentado, enquanto as reações (1), (2) e a (8)

convertem apenas a quantidade de hidrogênio que podem combinar-se com os íons de oxigênio transferidos. A base de cálculo utilizada para escrever as reações anódica (9) e catódica (10) considera o uso de seis íons de oxigênio dentre aqueles transferidos desde o catodo até o anodo através do eletrólito:



onde  $V/E$  é a razão entre o número de moles de vapor d'água e de etanol que entram no empilhamento.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\mu$  e  $\nu$  são respectivamente os coeficientes estequiométricos de etanol, dióxido de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Para calcular esses coeficientes foi utilizado o balanço dos elétrons disponíveis introduzidos na entrada anódica, equação (11):

$$12\alpha + 2\delta = 12\lambda_{C_2H_6O} \quad (11)$$

onde  $\lambda_{C_2H_6O}$  indica a razão entre a quantidade de combustível alimentada e a quantidade mínima necessária para completar a reação com os íons de oxigênio (quantidade estequiométrica). A razão  $\lambda_{C_2H_6O}$  é o inverso da taxa de utilização do combustível, outro parâmetro muito utilizado nesse âmbito. A equação (12) utilizada para o cálculo dos coeficientes é escrita considerando que a fração de recirculação anódica  $f_{rec,A}$ , definida como a razão entre a quantidade de uma espécie química que entra no anodo como resultado da recirculação e a quantidade da mesma espécie que sai do anodo, é a mesma para todas as espécies que não são introduzidas do exterior:

$$f_{rec,A} = \delta / (6\alpha + \delta - 6) = \beta / (2\alpha + \beta) = \alpha \cdot \frac{V}{E} \cdot (1 - f_{H_2O,ext}) / \left(\alpha \cdot \frac{V}{E} - 3\alpha + 6\right) \quad (12)$$

Isso não é válido para as espécies que são introduzidas do exterior (etanol, água, oxigênio e nitrogênio), dado que nesse caso está presente também o fluxo externo no balanço de massa. Para fixar também os valores relativos a essas espécies, são utilizados dois parâmetros de projeto adicionais, a fração de água introduzida do exterior  $f_{H_2O,ext}$  e a fração de recirculação catódica  $f_{rec,C}$ , definida analogamente a  $f_{rec,A}$  de acordo com a equação (13):

$$f_{rec,C} = (1 - f_{O_2,ext}) \cdot \mu / (\mu - 3) \quad (13)$$

Na expressão de  $f_{rec,C}$  aparece também a fração de oxigênio introduzido do exterior, definida na equação (14) como razão entre o fluxo molar de oxigênio introduzido no empilhamento do exterior ( $\dot{n}_{O_2,A}$ ) e o fluxo molar de oxigênio total que entra nos compartimentos catódicos ( $\dot{n}_{O_2,C}$ ):

$$f_{O_2,ext} = \dot{n}_{O_2,A}/\dot{n}_{O_2,C} = 1 - f_{rec,C} \cdot (\mu - 3)/\mu \quad (14)$$

É possível também introduzir o parâmetro  $\lambda_{O_2}$ , análogo a  $\lambda_{C_2H_6O}$ , razão entre a quantidade de oxigênio alimentado e a quantidade estequiométrica. Da reação (10) é possível deduzir a equação (15), expressão de  $\lambda_{O_2}$ :

$$\lambda_{O_2} = \mu/3 \quad (15)$$

Além disso, é aceita a hipótese de que o fluido catódico seja ar (e que, então, cada mol de oxigênio introduzido comporta aproximadamente 3,76 mols de nitrogênio). Na equação (16), os coeficientes de (9) e (10) fornecem as frações molares de todas as espécies químicas na saída da pilha, onde  $x_i$  e  $x_j$  são os coeficientes estequiométricos das espécies  $i$  e  $j$ , e a soma é estendida a todas as espécies do fluxo considerado:

$$y_i = x_i / (\sum_j x_j) \quad (16)$$

Uma vez estabelecida a estequiometria das reações, foi utilizada a equação de Nernst (17) para definir o potencial teórico de circuito aberto (ou seja, na situação de corrente  $I$  igual a 0) de cada pilha unitária do módulo:

$$V_p^{I=0} = - \left\{ \Delta G^0 + R \cdot T_{PaC} \cdot \ln \left[ y_{H_2O} / \left( y_{H_2} \cdot y_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) \right] \right\} / (N_e^- \cdot F) \quad (17)$$

Para a descrição de cada termo faça-se referência à literatura sobre pilhas a combustível [1]. No funcionamento sob carga, essa tensão máxima é reduzida devido às perdas ôhmicas e de ativação, como resulta da equação (18) (as perdas de concentração são desprezadas por supor que o empilhamento trabalha longe das condições de corrente máxima):

$$V_p = V_p^{I=0} - i \cdot R_p - a_T - b_T \cdot \ln(i) \quad (18)$$

onde  $V_p$  é a tensão da pilha unitária,  $i$  a densidade de corrente em  $A/cm^2$ ,  $R_p$  a resistência ôhmica da pilha,  $a_T$  e  $b_T$  constantes relacionadas às perdas de ativação (constantes de Tafel).  $R_p$ ,  $a_T$  e  $b_T$  são calculadas em função da temperatura, utilizando expressões empíricas indicadas na literatura para o caso de uma PaCOS típica [21].

Indicando com  $N_p$  e  $A_p$  o número de pilhas do módulo e a área ativa de cada pilha, a potência elétrica produzida pela PaCOS pode ser expressada como na equação (19):

$$P_{PaC} = V \cdot I = N_p \cdot V_p \cdot i \cdot A_p \quad (19)$$

$V_p$  e  $i$  são calculadas fixando  $N_p$ ,  $A_p$  e  $P_{PaC}$  como dados de projeto.

A vazão molar de etanol requerida para o funcionamento é relacionada com a corrente total  $I$  (produto da densidade de corrente com a área ativa da pilha) utilizando a equação (20), obtida do balanço eletrônico (equação (11)) e das relações entre os coeficientes estequiométricos da reação (9):

$$\dot{n}_{C_2H_6O,2} = I \cdot N_p \cdot \alpha / (12 \cdot F) \quad (20)$$

As vazões dos outros compostos na entrada e na saída do empilhamento são calculadas de acordo com a estequiometria das reações (9) e (10), utilizando a equação (21):

$$\dot{n}_{i,k} = \dot{n}_{C_2H_6O,2} \cdot x_{i,k} / x_{C_2H_6O} = \dot{n}_{C_2H_6O,2} \cdot x_{i,k} / \alpha \quad (21)$$

onde  $x_{C_2H_6O}$  é o coeficiente estequiométrico do etanol (igual a  $\alpha$ ) e  $x_{i,k}$  o coeficiente estequiométrico da espécie química  $i$  na posição  $k$  do sistema (entrada ou saída do empilhamento), relacionado à vazão molar  $\dot{n}_{i,k}$ . Analogamente à equação (20), é possível calcular a vazão molar de oxigênio introduzida no empilhamento do exterior com a equação (22):

$$\dot{n}_{O_2,4} = I \cdot N_p \cdot [\lambda_{O_2} - f_{rec,C} \cdot (\lambda_{O_2} - 1)] / (4 \cdot F) \quad (22)$$

Tomando em conta a definição de  $f_{O_2,ext}$  expressa pela equação (14), o fluxo molar de nitrogênio que entra no empilhamento do exterior é dado pela equação (23):

$$\dot{n}_{N_2,4} = 3,76 \cdot \dot{n}_{O_2,4} = 3,76 \cdot f_{O_2,ext} \cdot \dot{n}_{O_2,C} \quad (23)$$

A energia química por segundo do fluxo de combustível introduzido na PaCOS resulta da equação (24):

$$PQ = -\Delta h_{C_2H_6O} \cdot \dot{n}_{C_2H_6O,2} \quad (24)$$

onde  $\Delta h_{C_2H_6O}$  é a entalpia de combustão do etanol. A eficiência elétrica do empilhamento é calculada de acordo com a equação (25):

$$\eta_{PaC} = P_{PaC} / PQ \quad (25)$$

Como evidenciado anteriormente, no empilhamento, cada mol de etanol reage com vapor d'água segundo as reações (3) e (4), e parte do hidrogênio produzido participa na reação (1); é preciso incluir no modelo também os efeitos dessas reações sobre o balanço térmico da PaCOS. Introduzindo a entalpia de combustão do H<sub>2</sub> ( $\Delta h_{H_2}$ ), a variação de entalpia relativa às reações de reforma a vapor e de deslocamento do vapor d'água ( $\Delta h_{rv}$  e  $\Delta h_{dv}$ ), e a potência térmica absorvida por convecção dos gases que circulam na pilha  $Q_{conv}$ , é possível obter a potência térmica produzida (ou requerida) do empilhamento aplicando o balanço de energia da equação (26):

$$\begin{aligned}
 Q_{PaC} &= \\
 &= -\Delta h_{C_2H_6O} \cdot \dot{n}_{C_2H_6O,2} + \Delta h_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2,5} - P_{PaC} - (\Delta h_{rv} + \Delta h_{dv}) \cdot \dot{n}_{C_2H_6O,2} - Q_{conv}
 \end{aligned} \tag{26}$$

onde  $\dot{n}_{H_2,5}$  é a vazão de hidrogênio na saída da PaCOS. Indicando com  $Q_2$  e  $Q_4$  as potências térmicas associadas aos fluxos de gases na entrada do anodo e do catodo, a soma das potências térmicas associadas às vazões nas saídas do anodo e do catodo é dada pela equação (27):

$$Q_5 = Q_2 + Q_4 + Q_{conv} \tag{27}$$

Uma estimativa dos coeficientes de transferência térmica por convecção nos canais das pilhas [67] evidencia que a troca térmica é suficientemente eficiente para aumentar a temperatura de saída dos gases ao mesmo nível dos componentes sólidos do empilhamento. A temperatura de entrada é um parâmetro do projeto. Sendo conhecidas todas as vazões molares, é possível calcular os fluxos de calor com a equação (28):

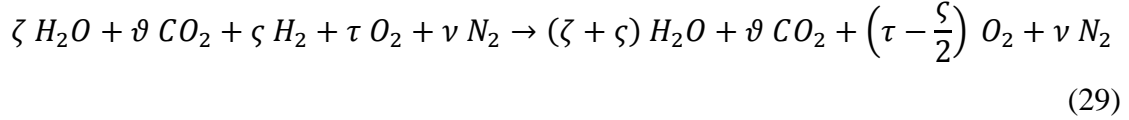
$$Q_k = T_k \cdot \sum_j [c_{p,j}(T_k) \cdot \dot{n}_{j,k}] \tag{28}$$

onde  $k$  indica a posição, e o somatório é estendido a todas as espécies químicas presentes;  $c_{p,j}(T_k)$  indica o calor específico molar a pressão constante da espécie  $j$  à temperatura  $T_k$ .

### 3.1.2. Modelo matemático do pós-combustor

Para aumentar o conteúdo energético dos gases que saem da PaCOS e evitar que compostos nocivos, como o CO sejam emitidos no ambiente, foi prevista a utilização de um pós-combustor. Esse componente, localizado depois do empilhamento, queima os gases inflamáveis residuais, de acordo com a reação (29):





onde  $\zeta$ ,  $\vartheta$ ,  $\varsigma$ ,  $\tau$ , e  $\varphi$  são os coeficientes estequiométricos dos reagentes. Para a elaboração da reação (29) foi admitida a hipótese de que o oxigênio alimentado à PaCOS seja suficiente para sustentar a reação eletroquímica e queimar completamente a parcela do combustível não reagido. Utilizando os coeficientes estequiométricos e o conhecimento da composição do fluxo entrante, podem-se calcular as vazões molares das espécies químicas que saem do pós-combustor. A vazão molar total dos gases de saída é a soma dessas vazões. Dado que a potência  $Q_{PaC}$  pode assumir valor negativo (o que significa que a PaCOS requer um fluxo térmico para manter-se em equilíbrio térmico), se supõe que o pós-combustor esteja em contato térmico direto com o empilhamento, trocando com este o fluxo de calor  $Q_{PaC}$ . Assim sendo, a temperatura interna da PaCOS é considerada a mesma para cada condição simulada. Indicando com  $Q_6$  e  $Q_{d,PC}$  a potência térmica dos gases na saída do pós combustor e a potência térmica perdida para o exterior, é possível escrever o balanço de energia da equação (30):

$$Q_6 = Q_5 - \Delta h_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2,5} - Q_{d,PC} + Q_{PaC} \quad (30)$$

que permite o cálculo da temperatura dos gases de saída  $T_6$  utilizando a equação (28).

### 3.1.3. Modelo matemático do soprador e das bombas

A potência consumida pelas bombas utilizadas para o combustível e (eventualmente) a água pode ser expressa como função da vazão molar do fluido, da variação de entalpia específica molar entre a entrada e saída da bomba do fluido  $i$ ,  $\Delta h_{B,i}$ , e do rendimento isentrópico da máquina  $\eta_{B,i}$ . Alternativamente, é possível representar a mesma grandeza utilizando a vazão volumétrica  $\dot{V}_i$  e a variação de pressão  $\Delta p_{B,i}$  entre entrada e saída da bomba do fluido  $i$  (a variação da temperatura no caso das bombas é desprezível). A potência consumida pelas bombas resulta então da equação (31):

$$\begin{aligned} P_B &= (\dot{n}_{C_2H_6O} \cdot \Delta h_{B,C_2H_6O} / \eta_{B,C_2H_6O}) + (\dot{n}_{H_2O} \cdot \Delta h_{B,H_2O} / \eta_{B,H_2O}) = \\ &= (\dot{V}_{C_2H_6O} \cdot \Delta p_{B,C_2H_6O} / \eta_{B,C_2H_6O}) + (\dot{V}_{H_2O} \cdot \Delta p_{B,H_2O} / \eta_{B,H_2O}) \end{aligned} \quad (31)$$

Uma fórmula análoga pode ser desenvolvida para a potência consumida pelo soprador do ar [17]. Para um processo de compressão isentrópica, é possível expressar a temperatura do fluxo na saída do soprador como na equação (32):

$$T_{S,isenrópica} = T_{amb} \cdot (p_S/p_{amb})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (32)$$

onde  $T_{amb}$  e  $p_{amb}$  são temperatura e pressão ambiente,  $p_S$  a pressão na saída do soprador e  $\gamma$  o coeficiente de expansão adiabática. A potência consumida pelo soprador é então fornecida pela equação (33):

$$P_S = \dot{n}_{ar} \cdot \Delta h_S / \eta_S = \dot{V}_{ar} \cdot c_{p,ar}(T_{amb}) \cdot T_{amb} \cdot \left[ (p_S/p_{amb})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] / \eta_S \quad (33)$$

onde  $\Delta h_S$  é a variação de entalpia específica molar entre entrada e saída do soprador e  $\eta_S$  é o rendimento isentrópico da máquina.

Para calcular as potências, os rendimentos isentrópicos das máquinas  $\eta_{B,i}$  e  $\eta_S$  foram considerados iguais a 0,7, e as perdas de pressão conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Perda de pressão nos componentes do sistema [21].

Componente do sistema	Queda de pressão [mbar]
Filtro de ar	10
Pré-aquecedores (lados quente e frio)	100
Pós-combustor	20
PaCOS (lado do combustível)	20
PaCOS (lado do gás oxidante)	30
Tubulações e cotovelos	5

### 3.1.4. Modelo matemático dos trocadores de calor

No sistema são considerados três trocadores de calor que recuperam parte do conteúdo energético dos gases de saída para pré-aquecer os fluidos que alimentam a PaCOS e aquecer a vazão de água. A cada trocador pode ser aplicado o balanço térmico da equação (34):

$$Q_{q,e} - Q_{q,s} + Q_{L,q} = Q_{f,s} - Q_{f,e} + Q_{d,TR} + Q_{L,f} \quad (34)$$

Na equação (34), os fluxos de calor relativos ao fluido quente e frio são indicados respectivamente com os subscritos  $q$  e  $f$ , enquanto os subscritos  $e$  e  $s$  indicam uma vazão que entra e sai do trocador.  $Q_{d,TR}$  é a potência perdida para o exterior, enquanto  $Q_{L,q}$  e  $Q_{L,f}$  são as potências térmicas latentes associada à condensação do fluido quente e à vaporização do fluido frio. Aplicando esse balanço junto com a equação (28), é possível calcular as temperaturas de entrada e saída dos três trocadores e a potência

térmica absorvida pela água fria no recuperador de calor, chamada potência térmica recuperada  $Q_{REC}$ . Essa é a potência térmica que o sistema disponibiliza para usuários externos. Conhecendo essa potência térmica define-se a eficiência térmica global do sistema com a equação (35):

$$\eta_t = Q_{REC}/PQ \quad (35)$$

A eficiência dos trocadores de calor pode ser expressa como a razão entre a potência térmica efetivamente transferida do fluido quente ao fluido frio e a potência máxima transferível teoricamente. Essa última quantidade corresponde ao calor que seria absorvido pelo fluido frio no caso em que a temperatura de saída do mesmo chegasse a ser igual à temperatura de entrada do fluido quente (na prática, essa situação nunca se verifica, sendo necessário por isso que a área de troca térmica seja infinita). A eficiência de troca térmica pode então ser calculada de acordo com a equação (36):

$$\varepsilon_{TR} = \dot{n}_f \cdot [T_{f,s} \cdot c_{p,f}(T_{f,s}) - T_{f,e} \cdot c_{p,f}(T_{f,e}) + q_{L,f}] / [T_{q,e} \cdot c_{p,f}(T_{q,e}) - T_{f,e} \cdot c_{p,f}(T_{f,e}) + q_{L,f}] \quad (36)$$

onde  $\dot{n}_f$  é a vazão molar do fluido frio e  $q_{L,f}$  o calor latente específico molar associado à vaporização desse fluido, que pode ser calculado dividindo  $Q_{L,f}$  por  $\dot{n}_f$ .

### 3.1.5. Modelo matemático da eletrônica de potência

A eficiência da eletrônica de potência  $\eta_{EP}$  foi considerada constante com a variação da carga, dado que a tensão e a corrente na entrada do conversor são constantes, e que a variação da eficiência entre 20 % e 100 % da potência máxima dos dispositivos CC/CC e CC/CA é tipicamente menor que 3 %. Como consequência, pode-se calcular a potência elétrica disponível depois da conversão subtraindo a potência consumida pelos dispositivos auxiliares à potência elétrica gerada na PaCOS e multiplicando o resultado pela eficiência da eletrônica de potência, como indicado na equação (37):

$$P = \eta_{EP} \cdot (P_{PaC} - P_S - P_B) = P_{PaC} - P_S - P_B - P_{EP} \quad (37)$$

Na equação (37),  $P_{EP}$  é a potência perdida no conversor CC/CC e no inversor. Utilizando o valor calculado de  $P_{el}$  pode-se calcular a eficiência elétrica global do sistema com a equação (38):

$$\eta_{el} = P/PQ \quad (38)$$

### **3.2. PESQUISA DE MERCADO E PROJETO DOS COMPONENTES**

Seguindo os resultados do modelamento matemático, foi definido o projeto básico do sistema e fixadas as especificações dos componentes do mesmo. Os equipamentos necessários foram procurados no mercado e adquiridos. No caso em que não fosse possível encontrar dispositivos comerciais adequados, foram projetados e construídos componentes específicos para a aplicação. Cuidou-se que todos os componentes, comerciais ou não, apresentassem a capacidade de funcionar em um amplo intervalo de condições, garantindo a possibilidade de seguir eventuais desvios do ponto de funcionamento de projeto.

#### **3.2.1. Empilhamento PaCOS**

O intuito inicial desse trabalho de tese era projetar o balanço de planta para um protótipo de empilhamento PaCOS específico para a utilização direta de etanol anidro, que ia ser produzido pelo Laboratório de Hidrogênio do PEMM/COPPE/UFRJ. De fato, os resultados da simulação sugeriram que a solução mais adequada para o projeto seria a operação com etanol puro (ver seção 5.1), viabilizada pelo anodo proprietário desenvolvido no Laboratório de Hidrogênio especificamente para evitar a deposição de carbono sólido no uso de etanol anidro em PaCOS [19]. Todavia, o desenvolvimento de um empilhamento empregando esse material, já testado em nível de pilha unitária com resultados satisfatórios [20], não está ainda concluído. Em paralelo a esse desenvolvimento decidiu-se então de adquirir empilhamentos comerciais, projetados para operar com hidrogênio e testá-los com uma mistura de etanol e água como combustível. Isso é teoricamente viável devido ao fato que o material dos anodos comerciais pode promover a reação de reforma internamente ao empilhamento [1]. O objetivo dos testes foi experimentar a operação prática de um empilhamento com etanol, preenchendo uma lacuna na literatura da área e obtendo informações sobre o projeto do balanço de planta necessário. Além disso, foram coletados dados para comparação com o empilhamento que será futuramente construído com o material anódico específico para operação com etanol puro. O balanço de planta desenvolvido constituirá a base para o sistema auxiliar do empilhamento do Laboratório de Hidrogênio. Seguindo essa lógica, foram procurados no mercado empilhamentos PaCOS com anodo convencional na faixa de potência desejada.

Foi possível encontrar e testar dois modelos de empilhamento comercial, inicialmente considerados potencialmente adequados à aplicação. O primeiro sistema testado, produzido pela *Almus AG*, é formado por quatro empilhamentos conectados em série, cada um composto por 16 pilhas quadradas de 25 cm<sup>2</sup> de área. O sistema possui também aquecedores elétricos integrados, para elevar a sua temperatura até o nível de operação. O segundo empilhamento que foi adquirido é o *SOFCCMan NIMTE-A-Stack-301*, de fabricação chinesa, formado por uma série de 30 pilhas de 100 cm<sup>2</sup> de área. Foram adquiridas duas unidades desse modelo, para permitir uma campanha de teste mais exaustiva.

### **3.2.2. Área de alta temperatura**

Um cuidado particular foi dedicado ao projeto mecânico da área de alta temperatura do sistema, que apresentou vários desafios, relacionados principalmente com a elevada temperatura (que impõe o uso de materiais adequados e isolamento térmico suficiente) e a necessidade de manter algumas partes isoladas eletricamente. Os objetivos principais do projeto foram manter o empilhamento nas condições de operação requeridas, permitindo ao mesmo tempo uma boa integração térmica e elétrica no sistema. O projeto dessa parte do protótipo foi efetuado após os testes de laboratório dos empilhamentos comerciais, de maneira a considerar os dados obtidos no decorrer desses testes. Foram também consideradas as características mecânicas e elétricas de todos os materiais selecionados. Por sua vez, a configuração escolhida no projeto influenciou a determinação das características de outros componentes, principalmente os trocadores de calor.

Para evitar um processo demorado e complexo de tentativa e erro na montagem do sistema, essa parte do projeto foi inicialmente abordada utilizando o *software* de desenho tridimensional *SolidWork 2013*. Através desse *software* foi possível visualizar e modificar virtualmente a alocação das peças, verificando continuamente a viabilidade da montagem do sistema e a satisfação das necessidades de projeto. Uma vez obtido um resultado satisfatório no *software*, as peças necessárias foram fabricadas de acordo com o desenho e montadas utilizando a infraestrutura do Laboratório de Hidrogênio.

### **3.2.3. Bombas e soprador**

Tendo em vista os intervalos de vazão e pressão calculados nas simulações efetuadas, foi possível encontrar no mercado modelos de bombas d'água e de etanol e do soprador

do ar adequados à aplicação pretendida. Os componentes selecionados possuem a possibilidade de regular a vazão gerada através de um sinal de controle, permitindo assim acompanhar eventuais desvios dos valores simulados no funcionamento final do protótipo. O modelo de bomba adquirido para alimentar o empilhamento com fluxos de etanol e água foi a microbomba peristáltica *KNF FEM 1.02* com amortecedor de pulsações *FPD06*. Relativamente ao soprador de ar, foram testados em bancada dois modelos diferentes, o *Vairex VRB2 2 48VCC* e o *Hi-Blow FC-8040*. O primeiro é um soprador rotativo de duplo estágio, enquanto o segundo é um soprador alternativo a membrana.

### 3.2.4. Trocadores de calor

Para alimentar o empilhamento PaCOS com etanol e água é necessário vaporiza-los. Além disso, é preciso pré-aquecer o fluxo de ar introduzido, para evitar um resfriamento excessivo do empilhamento. No projeto objeto dessa tese, tanto a vaporização de etanol e água quanto o preaquecimento do ar são realizados através de trocadores de calor, que aquecem os fluxos que entram no sistema aproveitando o calor residual dos fluxos que saem, garantindo uma maior eficiência do sistema. Não foi possível identificar modelos comerciais com características adequadas à aplicação, devido principalmente às vazões reduzidas, da ordem dos mililitros, e dos vínculos dimensionais (o espaço disponível pela instalação dos componentes na proximidade do empilhamento não supera os 2000 cm<sup>2</sup>). Como consequência, foram projetados trocadores de calor específicos para o protótipo.

Os trocadores de calor projetados são do tipo casco/tubo. No caso do trocador de preaquecimento do ar, foi empregada a configuração contracorrente (fluxos quente e frio paralelos, mas entrando por lados opostos do trocador), que garante uma maior eficiência de troca térmica. Já os evaporadores foram projetados com fluxos cruzados (fluxos perpendiculares), com o objetivo de manter o fluxo do fluido vaporizado em direção vertical, o que dificulta a saída do trocador de fluido ainda em estado líquido. Para o dimensionamento, foi utilizado o método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica *DTML* [68], variável definida na equação (39):

$$DTML = (\Delta T_a - \Delta T_b) / [\ln(\Delta T_a) - \ln(\Delta T_b)] \quad (39)$$

onde  $\Delta T_a$  e  $\Delta T_b$  são as diferenças de temperatura entre os dois fluidos nas duas extremidades do trocador de calor. A  $DTML$  é relacionada com a área de troca térmica, de acordo com a equação (40):

$$A_{TR} = Q_f / (U_D \cdot DTML) \quad (40)$$

onde  $Q_f$  indica a potência térmica absorvida pelo fluido frio e  $U_D$  o coeficiente global de troca térmica, obtido através da equação (41):

$$U_D = \{R_f + (e_{t,x}/k_{t,x}) + [(h_i + h_e)/(h_i \cdot h_e)]\}^{-1} \quad (41)$$

A razão entre a espessura de parede e a condutividade térmica do tubo  $x$ , respectivamente  $e_{t,x}$  e  $k_{t,x}$ , representa a resistência térmica do tubo. O fator de fuligem  $R_f$  introduz uma resistência adicional à passagem de calor, devido à formação de incrustações nas paredes do trocador de calor. Tabelas fornecem o valor de  $R_f$  em função dos fluidos e do material do trocador de calor [68]. Os coeficientes de troca térmica  $h$ , por sua vez, são calculados a partir dos números adimensionais de Reynolds, Prandtl e Nusselt. Na faixa de valores de número de Reynolds calculada pela aplicação, os coeficientes de troca térmica sem troca de fase do lado interno e externo dos tubos são dados pela equação (42):

$$h_{i,e} = (Nu \cdot k/d_h)_{i,e} \quad (42)$$

onde  $Nu$  é o número de Nusselt,  $k$  é a condutividade térmica do fluido e  $d_h$  o diâmetro hidráulico do duto. No caso de evaporação do fluido, o coeficiente de troca térmica é função do número de ebulição  $Bo$  e do coeficiente de troca térmica do líquido  $h_l$ , também calculado com a equação (42) [69]. Entre as numerosas correlações empíricas existentes na literatura, foi empregada a equação (43), devido à simplicidade da aplicação e ao pequeno número de parâmetros envolvidos no cálculo:

$$h = h_l \cdot [4,3 + 0,4 \cdot (Bo \cdot 10^4)^{1,3}] \quad (43)$$

Para utilizar as equações expostas no cálculo dos trocadores, foram necessários dados relativos aos fluidos (obtidos através da simulação do sistema e do projeto e teste dos outros componentes) e ao material utilizado para a construção dos trocadores (selecionado de acordo com as condições de trabalho requisitadas, disponibilidade no mercado e possibilidade de ser usinado de acordo com o projeto). O projeto dos trocadores de calor foi também realizado em conjunto com o projeto mecânico da área de alta temperatura do sistema, considerando as dimensões e o posicionamento dos

trocadores no sistema e de forma a permitir uma fácil integração dos mesmos com os outros componentes.

### 3.2.5. Aquecedor de inicialização

Sendo o objetivo primário do sistema a geração de eletricidade com elevada eficiência, optou-se por utilizar um combustor para o aquecimento inicial do sistema, solução que garante um melhor desempenho energético global do sistema. Além disso, a estratégia de gerenciamento do sistema prevê o funcionamento da pilha a combustível em potência constante, minimizando o número dos transientes de aquecimento e resfriamento: como consequência, a relativa lentidão do aquecimento através da circulação de gases quentes não adquire uma importância muito relevante.

Uma vez escolhida a opção do combustor, foram definidas as vazões de ar e etanol de projeto. No intuito de manter o regime de funcionamento do soprador de ar similar entre a inicialização do sistema e a operação de regime, a vazão de ar foi fixada igual à vazão estimada para a produção elétrica da pilha a combustível. Dessa forma garante-se que o soprador esteja adequado a todas as fases de funcionamento do sistema. A vazão de etanol foi calculada fixando o valor do parâmetro  $\lambda_{comb}$ , relação entre razão etanol/ar estequiométrica e razão etanol/ar empregada, de acordo com a equação (44):

$$\lambda_{comb} = (\dot{n}_{C_2H_6O,comb} / \dot{n}_{ar,comb})_{estequiométrica} / (\dot{n}_{C_2H_6O,comb} / \dot{n}_{ar,comb})_{real} \quad (44)$$

onde todas as vazões indicadas são relacionadas com o combustor. O valor de  $\lambda_{comb}$  de projeto foi fixado igual a 1,5 para garantir um excesso de ar suficiente à combustão completa do etanol no combustor de inicialização.

Em seguida, realizou-se uma pesquisa de mercado a fim de encontrar um sistema de combustão adequado à aplicação. Devido às vazões estimadas serem pequenas (vazão de etanol menor de 10 ml/min e vazão de ar menor de 50 NI/min), não foi possível encontrar um equipamento comercial que pudesse funcionar nas condições requeridas. Consequentemente, foi projetada uma câmara específica.

A primeira parte desenvolvida foi o sistema de injeção e nebulização do etanol, necessário à obtenção de uma queima completa e estável do combustível. Para reduzir o tempo de realização, foram empregados componentes comerciais, projetados para outras finalidades e adaptados à situação, utilizando um sistema de projeto baseado em



experimentos empíricos. Foram testadas várias opções sequencialmente, até alcançar uma solução satisfatória.

Subsequentemente foi projetada e construída uma câmara de combustão de dimensões adequadas a manter uma combustão estável da mistura ar-etanol gerada pelo injetor, conter a chama e canalizar os gases quentes resultantes da combustão. Devido ao tamanho reduzido e ao uso de etanol como combustível, na literatura existem poucos modelos teóricos aplicáveis ao projeto do combustor. O componente foi então desenvolvido empiricamente, a partir de um primeiro dimensionamento de tentativa realizado aplicando relações estabelecidas para o projeto de câmaras de combustão para turbinas a gás convencionais [70], validadas também no caso de etanol como combustível [71]. De acordo com a literatura, a área do tubo de chama  $A_{tc}$  (área da câmara onde acontece a combustão) é dada pela equação (45):

$$A_{tc} = 0,7 \cdot A_{ref} \quad (45)$$

onde a área de referência  $A_{ref}$  é obtida através da equação (46):

$$\theta = p_{comb}^{1,75} \cdot (\sqrt{4 \cdot A_{ref}/\pi})^{0,75} \cdot e^{\frac{T_{comb}}{b}} \cdot A_{ref}/\dot{m}_{ar,comb} \quad (46)$$

$p_{comb}$ ,  $T_{comb}$ , e  $\dot{m}_{ar,comb}$  são respectivamente pressão, temperatura e vazão mássica do ar que entra na câmara, enquanto o fator de correção de temperatura  $b$  e o parâmetro de correlação  $\theta$  são dependentes da razão de equivalência (inverso do parâmetro  $\lambda_{comb}$  indicado na equação 45) e da eficiência de combustão  $\eta_{comb}$  [70]. Uma vez determinado o valor da área de referência, é possível encontrar o diâmetro da área do tubo de chama  $d_{tc}$  com a equação (47):

$$A_{tc} = \pi \cdot d_{tc}^2 / 4 \quad (47)$$

através do qual é possível calcular os comprimentos das zonas de combustão primária  $l_{zp}$ , secundária  $l_{zs}$  e de diluição  $l_{zd}$ , fornecendo o valor do comprimento total da zona de combustão  $l_{zc}$  de acordo com a equação (48):

$$l_{zc} = l_{zp} + l_{zs} + l_{zd} = 0,75 \cdot d_{tc} + 0,5 \cdot d_{tc} + 1,8 \cdot d_{tc} \quad (48)$$

Aplicando o balanço térmico da equação (49) sobre o combustor, pode-se calcular a temperatura máxima teórica dos gases de saída  $T_{comb,max}$ , que é a temperatura que assumiriam os gases na saída do combustor na situação de queima perfeita (toda a vazão

do combustível é completamente oxidada,  $\eta_{comb} = 100 \%$ ) e combustor adiabático (nenhuma perda de calor para o meio externo):

$$T_{comb,max} \cdot [\sum_j c_{p,j}(T_{comb,max}) \cdot \dot{n}_{j,comb,s}] = \dot{n}_{C_2H_6O,comb} \cdot [T_{comb} \cdot c_{p,C_2H_6O}(T_{comb}) - \Delta h_{C_2H_6O} - q_{L,C_2H_6O}] + \dot{n}_{ar,comb} \cdot T_{comb} \cdot c_{p,ar}(T_{comb}) \quad (49)$$

Na equação aparecem os calores específicos a pressão constante (à temperatura  $T$  indicada entre parêntese)  $c_p$  e as vazões molares  $\dot{n}$  dos gases de saída, do etanol e do ar. O somatório na primeira parte da equação (49) estende-se a todas as espécies químicas presentes no fluxo de gás na saída da câmara.  $q_{L,C_2H_6O}$  é a energia necessária para vaporizar um mol de etanol. Assume-se que ar e etanol líquido entram na câmara de combustão em equilíbrio térmico e perfeitamente misturados, na temperatura  $T_{comb}$ . A  $T_{comb,max}$  calculada deve ser bem acima do valor mínimo desejado para a temperatura dos gases de saída  $T_{comb,min}$ , fixado como dado de projeto. Isso é necessário para garantir uma temperatura de saída dos gases suficiente também nas condições reais de operação, caracterizadas por combustão imperfeita e presença de perdas de calor para o exterior. A temperatura de saída real dos gases de combustão dependerá, de fato, da eficiência da queima que será possível obter na prática e do nível de isolamento térmico do dispositivo.

Os dados obtidos de acordo com as equações (45) - (49) foram utilizados para a construção de um primeiro exemplar da câmara de combustão, sucessivamente modificado para obter uma combustão satisfatória nas condições requeridas. No caso do projeto, antes da zona de combustão propriamente dita foi também necessário prever uma parte dedicada à vaporização do etanol nebulizado e à homogeneização da mistura combustível/ar. O comprimento necessário da área de vaporização foi determinado experimentalmente, operando a nebulização do etanol no interior de uma tubulação, cuja extremidade livre estava conectada com a câmara de combustão. A tubulação foi progressivamente reduzida de comprimento, aproximando o ponto de completa vaporização do etanol com o começo da câmara de combustão. O local de completa vaporização do etanol foi avaliado medindo a temperatura da parede da tubulação. O calor absorvido pela vaporização do líquido reduz essa temperatura, até o ponto onde o etanol está completamente vaporizado. O comprimento ótimo da área de vaporização foi determinado localizando esse ponto no começo da área de combustão.

### 3.2.6. Conversor CC/CC

Como explicado na seção 2.6, a eletrônica de potência necessária ao funcionamento do sistema consta de duas partes principais: um conversor CC/CC, que compatibiliza o nível de tensão da pilha a combustível com o do banco de baterias e um inversor CC/CA, que transforma a corrente contínua que sai das baterias em corrente alternada. No caso do conversor CC/CC, não foi possível encontrar no mercado um modelo capaz de fornecer o intervalo de tensão requerido pelo banco de baterias (aproximadamente 19-28  $V_{CC}$ , intervalo relacionado a uma tensão nominal de 24  $V_{CC}$ , valor escolhida pelas razões indicadas no item 4.2.5) aceitando na entrada a tensão gerada pela pilha a combustível, que pode ser tanto maior quanto menor o nível de tensão das baterias, dependendo do ponto de funcionamento do empilhamento. Conseqüentemente, foi necessário projetar um conversor CC/CC específico para a aplicação desejada. Considerando a literatura sobre o assunto [49 - 52, 72] foram selecionadas duas topologias capazes de trabalhar com tensão de entrada do conversor maior ou menor que a tensão de saída: a topologia *buck-boost* e um conversor duplo estágio, indicado nesse texto como conversor *boost+buck*. As duas opções foram analisadas teoricamente, pressupondo em ambos os casos que o conversor funcione em regime de condução contínua, situação que permite um controle mais simples do dispositivo.

#### → *Buck-boost*

Esse tipo de conversor é capaz, com um número relativamente reduzido de componentes, de amplificar ou reduzir a tensão de entrada. O esquema do conversor é representado na Figura 7.

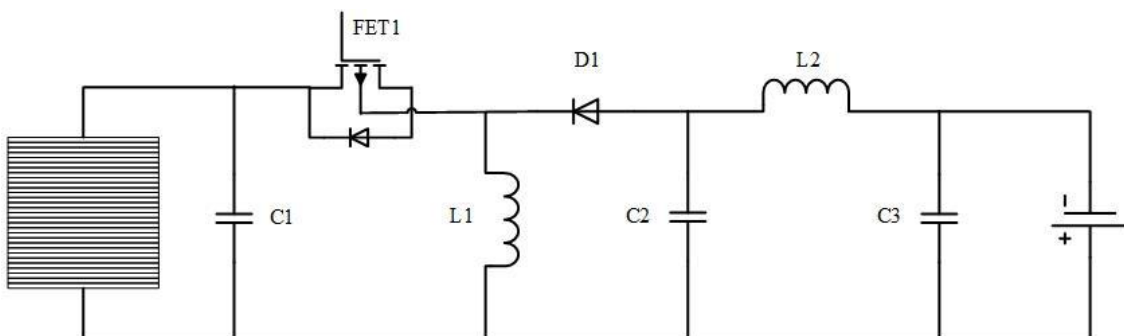


Figura 7 - Esquema do conversor CC/CC *buck-boost*.

Em condução contínua, o ciclo de trabalho  $D$  desse tipo de conversor, ou seja, a razão entre o tempo para o qual a chave FET1 está fechada ( $t_{on}$ ) e o tempo total do ciclo de chaveamento ( $t_{ciclo}$ ), é ligado com as tensões médias de entrada e saída,  $V_e$  e  $V_s$ , através da equação (50):

$$D = t_{on}/t_{ciclo} = t_{on} \cdot f_c = V_s/(V_e + V_s) \quad (50)$$

onde  $f_c$  é a frequência de chaveamento do conversor. O projeto do conversor foi realizado de acordo com os métodos estabelecidos na literatura [72], que consideram todos os componentes como ideais, sem perdas. Isso significa que as potências de entrada e saída são iguais à potência de projeto do conversor  $P_{CC/CC}$ ; dividindo-a por  $V_e$  e  $V_s$ , é possível calcular as correntes médias de entrada e saída,  $I_e$  e  $I_s$ . A corrente circulante no indutor  $LI$  (de indutância  $L_{L1}$ ) é dada pela soma de  $I_e$  e  $I_s$ . A oscilação de corrente  $\Delta I$  é fornecida pela equação (51):

$$\Delta I = (V_e \cdot D)/(L_{L1} \cdot f_c) \quad (51)$$

Os valores de pico de corrente são calculados adicionando a metade do valor de  $\Delta i$  aos valores médios de corrente. Definindo  $\Delta V$  como a oscilação máxima permitida da tensão de entrada e saída do conversor, a capacitância de  $C1$  e  $C2$  pode ser calculada através da equação (52):

$$C_{C1} = C_{C2} = (I_s \cdot D)/(\Delta V \cdot f_c) \quad (52)$$

O valor de indutância de  $LI$  foi fixado tomando em conta a viabilidade da realização prática de um indutor de dimensões reduzidas, enquanto  $f_c$  foi escolhido de acordo com as características dos modelos de FET disponíveis no mercado. Os valores máximos de corrente e tensão para o diodo, o indutor e o capacitor, assim como a capacitância desse último, foram obtidos aplicando as equações (50) - (52) aos casos limites de funcionamento do conversor ( $V_e = (V_{e,min}, V_{e,max})$  e  $V_s = (V_{s,min}, V_{s,max})$ ) e escolhendo os valores mais altos resultantes. Esses valores foram utilizados para a escolha dos componentes comerciais que seriam empregados na realização prática de um protótipo do conversor.

#### → **Conversor duplo estágio *boost+buck***

Esse conversor é constituído de um estágio *boost interleaved* e um estágio *buck* conectados em série. O estágio *interleaved* é caracterizado pela presença de dois braços

iguais em paralelo, cujas chaves nunca são acionadas ao mesmo tempo (cada uma fica aberta em toda a metade do ciclo de trabalho, enquanto a outra pode estar fechada). Em teoria, isso reduz as oscilações de corrente e tensão suportadas pela pilha a combustível [52]. O esquema do conversor *boost+buck* é representado na Figura 8.

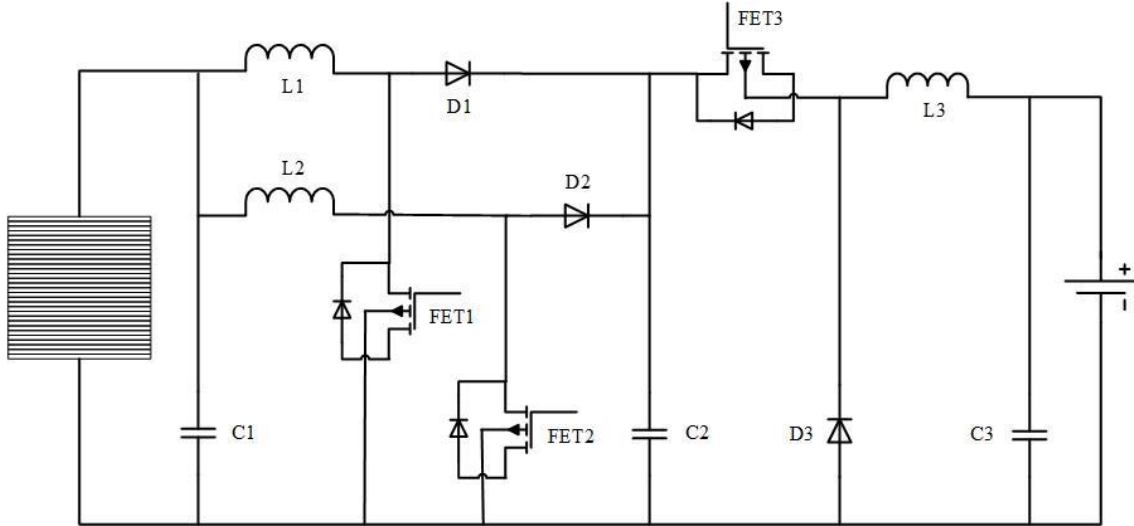


Figura 8 - Esquema do conversor CC/CC *boost+buck*.

Os valores de  $P_{CC/CC}$ ,  $f_c$ ,  $V_{e,min}$ ,  $V_{e,max}$ ,  $V_{s,min}$ ,  $V_{s,max}$ ,  $\Delta V$  e  $L_{L1} = L_{L2} = L_{L3}$  foram escolhidos iguais ao caso do conversor *buck-boost*. O cálculo das características dos componentes do estágio *buck* foi efetuado em sequência ao do estágio *boost*, utilizando como dados de entrada os resultados do primeiro. Em condução contínua, o ciclo de trabalho do estágio *boost* calcula-se com a equação (53):

$$D_{boost} = 1 - (V_e/V_{s,boost}) \quad (53)$$

onde  $V_{s,boost}$  é a tensão de saída do estágio *boost interleaved*. Nesse caso, a corrente média  $I_{L,boost}$  circulante em cada indutor do estágio *boost* é dada pela equação (54):

$$I_{L,boost} = I_e/2 = P_{CC/CC}/(2 \cdot V_e) \quad (54)$$

enquanto a corrente média que passa pelos diodos é relacionada com a corrente de saída do estágio *boost interleaved*  $I_{s,boost}$  através da equação (55):

$$I_{D,boost} = I_{s,boost}/2 = P_{CC/CC}/(2 \cdot V_{s,boost}) \quad (55)$$

A oscilação de corrente superposta aos valores médios e os valores de pico das correntes são obtidos de forma análoga ao caso do conversor *buck-boost*.

O valor da capacitância de  $C1$  e  $C2$  é dado pela equação (56):

$$C_{C1} = C_{C2} = I_{D,boost} \cdot D_{boost} / (\Delta V \cdot f_c) \quad (56)$$

Analogamente ao caso *buck-boost*, os valores máximos de corrente e tensão para os diodos, os indutores e os capacitores são calculados aplicando as equações (53) - (56) com os valores limite de funcionamento do conversor CC/CC ( $V_e = (V_{e,min}, V_{e,max})$  e  $V_s = (V_{s,min}, V_{s,max})$ ) e escolhendo os valores mais altos resultantes.

Para o estágio *buck*, o ciclo de trabalho é dado pela equação (57):

$$D_{buck} = V_s / V_{s,boost} \quad (57)$$

O valor médio da corrente na entrada no *buck* é igual ao valor médio da corrente na saída do *boost*, enquanto a corrente média no indutor resulta da equação (58):

$$I_{L,buck} = I_s = P_{CC/CC} / (2 \cdot V_s) \quad (58)$$

No diodo circula a corrente média fornecida pela equação (59):

$$I_{D,buck} = I_s - I_e = [P_{CC/CC} / (2 \cdot V_s)] - I_{s,boost} \quad (59)$$

Nesse estágio, a oscilação de corrente é dada pela equação (60):

$$\Delta I_{buck} = V_s \cdot (1 - D_{buck}) / (L_{L3} \cdot f_c) \quad (60)$$

Os valores de pico das correntes são de novo obtidos somando-se aos valores médios a metade do valor de  $\Delta I$ . O valor da capacitância de  $C3$  é calculado com a equação (61):

$$C_{C3} = \Delta I_{buck} / (\Delta V \cdot f_c) \quad (61)$$

Mais uma vez, os valores máximos de corrente e tensão para o diodo, o indutor e o capacitor foram escolhidos considerando os valores máximos calculados nos casos limites de funcionamento do conversor ( $V_e = (V_{e,min}, V_{e,max})$  e  $V_s = (V_{s,min}, V_{s,max})$ ).

Os resultados dos cálculos teóricos foram validados com simulações computacionais das duas topologias de conversor CC/CC, efetuadas com o *software Matlab-Simulink*, que permitiram também estimar o funcionamento dos dois conversores com componentes reais, considerando as perdas ôhmicas. Uma vez decidida a topologia mais conveniente, o projeto detalhado e a realização prática do componente foram feitas em colaboração com a empresa *Tracel Veículos Elétricos*, parceira do Laboratório de Hidrogênio em vários projetos e especializada em projeto e construção de dispositivos de eletrônica de potência.

### 3.2.7. Inversor

O inversor CC/CA é necessário para alimentar cargas elétricas convencionais em corrente alternada e fornecer à rede a energia em excesso produzida pela PaCOS. A tipologia de inversor que foi procurada no mercado possui uma conexão em corrente contínua com o banco de baterias e uma conexão em corrente alternada com a rede e com as cargas alimentadas pelo microcogerador. Outra característica requerida foi a capacidade de funcionar tanto absorvendo energia da rede quanto fornecendo energia à mesma (inversor bidirecional), como também em ausência da rede (situação de sistema isolado). A potência máxima de saída do equipamento procurado foi de pelo menos 500 W, valor que foi fixado como objetivo de potência útil gerada pelo protótipo objeto dessa tese (as motivações dessa escolha estão relatadas no item 3.2.8 e na seção 4.1).

Hoje em dia esse tipo de equipamento é bastante comum, graças à difusão de pequenas instalações de geração distribuída renovável. Existem vários modelos comerciais de inversores CC/CA adequados à aplicação objeto dessa tese. A pesquisa de mercado concentrou-se em inversores bidirecionais projetados para funcionar conectados a um banco de baterias carregado por outra fonte de energia (na maior parte dos casos, uma pequena instalação solar ou eólica; nesse projeto, a pilha a combustível). Foi possível adquirir um modelo comercial, que foi testado para verificar que o funcionamento fosse adequado às necessidades do projeto.

Entre os vários modelos comerciais de inversores CC/CA adequados à aplicação objeto dessa tese, foi adquirido para a montagem do protótipo o *MultiPlus Compact 24/2000/50 120V* da *Victron Energy*. O inversor escolhido possui uma conexão em corrente contínua com o banco de baterias e duas conexões em corrente alternada, uma para as cargas (monodirecional) e uma para a rede (bidirecional). Quando as baterias estão sendo carregadas por uma fonte de corrente contínua e o inversor não tem cargas em corrente alternada conectadas à saída monodirecional, as baterias vão eventualmente alcançar um estado de carga próximo ao valor máximo admitido pelo *software* de controle do inversor. Nessa situação, o inversor retira potência das baterias, enviando-a à rede no intuito de manter a tensão das mesmas ao nível configurado pelo usuário. O nível de potência retirado é escolhido autonomamente pelo controle do inversor. Nessa situação, apenas a saída bidirecional do inversor está funcionando. O inversor pode também fornecer potência às cargas conectadas à saída monodirecional, tanto em presença da rede quanto na ausência da mesma. Nesse segundo caso, a energia necessária é retirada das baterias. Além disso, o *MultiPlus Compact* pode também

operar como carregador de baterias, mas essa funcionalidade não será utilizada no protótipo: sendo as baterias utilizadas unicamente para suprir os picos de potência absorvida pelas cargas e não como reserva de energia, a única forma de recarregá-las deve ser com a pilha a combustível.

### **3.2.8. Banco de baterias**

Existem inúmeros modelos de baterias no mercado, caracterizados por diferentes tecnologias, níveis de tensão e capacidade de armazenamento de carga. A tensão das baterias foi fixada a um valor comum na indústria, para permitir a alimentação direta da maior parte dos equipamentos que compõem o BdP, e quanto mais próxima possível ao nível de tensão de trabalho da PaCOS.

A capacidade do banco de baterias foi dimensionada de acordo com a aplicação prospectada para o protótipo, ou seja, o fornecimento de energia a uma habitação brasileira individual de consumo médio-alto. Entre os pressupostos do projeto foi fixada a potência útil produzida pelo sistema, 500 W, considerada igual à potência média consumida pela habitação. A capacidade mínima do banco de baterias foi calculada de forma tal que o banco fosse capaz, em qualquer momento, de fornecer ou absorver a diferença de potência entre a produção do protótipo e a absorção das cargas, concluindo o ciclo de 24 horas no mesmo estado de carga do começo do dia. Nessa maneira é garantida a possibilidade de funcionamento contínuo também em condições de sistema isolado, ou seja, na ausência da rede.

Para efetuar o dimensionamento do banco de baterias foi considerado um perfil de carga, ou seja, uma curva que associa a cada hora do dia a média da potência elétrica consumida durante a mesma hora pelo conjunto de cargas presentes na habitação. O perfil utilizado foi calculado a partir da curva de carga de uma residência brasileira média relatada na pesquisa *Procel/Eletróbrás* sobre a posse e hábitos de uso dos equipamentos elétricos no setor residencial brasileiro [73]. O ano base dessa pesquisa é o 2005, mas não existem dados comparáveis mais recentes. Para obter um perfil de carga mais representativo da situação atual, foi adotada a hipótese que a forma da curva tenha se mantido constante, enquanto a média da potência consumida ao longo do dia tenha aumentado proporcionalmente ao aumento do consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro como um todo. Seguindo essa lógica, foi calculado o fator de atualização  $F_{at}$  de acordo com a equação (62), utilizando os dados mais recentes



disponíveis sobre o consumo de energia do setor residencial  $ER$  e o número de consumidores residenciais  $Nc$  no Brasil [10]:

$$F_{at} = (ER_{2016}/Nc_{2016})/(ER_{2005}/Nc_{2005}) \quad (62)$$

A atualização dos dados do ano 2005 foi então feita multiplicando o consumo horário da curva da pesquisa *Procel/Eletróbrás* por  $F_{at}$ . Claramente, a hipótese adotada introduz algum erro na estimativa do perfil de carga, dado que provavelmente nos anos mudaram também o tipo de eletrodomésticos presentes nos domicílios dos brasileiros e os hábitos de uso dos mesmos, fatores que influenciam a forma da curva de consumo. Todavia, a falta de dados recentes equivalentes aos da referência adotada obrigou a ignorar esse aspecto.

Outro problema que foi enfrentado no cálculo do perfil de carga foi a ausência na pesquisa *Procel/Eletróbrás* de curvas específicas por diferentes faixas de consumo de energia, sendo relatado apenas o perfil de carga relacionado com uma habitação média, obtido utilizando os valores médios para todos os consumidores do país. Foi então necessário modificar a curva de carga de forma que fosse obtido um valor médio de potência consumida ao longo do dia igual ao dado de projeto de 500 W. Para fazer isso, foi calculada a potência consumida média diária do perfil atualizado  $\bar{P}_{at}$ , e o fator de amplificação  $F_{amp}$  com a equação (63):

$$F_{amp} = 500/\bar{P}_{at} \quad (63)$$

O perfil de carga adotado foi então obtido multiplicando o nível de consumo de cada faixa horária por  $F_{amp}$ . Novamente, essa operação introduziu um erro no cálculo do perfil de carga, não sendo garantido que a forma da curva de consumo seja a mesma para diferentes níveis de consumo médio: pelo contrário, é provável que o tipo de dispositivos elétricos presentes na residência e a forma de utilizá-los dependa desse fator. Todavia, foi necessário empregar essa aproximação devido à falta de dados estatísticos sobre a relação entre a forma da curva de consumo e o consumo médio.

Uma vez definido o perfil de carga, foi obtida a potência média fornecida pelas baterias em cada hora  $h$ ,  $(\bar{P}_{bat})_h$ , subtraindo da potência média consumida pela carga residencial na mesma hora,  $(\bar{P}_{carga})_h$ , a potência produzida pela PaCOS, constante e igual a 500 W, como indicado na equação (64):

$$(\bar{P}_{bat})_h = (\bar{P}_{carga})_h - 500 = (\bar{P}_{carga})_h^{2005} \cdot F_{at} \cdot F_{amp} - 500 \quad (64)$$

A energia acumulada nas baterias ao final da hora  $h$ ,  $(E_{bat})_h$ , resulta da equação (65):

$$(E_{bat})_h = (E_{bat})_{h-1} - t_h \cdot (\bar{P}_{bat})_h \quad (65)$$

onde  $t_h$  é o intervalo de tempo sobre o qual é feita a média da potência, que nesse caso é igual a uma hora. Para efetuar o cálculo, a carga inicial  $(E_{bat})_0$  é considerada igual a 0. Sendo a potência consumida média diária igual à potência gerada, tem que ser respeitada a equação (66):

$$\sum_{h=1}^{24} (E_{bat})_h = 0 \quad (66)$$

A capacidade do banco de baterias  $\Delta E_{bat}$  (igual à quantidade de energia máxima que pode ser armazenada) deverá ser maior do que o valor de pico de carga armazenada nas baterias ao longo do dia,  $E_{bat,pico}$ . Em Ah, o valor de  $\Delta E_{bat}$  é dado pela inequação (67):

$$\Delta E_{bat} \geq E_{bat,pico}/V_{bat} = \{max[(E_{bat})_h]_{h=1}^{24}\}/V_{bat} \quad (67)$$

onde  $V_{bat}$  é a tensão nominal do banco de baterias.

### 3.2.9. Sistema de controle

O sistema de controle do protótipo foi montado a partir de componentes eletrônicos, sensores e atuadores comerciais. O componente *hardware* principal necessário é um microcontrolador programável, que desempenha o papel de interface entre o computador utilizado como interface homem/máquina e a instrumentação do sistema. O componente escolhido para desempenhar esse papel é o *CompactRIO* da *National Instruments*, um sistema modular e flexível equipado com *Field Programmable Gate Array* e controlador *real-time* que permite o gerenciamento de vários sinais de entrada e saída digitais e analógicos. Esse microcontrolador é capaz de rodar parte do código de controle do protótipo, garantindo velocidade de execução maior. O *software* de gerenciamento foi também programado, utilizando a linguagem *LabVIEW*, muito difundida em âmbito laboratorial devido à capacidade de criar a interface gráfica do programa junto ao código de funcionamento. Além disso, *LabVIEW* é desenvolvida pela mesma *National Instruments*, garantindo compatibilidade total com o *CompactRIO*.

O sistema final foi o resultado da soma de diferentes sistemas de controle e medição desenvolvidos separadamente para os testes dos componentes do protótipo. Para cada teste, foram selecionados e adquiridos todos os sensores requeridos para o monitoramento e a caracterização do equipamento testado, assim como os atuadores necessários ao controle do mesmo. As conexões desses dispositivos com as fontes de

alimentação e o microcontrolador foram efetuadas nas dependências do Laboratório de Hidrogênio. Em alguns casos foram necessários o projeto e a produção de pequenas placas eletrônicas, essenciais para permitir a interligação dos equipamentos. Foi também desenvolvido em cada caso o *software* de gerenciamento dos ensaios.

Uma vez concluída a fase de teste dos componentes, o conhecimento acumulado foi empregado para juntar sensores e atuadores adquiridos em um único sistema de controle e aquisição para o protótipo. Essa operação foi feita também para o *software*, permitindo criar o programa de gestão do sistema completo de forma mais rápida.

### **3.3. TESTES DOS COMPONENTES**

Esta seção apresenta a metodologia de teste dos componentes do sistema adquiridos ou projetados e construídos de acordo com os métodos expostos na seção 3.2. Os testes dos componentes comerciais tiveram o objetivo de obter informações sobre o funcionamento real dos mesmos e comprovar a aderência às especificações fornecidas pelos fabricantes. Os componentes construídos especificamente para o protótipo objeto dessa pesquisa foram operados na prática para verificar a compatibilidade com as condições de projeto e a adequação do desempenho às condições de trabalho pretendidas. Os equipamentos foram caracterizados no entorno do ponto de funcionamento de projeto, verificando a aplicabilidade no protótipo. Essa etapa compreendeu a montagem de bancadas de teste utilizando instrumentação de laboratório.

#### **3.3.1. Empilhamento PaCOS**

Como explicado no item 3.2.1, na ausência de um empilhamento específico para funcionar com etanol, o balanço de planta foi desenvolvido de acordo com as necessidades de um empilhamento comercial, projetado para funcionar com hidrogênio. Antes da montagem no protótipo, os modelos de empilhamento adquiridos foram testados em bancada, com o intuito de caracterizar completamente o funcionamento deles, verificar a possibilidade de utiliza-los no protótipo e identificar o ponto de funcionamento ótimo. Na Figura 9 e na Figura 10 estão representados, respectivamente, um esquema da bancada de teste e do sistema de controle da mesma. A Figura 11 apresenta imagens da bancada de teste na montagem real.

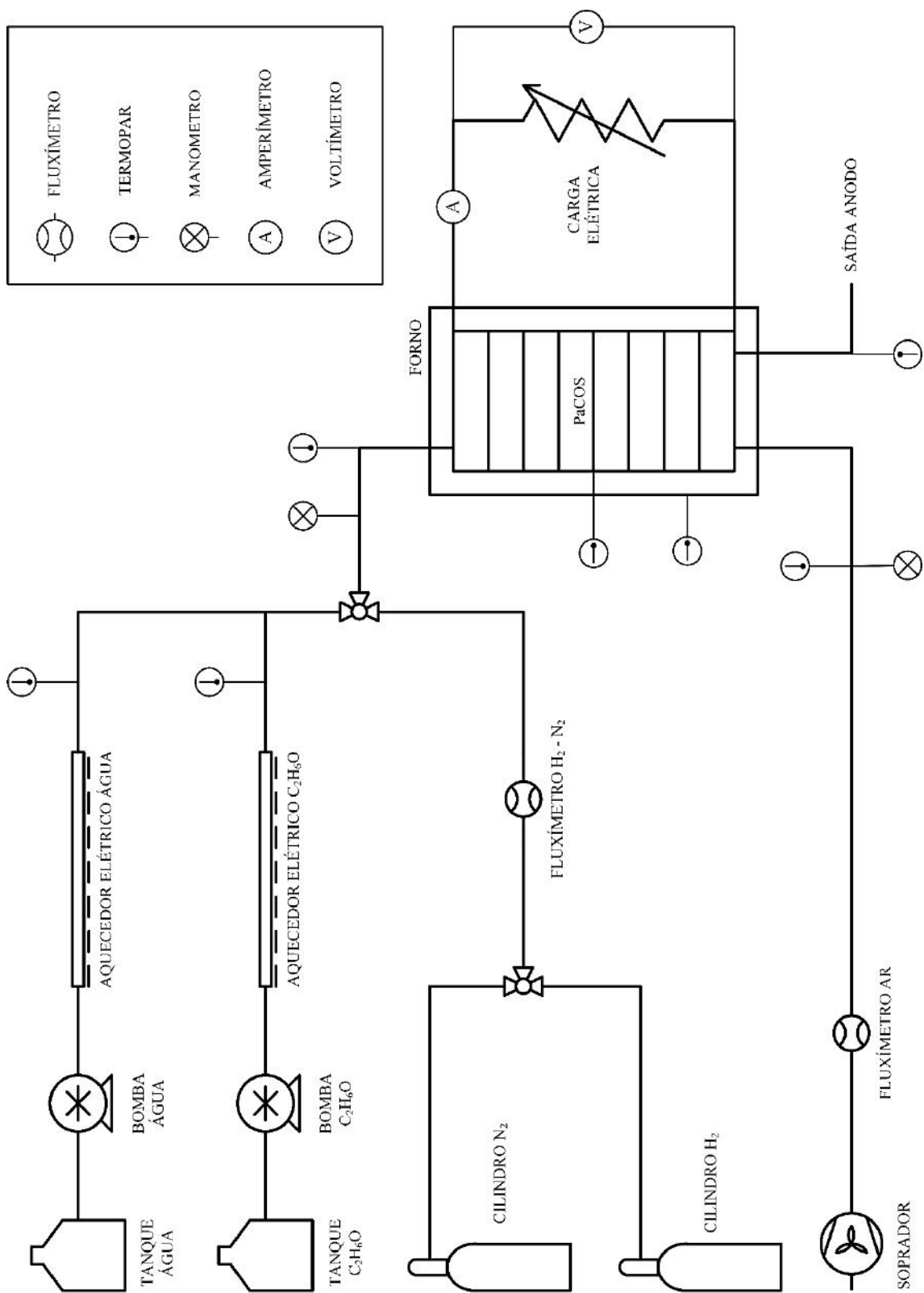


Figura 9 - Esquema da bancada de testes para empilhamentos PaCOS.

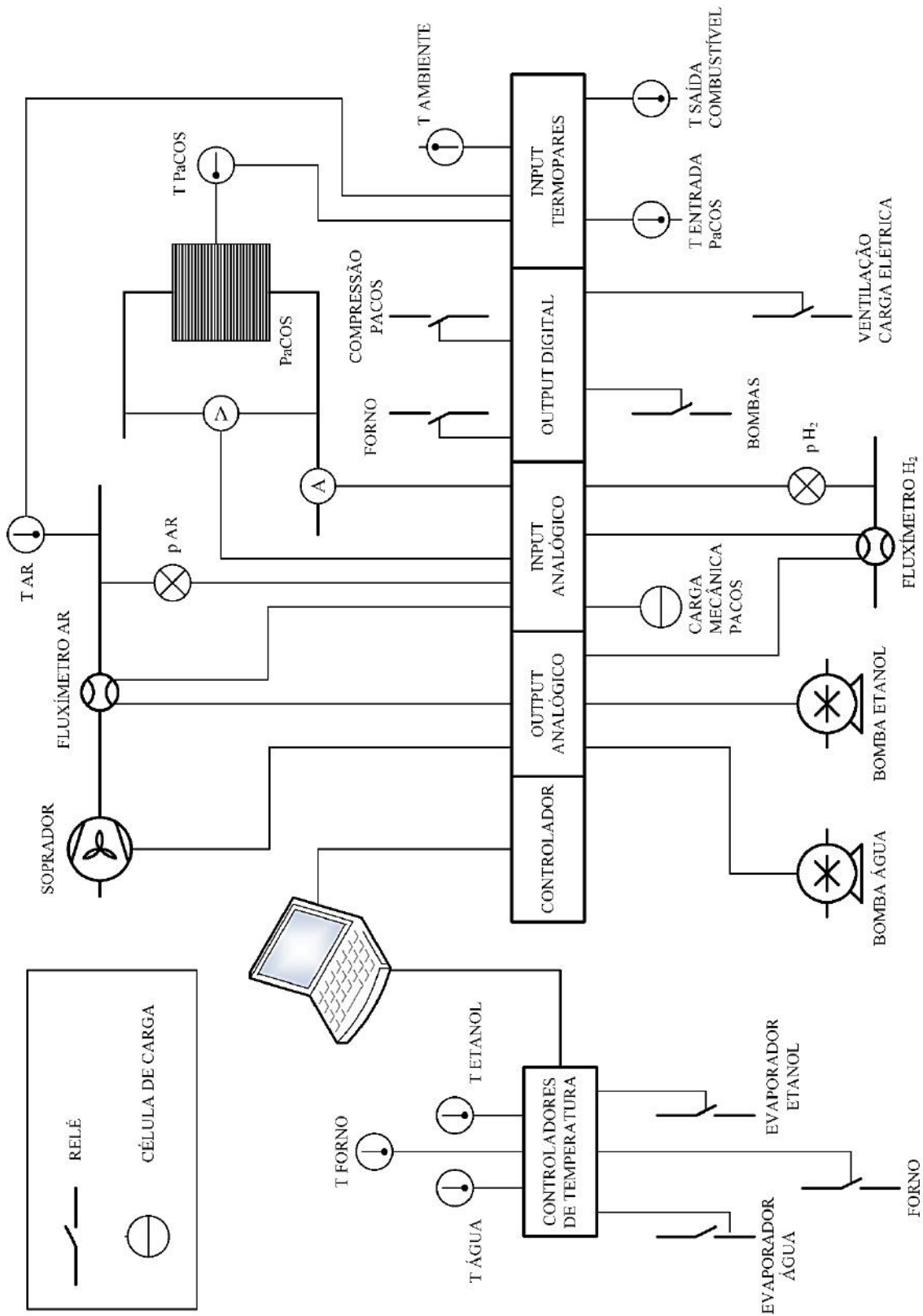
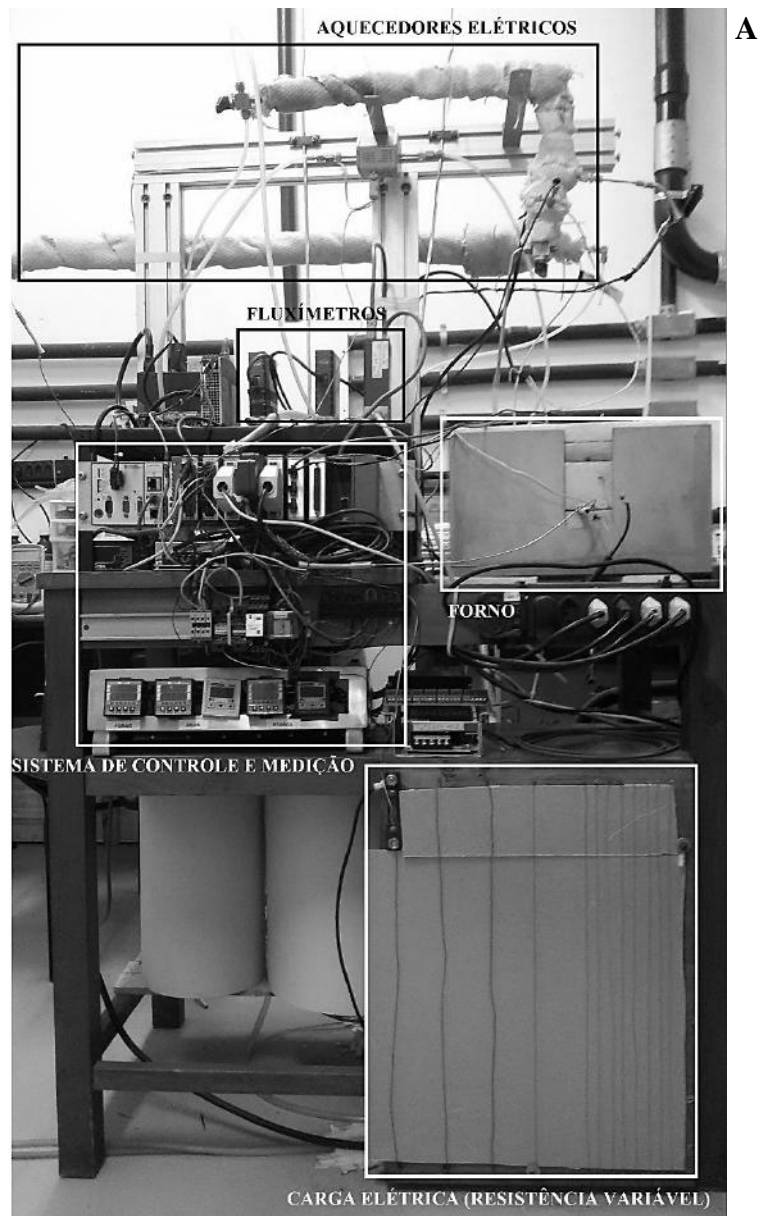
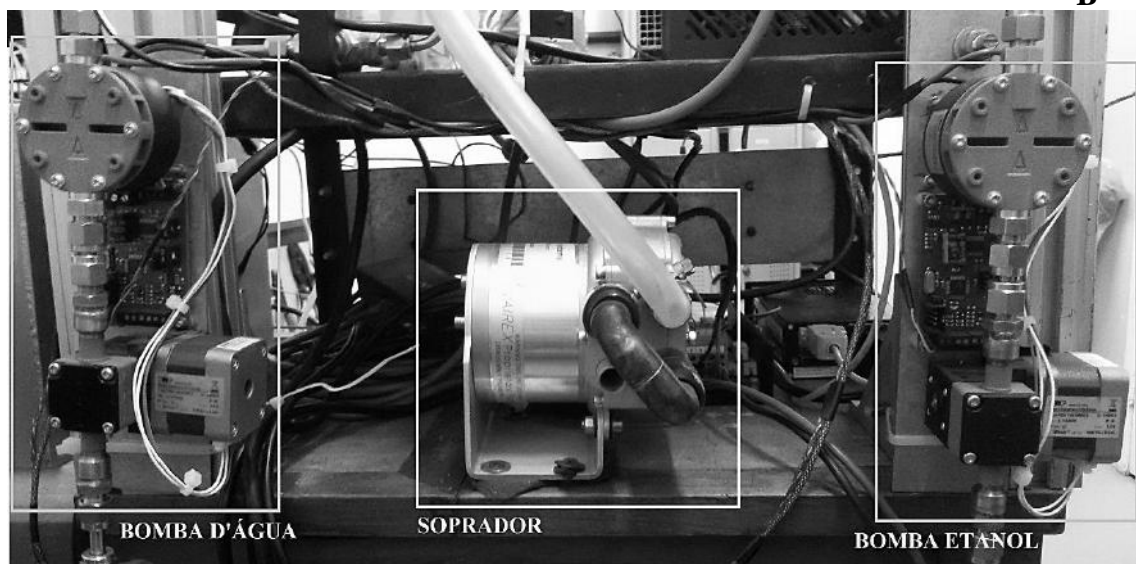


Figura 10 - Esquema do sistema de controle da bancada de teste para empilhamento PaCOS.



**A**



**B**

Figura 11 - Bancada de testes para empilhamento PaCOS: frente (A), verso (B).

A bancada de teste empregada possui sensores de pressão, temperatura e fluxo, para monitorar as condições dos fluidos na entrada e na saída do empilhamento. Um voltímetro e um amperímetro foram conectados à resistência variável utilizada como carga elétrica, para determinar a potência produzida pela PaCOS em diferentes condições. Evaporadores elétricos foram empregados para vaporizar o etanol e a água alimentados. Um forno elétrico foi também utilizado para manter o empilhamento à temperatura desejada. O componente *hardware* principal do sistema de controle é o *CompactRIO* mencionado no item 3.2.9. Esse microcontrolador foi utilizado em todos os testes de componentes relatados nessa seção. O sistema inclui também outros componentes eletrônicos, que têm a função de compatibilizar os sinais de controle e medição do *CompactRIO* com os dos vários sensores e atuadores do sistema. São também utilizadas duas fontes CC/CC para gerar tensão de 12 V<sub>CC</sub> e 5 V<sub>CC</sub>, utilizada por alguns dispositivos, a partir do *bus* principal do sistema, de 24 V<sub>CC</sub>. O *software* de controle da bancada foi desenvolvido com *LabVIEW*. Essa estrutura constituiu também uma primeira versão do controle do protótipo completo, que evoluiu do sistema realizado para os testes.

Os empilhamentos foram inicialmente testados alimentando-os com hidrogênio, que é o combustível para o qual foram projetados. Dessa forma, garantiu-se a possibilidade de investigar o desempenho do empilhamento excluindo do teste todos os potenciais problemas relacionados com o uso de outro combustível, como limitações fluidodinâmicas, efeitos negativos sobre a cinética das reações eletroquímicas e deposição de carbono sólido com consequente desativação do anodo (coisa que pode ocorrer ao utilizarem-se combustíveis carbonosos). Para caracterizar o empilhamento, curvas de polarização e de potência foram levantadas em diferentes condições de temperatura, vazão de combustível e vazão de oxidante, de acordo com a metodologia exposta no item 2.1.3.

Para o empilhamento *Almus AG* foi aplicada a seguinte rotina de teste sugerida pelo fabricante:

- o sistema foi aquecido até 600 °C, circulando nitrogênio (0,3 NI/min) no lado anódico. O procedimento de aquecimento durou aproximadamente 160 minutos;
- o sistema foi mantido a 600 °C por 45 minutos, com H<sub>2</sub> (0,6 NI/min) no lado anódico;
- foi enviado um fluxo de ar de 8 NI/min;

- foram medidas três curvas de polarização, iniciando a primeira em 600 °C, com um fluxo de H<sub>2</sub> de 12 NI/min e um fluxo de ar de 33,6 NI/min;
- uma quarta curva foi medida com 10 NI/min de H<sub>2</sub> e 28 NI/min de ar;
- uma quinta curva foi medida com 12 NI/min de H<sub>2</sub> e 33,6 NI/min de ar.

No caso do segundo modelo adquirido, o *SOFcMan NIMTE-A-Stack-301*, cada sessão de testes foi inicializada como indicado no manual do dispositivo:

- aquecimento do empilhamento a uma taxa de 2 °C/min até 750 °C, alimentando uma vazão de nitrogênio de 2 NI/min no lado anódico;
- substituição do nitrogênio com hidrogênio, com a mesma vazão;
- depois de 10 minutos, introdução de ar no lado catódico, com vazão de 5 NI/min;
- redução do empilhamento nessas condições durante 3 horas antes dos testes.

No caso da primeira unidade do empilhamento *SOFcMan NIMTE-A-Stack-301*, foi possível chegar na etapa seguinte dos testes, onde foi empregado etanol como combustível. Nesse caso, a PaCOS foi alimentada com uma mistura de etanol e água, promovendo a reação de reforma a vapor do combustível (4), de maneira a evitar a deposição de carbono sólido nas partes do sistema em alta temperatura. Os testes executados foram parecidos àqueles aplicados no caso do hidrogênio puro: o levantamento de curvas de polarização e curvas de potência em várias condições de temperatura e vazão dos reagentes. Cada teste com etanol foi antecipado e seguido por testes com hidrogênio, de forma a detectar a possível degradação do desempenho do empilhamento associada ao funcionamento com etanol.

### **3.3.2. Bombas e soprador**

Uma vez adquiridos, os modelos escolhidos de bombas e soprador foram testados em bancada para verificar a correspondência do comportamento experimental com o desempenho indicado pelos fabricantes e a adequação à aplicação desejada. Com esse intuito, foram levantadas as curvas vazão/pressão dos componentes, utilizando o sistema de teste indicado na Figura 12. Acionando a válvula, foi mudada a diferença de pressão enfrentada pela bomba (ou soprador), medindo em cada caso o fluxo de fluido gerado e a potência consumida pelo equipamento. A potência consumida foi calculada multiplicando a corrente absorvida pelo dispositivo e o nível de tensão correspondente, dados obtidos com um amperímetro e um voltímetro. Esse procedimento foi repetido para diferentes valores da velocidade de rotação do dispositivo, regulada através do



valor de tensão do sinal de controle. Dessa forma, foi possível medir a potência consumida em diferentes condições de operação, e, assim, construir uma função que relaciona a vazão gerada com a velocidade de rotação e a diferença de pressão, denominada mapa de funcionamento do componente. Essa função é fundamental para determinar a vazão a partir do valor utilizado da tensão de controle e da medição da diferença de pressão  $\Delta p$ . As medições de fluxo, pressão, tensão e corrente foram registrados com o sistema *CompactRIO*, que foi utilizado também para enviar o sinal de controle dos componentes. A válvula empregada foi do tipo esfera, manual.

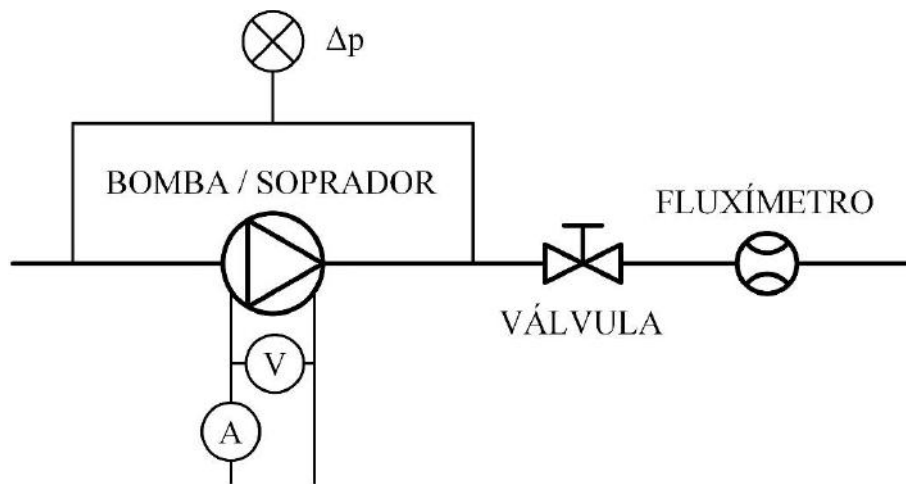


Figura 12 - Esquema do sistema de teste da bomba peristáltica e dos sopradores de ar.

### 3.3.3. Trocadores de calor

No caso dos trocadores de calor, o objetivo dos testes foi principalmente verificar que a troca térmica acontecesse conforme projetado, aquecendo o fluido frio até o nível desejado de temperatura. Devido à dificuldade prática em recriar as condições de operação sem que os trocadores estivessem montados no protótipo, esses componentes foram caracterizados diretamente durante os testes do sistema completo. Por cada trocador de calor, levantando as temperaturas de entrada e saída do fluido frio  $T_{f,e}$  e  $T_{f,s}$ , foi possível calcular o calor absorvido por esse fluido com a equação (68):

$$Q_f = Q_{f,s} - Q_{f,e} + Q_{L,f} = \dot{n}_f \cdot [c_{p,f}(T_{f,s}) \cdot T_{f,s} - c_{p,f}(T_{f,e}) \cdot T_{f,e} + q_{L,f}] \quad (68)$$

onde  $\dot{n}_f$ ,  $c_{p,f}(T_{f,s})$ ,  $c_{p,f}(T_{f,e})$  e  $q_{L,f}$  são respectivamente vazão molar, calores específicos molares a pressão constante às temperatura  $T_{f,s}$  e  $T_{f,e}$  e calor latente de vaporização específico molar do fluido frio. Para cada trocador de calor é também

possível calcular a eficiência de troca térmica  $\varepsilon_{TR}$ , definida no item 3.1.4 como a razão entre  $Q_f$  e o calor trocado máximo teórico, de acordo com a equação (36).

Além das temperaturas necessárias a aplicar as equações (36) e (68), foi também medida a diferença de pressão do fluido frio entre a entrada e a saída de cada trocador, para verificar que o  $\Delta p$  através dos trocadores não exceda o valor de projeto.

Na Figura 13 é representada a colocação dos sensores de temperatura, pressão e vazão.

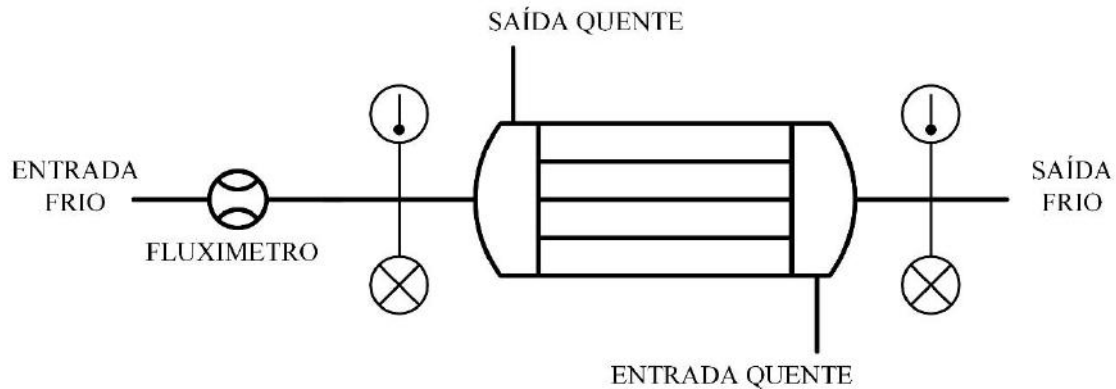


Figura 13 - Esquema do sistema de testes dos trocadores de calor

### 3.3.4. Combustor

Os testes do combustor de etanol previsto para o aquecimento do sistema foram focados na verificação da operação correta do dispositivo, que deve ser capaz de iniciar e sustentar de maneira estável a combustão do etanol. Outro ponto importante é que a temperatura dos gases de combustão na saída do combustor alcance o valor de projeto, garantindo assim o aquecimento do protótipo com a velocidade desejada.

O combustor foi então testado alimentando-o com as vazões de etanol e ar de projeto, controladas através de fluxímetros. Uma vez iniciada a combustão, o dispositivo foi mantido ligado até alcançar um patamar estável de temperatura (medida com um termopar colocado no interior da câmara de combustão, na vizinhança da saída dos gases). No teste foi também utilizado um sensor de tipo sonda lambda, que gera um sinal em tensão proporcional à concentração de oxigênio nos gases que saem do combustor. Esse sinal foi empregado para determinar se o combustível está queimando completamente e se a mistura ar/combustível está na proporção certa. Outro dado que foi registrado é a pressão do ar na entrada do injetor, importante para determinar o gasto energético do soprador e da bomba durante o funcionamento do combustor. A Figura 14 representa o esquema do teste do componente.

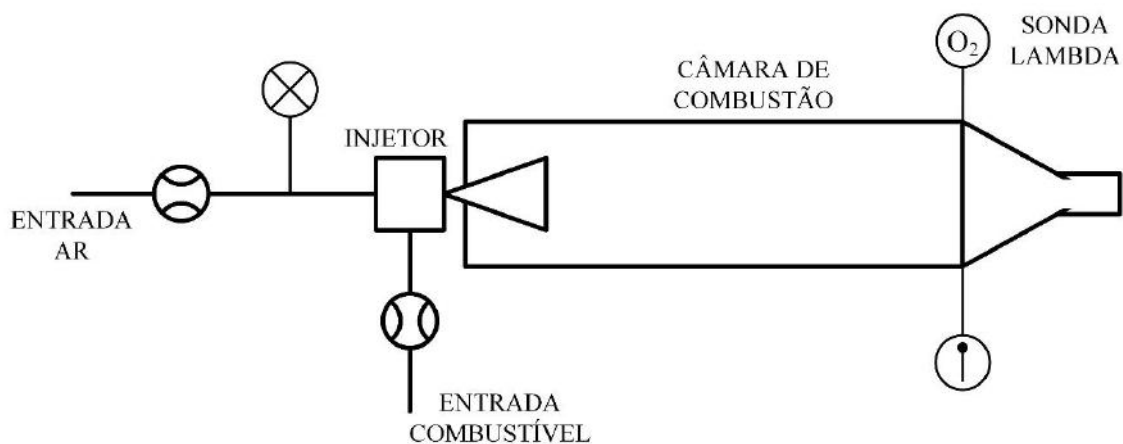


Figura 14 - Esquema do sistema de teste do combustor de inicialização.

### 3.3.5. Conversor CC/CC

Uma vez projetado e construído, o conversor CC/CC foi caracterizado para avaliar o desempenho do mesmo. Na Figura 15 é representado o esquema do sistema de teste do conversor.

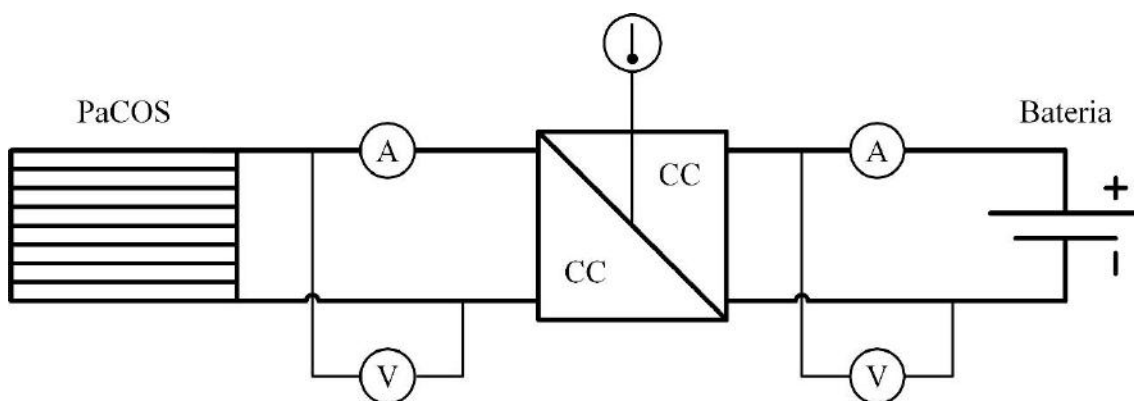


Figura 15 - Esquema do sistema de teste do conversor CC/CC.

Durante o teste, o conversor foi alimentado com corrente contínua em vários níveis de tensão, cobrindo todo o intervalo de operação do empilhamento. Ao mesmo tempo, o conversor envia energia para a bateria. A tensão e a corrente na entrada e na saída do conversor são medidas para determinar a perda de energia na conversão. Utilizando esses dados, é possível determinar a eficiência energética do dispositivo em vários níveis de potência, avaliando se é adequada à aplicação.

### 3.3.6. Inversor

Para verificar se o desempenho do inversor adquirido fosse adequado ao projeto e de acordo com as especificações do fabricante, o dispositivo foi conectado a um banco de baterias, à rede e a cargas elétricas em corrente alternada, como esquematizado em Figura 16.

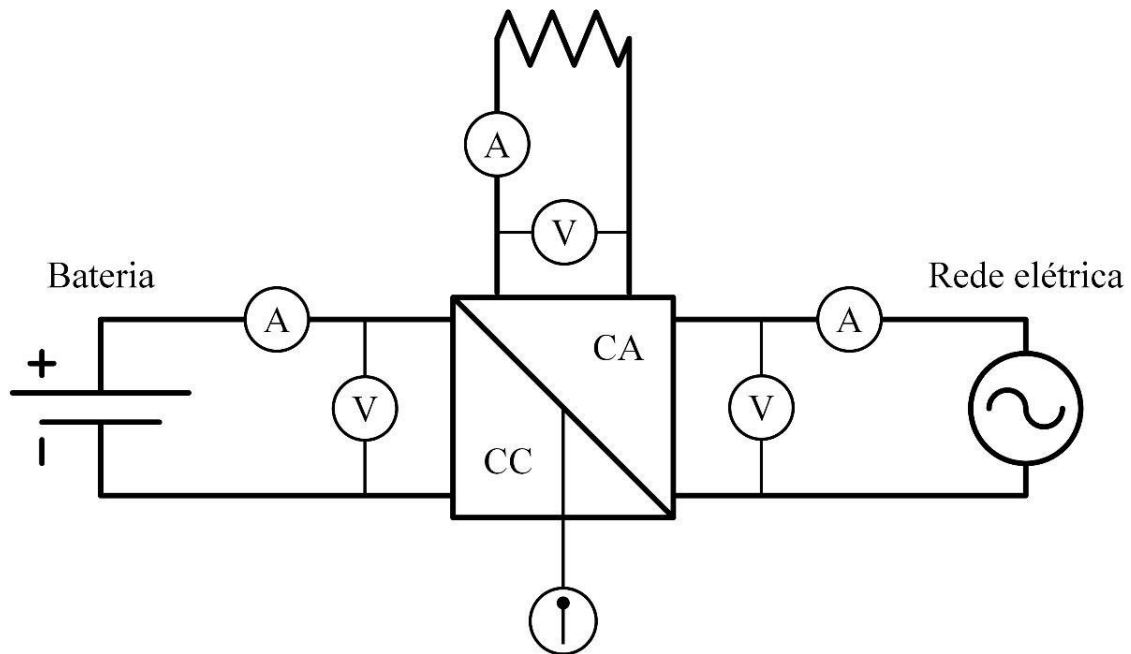


Figura 16 - Esquema do sistema de testes do inversor CC/CA.

O banco de baterias foi por sua vez conectado com uma fonte em corrente contínua que simula a produção elétrica da PaCOS. Nos testes de bancada, a potência em corrente contínua não pôde exceder a potência máxima da fonte. Nessa configuração, não foi então possível caracterizar o inversor em todo o intervalo de potência de funcionamento. Como consequência, na faixa de potências mais altas o equipamento foi testado depois de ser integrado no protótipo. Nessa situação, a fonte de corrente que alimenta as baterias foi a mesma PaCOS, através do conversor CC/CC. Instalando um voltímetro e um amperímetro em cada conexão do equipamento monitoraram-se as tensões e as correntes de entrada e saída, permitindo calcular os fluxos de potência e a eficiência de conversão do equipamento.

A montagem do sistema de teste é representada na Figura 17, onde aparecem (da esquerda para a direita): a fonte de corrente regulável utilizada como fonte de corrente contínua; as baterias; o inversor; o controlador *NI-9082* empregado para adquirir as

medições. Multímetros e alicates amperímetros foram também utilizadas para fornecer medições de controle.

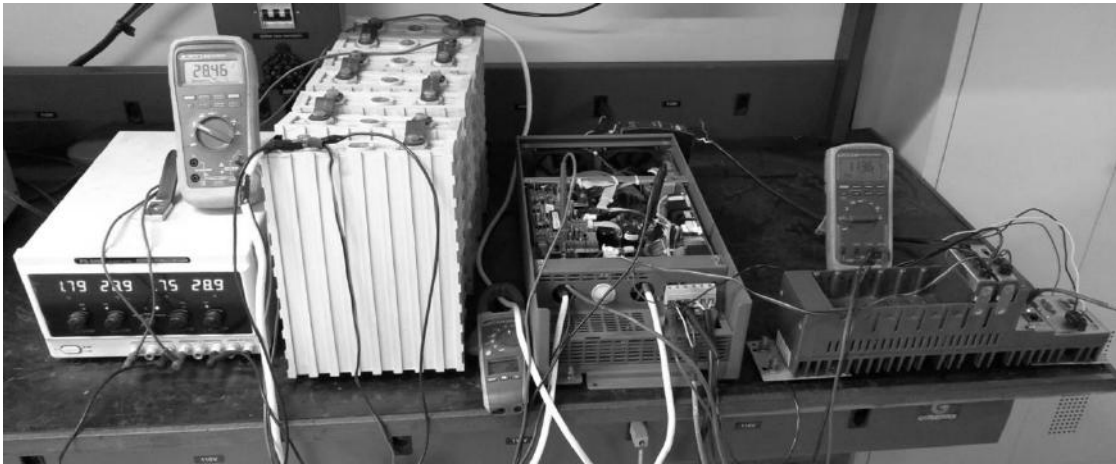


Figura 17 - Bancada de teste do inversor.

### 3.3.7. Sistema de controle

Uma vez executada a programação e o *debugging* do *software* de controle do sistema, o mesmo foi carregado no controlador programável escolhido para o gerenciamento do sistema, testando o conjunto *hardware/software*, incluindo controlador, placas de aquisição e geração de sinais, sensores e atuadores. Foi verificado que cada sensor medisse de forma adequada as variáveis desejadas, e que cada atuador respondesse como previsto aos sinais de controle. Uma vez executados os testes de funcionamento o sistema de controle foi integrado ao restante do protótipo.

## 3.4. TESTES DO SISTEMA COMPLETO

Uma vez caracterizados todos os componentes do sistema, foi possível integrá-los em um conjunto interdependente, que constitui o produto final do projeto de pesquisa. O protótipo foi testado para verificar se são respeitadas as especificações de projeto, utilizando um conjunto de sensores (de tensão, corrente, temperatura, pressão, vazão, ...) que resulta da soma de todos os instrumentos empregados nos testes de cada componente. De fato, é preciso verificar que o funcionamento dos equipamentos seja adequado também uma vez integrado no sistema. Assim sendo, os componentes do sistema foram monitorados no teste do sistema completo do mesmo modo que nos testes

individuais detalhados na seção 3.3, adquirindo assim os dados necessários para caracterizar o funcionamento no ponto de operação escolhido tanto dos vários dispositivos individuais quanto do sistema como um todo. O esquema do sistema de controle e monitoramento dos testes do sistema completo é mostrado em detalhe no item 4.2.6.

## 4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados do modelamento matemático preliminar; as informações relativas ao projeto e à construção dos componentes especiais realizados para serem integrados no protótipo; os dados obtidos nos testes experimentais dos equipamentos, tanto os individuais quanto os em conjunto.

Dois modelos de empilhamentos comerciais, um de bomba, um de inversor e dois de soprador de ar foram adquiridos e testados com êxito. Os trocadores de calor, o aquecedor de inicialização e o conversor CC/CC necessários para conectar o empilhamento às baterias foram projetados de acordo com as especificações definidas seguindo os resultados do modelamento e testados em bancada. O banco de baterias foi dimensionado considerando o perfil usual da carga residencial no Brasil. Uma vez concluídos os testes dos vários componentes, os mesmos foram montados para compor o protótipo completo, cujo desempenho é relatado na seção final desse capítulo.

### 4.1. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Utilizando as equações listadas na seção 3.1 foi realizada a simulação computacional do conjunto PaCOS-BdP, para avaliar o desempenho das diferentes topologias que podem ser utilizadas para a construção e analisar o impacto dos parâmetros operacionais sobre o funcionamento do sistema. Como o número desses parâmetros é elevado, alguns deles foram fixados, para limitar a análise às situações mais relevantes para a presente pesquisa. Outras variáveis foram estimadas utilizando dados da literatura ou valores convencionais. Os valores dos parâmetros escolhidos e estimados estão listados na Tabela 2 (os índices numéricos referem-se à Figura 6). Os parâmetros relacionados com o empilhamento (área e número de pilhas; temperatura da PaCOS; temperatura dos gases na entrada da PaCOS) foram fixados levando em conta o estado da arte da tecnologia, a potência do sistema e as especificações de microgeradores PaCOS comerciais já existentes. As temperaturas da água e dos gases de exaustão foram escolhidas por ser características de aplicações de recuperação térmica parecidas à tratada nessa tese (por exemplo, caldeiras de condensação domésticas). No caso da

potência útil  $P$ , o valor é maior da potência média consumida nas residências brasileiras, que é pouco acima de 220 W [73]. Todavia, foi considerado que os lugares de aplicação do sistema mais prováveis requereriam um nível de potência maior, sendo principalmente sistemas isolados acima de 350 kWh/mês de consumo (conjuntos isolados de habitações, fazendas, ...) ou residências conectadas à rede de distribuição. Nesse segundo caso, a potência excedente seria vendida à empresa distribuidora, satisfazendo na prática parte da carga de outras residências.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo fixados e estimados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Parâmetros fixados</b>			
Potência elétrica útil gerada	$P$	500	[W]
Área das pilhas a combustível	$A_p$	50	[cm <sup>2</sup> ]
Número de PaC no empilhamento	$N_p$	30	-
Temperatura dos gases (entrada PaCOS)	$T_{2,4}$	600	[°C]
Temperatura da PaCOS (componentes sólidos)	$T_5$	850	[°C]
Temperatura de saída dos gases	$T_9$	80	[°C]
Temperatura de entrada da água	$T_{10}$	25	[°C]
Temperatura de saída da água	$T_{11}$	45	[°C]
<b>Parâmetros estimados</b>			
Eficiência da eletrônica de potência	$\eta_{EP}$	94	[%]
Rendimento isentrópico do soprador	$\eta_S$	70	[%]
Rendimento isentrópico das bombas	$\eta_{B,i}$	70	[%]
Queda de pressão da linha catódica	$\Delta p_C$	475	[mbar]
Queda de pressão da linha anódica	$\Delta p_A$	550	[mbar]
Pressão ambiente	$p_{amb}$	1013,25	[mbar]
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	25	[°C]
Potência térmica perdida (pós-combustor)	$Q_{d,PC}$	120	[W]
Potência térmica perdida (pré-aquecedor do ar)	$Q_{d,PA}$	80	[W]
Potência térmica perdida (evaporadores)	$Q_{d,EV}$	80	[W]
Potência térmica perdida (recuperador de calor)	$Q_{d,REC}$	50	[W]



Nessa seção, um indicador denominado sensibilidade foi utilizado para investigar o efeito de cada mudança nos parâmetros operacionais do sistema sobre as eficiências elétricas. A sensibilidade da eficiência elétrica global  $\eta_{el}$  à variação do parâmetro  $p$  de um valor  $p^{(1)}$  para um valor  $p^{(2)}$  é definida como a razão entre a variação relativa da eficiência e a variação relativa de  $p$ , como indicado na equação (69):

$$S_{\eta_{el}}^p = [(\eta_{el}^{(2)} - \eta_{el}^{(1)})/\eta_{el}^{(1)}] / [(p^{(2)} - p^{(1)})/p^{(1)}] \quad (69)$$

Uma equação equivalente pode ser escrita para  $\eta_{PaC}$ .

#### 4.1.1. Sistema alimentado com etanol puro

Nesse caso, o empilhamento recebe na entrada do anodo um fluxo de etanol puro sob a forma de vapor. No mesmo compartimento anódico o combustível participa a reações de pirólise e reforma a vapor, sendo convertido em hidrogênio e monóxido de carbono. O CO participa da reação de deslocamento do vapor d'água produzindo mais H<sub>2</sub>, que participa das reações eletroquímicas. Admite-se que a presença de água (produto das reações) e os materiais utilizados para o sistema garantem que não aconteça deposição de carbono em forma sólida. Os parâmetros principais que influenciam o funcionamento do sistema são os valores da razão  $\lambda$  para o etanol ( $\lambda_{C_2H_6O}$ ) e o ar ( $\lambda_{ar}$ ), definidos de acordo com as equações (70) e (71):

$$\lambda_{C_2H_6O} = \dot{n}_{C_2H_6O} / \dot{n}_{C_2H_6O,EST} \quad (70)$$

$$\lambda_{ar} = \dot{n}_{ar} / \dot{n}_{ar,EST} = \lambda_{O_2} \quad (71)$$

O numerador da razão é a vazão molar real de etanol ou de ar. O denominador é a vazão molar mínima requerida para gerar o valor de corrente desejado (subscrito *EST*). A simulação do sistema foi feita para várias duplas de  $\lambda_{C_2H_6O}$  e  $\lambda_{ar}$ , resultados que são mostrados na Figura 18, na Figura 19 e na Figura 20. Os valores de eficiência mostrados são calculados utilizando o poder calorífico superior do combustível.

Os gráficos demonstram que o aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$ , ou seja, do excesso do combustível provoca uma queda considerável das eficiências elétrica, global e da PaCOS. De fato, as simulações são feitas mantendo  $P$  constante; como consequência, aumentar  $\lambda_{C_2H_6O}$  significa utilizar um fluxo de combustível maior para produzir o mesmo nível de potência elétrica, resultando em eficiências elétricas menores. O impacto do aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$  sobre as eficiências elétricas é maior quando  $\lambda_{C_2H_6O}$  é baixo. Além disso, o

efeito é levemente maior sobre a eficiência elétrica da PaCOS que sobre a global. Esse último resultado pode ser confirmado também calculando a sensibilidade das eficiências elétricas à variação de  $\lambda_{C_2H_6O}$ . De fato, o valor médio da sensibilidade de  $\eta_{el}$  à variação simulada de  $\lambda_{C_2H_6O}$  é -0,426, enquanto a mesma quantidade no caso de  $\eta_{PaC}$  é igual a -0,448. Os dois valores são negativos, então o aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$  provoca uma queda das eficiências elétricas, mas  $\eta_{PaC}$  parece ser mais sensível à variação do parâmetro. Outra consequência do aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$  com  $P$  constante é que uma porção maior do conteúdo energético do combustível é convertida em calor; como consequência, a eficiência térmica global do sistema cresce, como evidenciado na Figura 20. Além desses efeitos, é possível observar também que quando  $\lambda_{ar}$  cresce verifica-se um aumento limitado da eficiência elétrica do empilhamento e uma queda da eficiência elétrica global. Isso ocorre porque quando  $\lambda_{ar}$  aumenta há um aumento concomitante do desempenho das PaC (devido à maior pressão parcial do ar nos compartimentos catódicos) e da potência consumida pelo soprador ( $\lambda_{ar}$  maior significa vazão de ar maior). O primeiro efeito contribui para aumentar a potência produzida pelo empilhamento com vazão de combustível constante, enquanto o segundo efeito gera um aumento do consumo elétrico dos dispositivos auxiliares. O segundo efeito predomina sobre o primeiro, gerando uma queda da eficiência elétrica global. A variação do valor de  $\lambda_{ar}$  influencia o desempenho do sistema de maneira bem mais limitada que a variação de  $\lambda_{C_2H_6O}$ , especialmente nas simulações operadas com os valores de  $\lambda_{C_2H_6O}$  mais elevados. O valor médio da sensibilidade de  $\eta_{el}$  à variação de  $\lambda_{ar}$  é -0,018, o que significa que o aumento de  $\lambda_{ar}$  provoca uma queda de  $\eta_{el}$  bem menor do que aquela observada no caso do aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$ .

De acordo com a análise exposta, para maximizar  $\eta_{el}$  é preciso reduzir o máximo possível o valor de  $\lambda_{C_2H_6O}$ . O mínimo valor de  $\lambda_{C_2H_6O}$  que pode ser utilizado na prática depende principalmente das características do empilhamento. Na simulação, não foram empregados valores de  $\lambda_{C_2H_6O}$  inferiores a 1,2, pois abaixo desse limite teria risco de carência de combustível para as reações eletroquímicas. De fato, as reações nas pilhas nunca progridem de maneira ideal; então é sempre preciso alimentar um excesso de combustível para garantir que o empilhamento possa sustentar a corrente desejada. Para motivações similares, foi mantida uma diferença mínima entre os valores de  $\lambda_{C_2H_6O}$  e  $\lambda_{ar}$  igual a 0,2, para garantir a combustão completa no pós-combustor: uma razão ar/combustível menor poderia resultar na emissão de hidrocarbonetos na atmosfera.

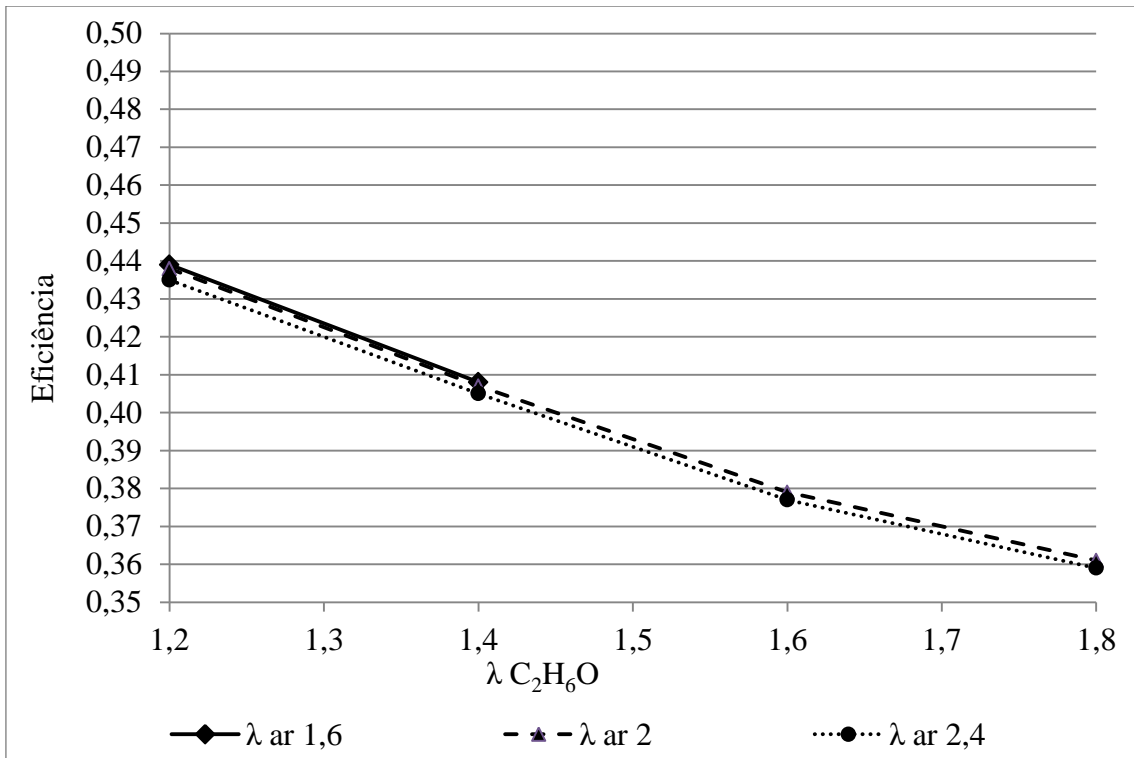


Figura 18 - Eficiência elétrica global em função de  $\lambda_{C_2H_6O}$ .

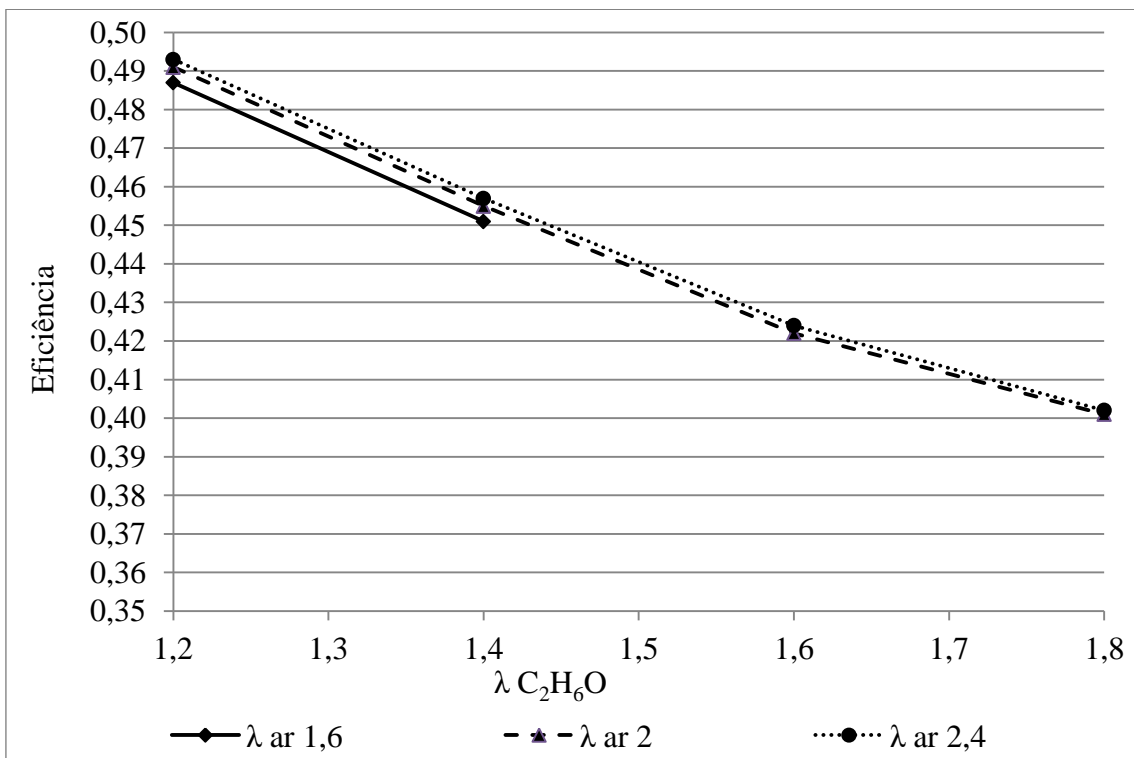


Figura 19 - Eficiência elétrica da PaCOS em função de  $\lambda_{C_2H_6O}$ .

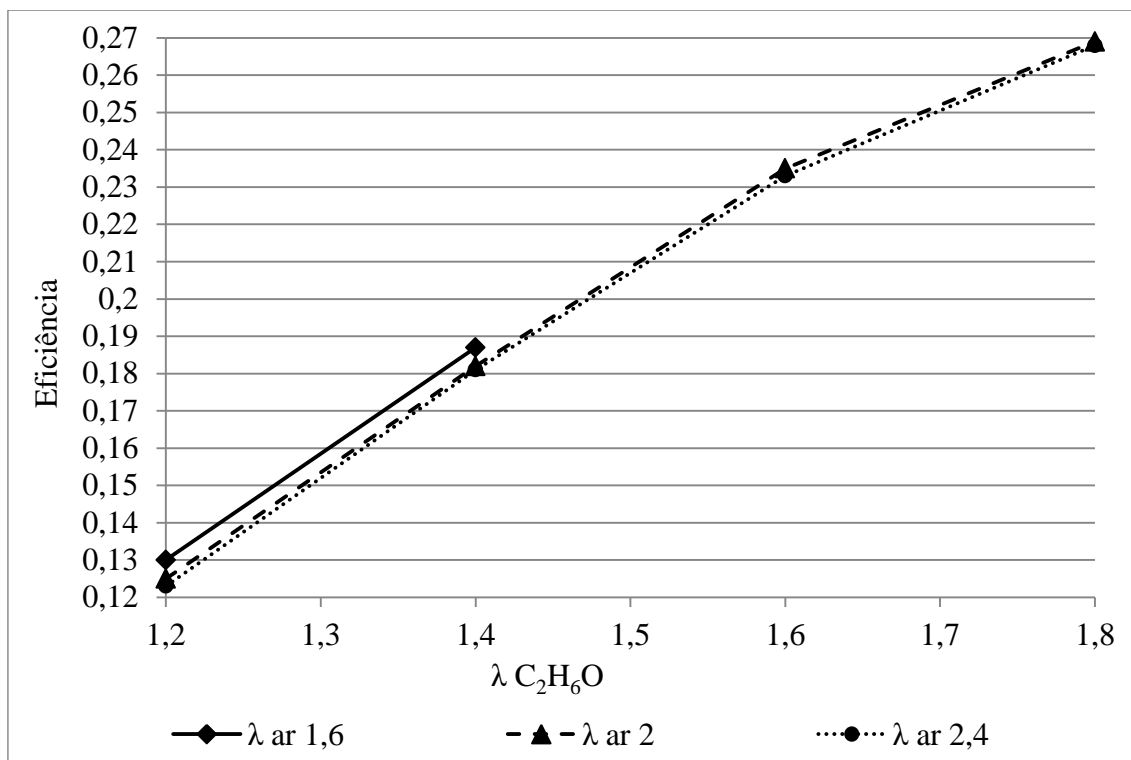


Figura 20 - Eficiência térmica global em função de  $\lambda_{C_2H_6O}$ .

#### 4.1.2. Sistema alimentado com etanol e água

A deposição de carbono por pirólise na PaCOS e nas tubulações de alimentação do combustível pode ser um problema importante nos sistemas para geração elétrica com PaCOS alimentados com hidrocarbonetos. Para evitá-lo, o combustível é usualmente alimentado ao sistema com alguma quantidade de água. A vazão de água necessária muda de acordo com as características do sistema. O parâmetro utilizado para definir essa vazão,  $V/E$ , indicado na equação (72), é a razão entre as vazões molares de vapor e de etanol  $V/E$ :

$$\frac{V}{E} = \dot{n}_{H_2O,A} / \dot{n}_{C_2H_6O} \quad (72)$$

Valores de  $V/E$  normalmente utilizados na literatura para a operação de PaCOS estão entre 3 e 10. Na Figura 21 é possível ver o efeito do aumento de  $V/E$  sobre as eficiências elétricas do empilhamento e global. O gráfico foi desenhado utilizando a dupla de valores de  $\lambda_{C_2H_6O}$  e  $\lambda_{ar}$  que gera a maior eficiência elétrica no caso do etanol puro e considerando que a vazão de água seja enviada à PaCOS utilizando uma bomba. A Figura demonstra claramente que a diluição do etanol com água ocasiona queda das eficiências elétricas da PaCOS e global. Quanto maior for essa diluição maior será a

perda de eficiência. A queda de eficiência elétrica global é principalmente causada pela queda de eficiência elétrica da PaCOS, mas existe também um efeito depreciativo adicional, embora limitado, representado pela potência consumida pela bomba d'água. Com o menor valor de  $V/E$  utilizado, a diferença entre as eficiências elétricas nos casos de etanol puro e diluído é 2,8 %. Essa diferença vai aumentando com o crescimento de  $V/E$ . Isso é refletido pelos valores da sensibilidade de  $\eta_{el}$  à variação de  $V/E$ : o valor médio dessa sensibilidade para as simulações efetuadas é -0,058, o que significa que, quando  $V/E$  aumenta,  $\eta_{el}$  diminui. A queda de  $\eta_{el}$  é menor do que aquela provocada pelo aumento de  $\lambda_{C_2H_6O}$ , mas é maior do que aquela relacionada com o aumento de  $\lambda_{ar}$ , como é possível deduzir da comparação entre as respectivas sensibilidades. Pode se notar também que a sensibilidade aumenta ao aumentar de  $V/E$ , confirmando que o efeito prejudicial do aumento desse parâmetro é mais significativo se  $V/E$  já é elevado.

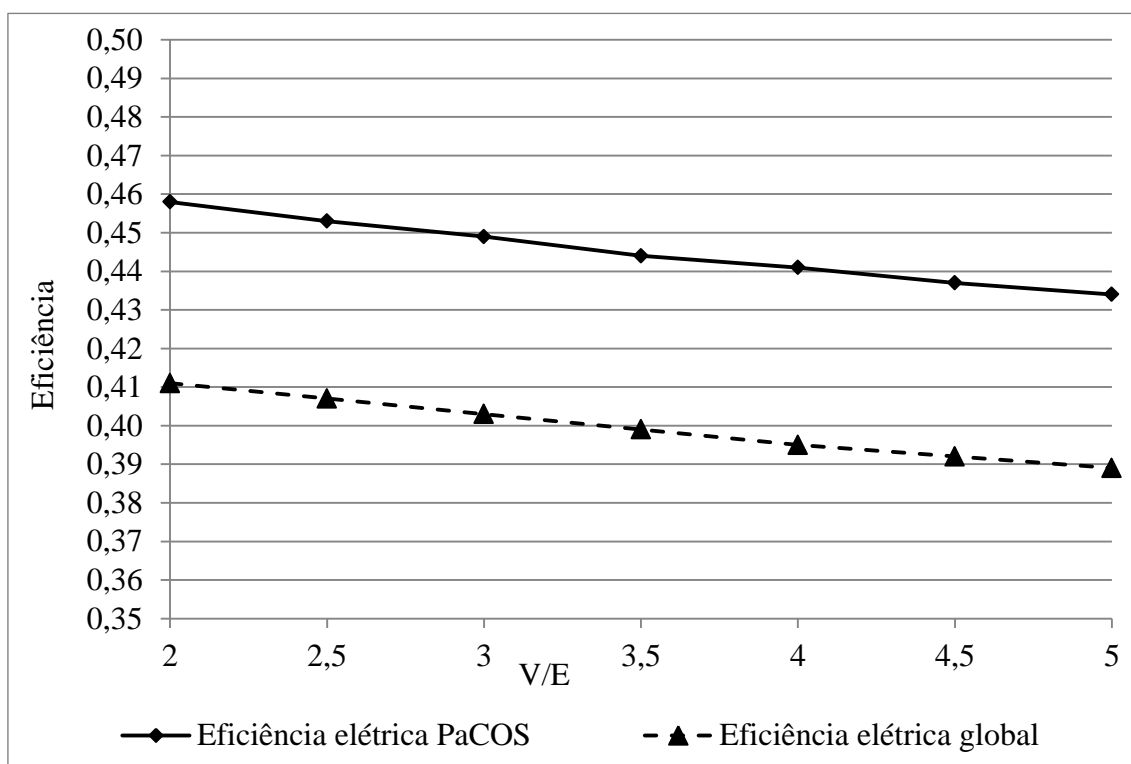


Figura 21 - Eficiências elétricas, etanol diluído com água.

#### 4.1.3. Recirculação anódica

Outro método empregado para aumentar a quantidade de água no anodo, reduzindo a probabilidade de formação de carbono no empilhamento, é realimentar uma parte dos gases de saída do anodo para a sua entrada. Dessa forma, o vapor produzido na reação

eletroquímica é parcialmente reintroduzido no empilhamento, aumentando a concentração de água. Normalmente essa operação é realizada utilizando um ejetor, que usufrui da pressão do fluxo de combustível não reagido (alimentado do exterior) para gerar o fluxo de recirculação. O parâmetro que fixa o grau da recirculação anódica é a fração de água do exterior, definida de acordo com equação (73) como razão entre a vazão de água alimentada junto com o combustível não reagido e a vazão total de água que entra no anodo (soma da água oriunda do exterior e da fração de água presente nos gases de recirculação):

$$f_{H_2O,ext} = \dot{n}_{H_2O,2} / \dot{n}_{H_2O,A} \quad (73)$$

Quanto menor for essa razão, maior é a fração de água introduzida junto com o gás recirculado. Claramente, o maior benefício para a simplicidade do sistema é satisfazer a exigência de água no anodo utilizando exclusivamente a recirculação dos gases.

É importante notar que a vazão de combustível definida por  $\lambda_{C_2H_6O}$  inclui também a fração de combustível presente nos gases da recirculação: de fato, esses gases contêm combustível não oxidado (no modelo utilizado, exclusivamente hidrogênio gerado pela decomposição do etanol no compartimento anódico), que pode ainda participar das reações eletroquímicas. Isso significa que, no caso da recirculação anódica, um aumento do valor de  $\lambda_{C_2H_6O}$  é relacionado a um aumento de  $\dot{n}_{C_2H_6O}$  menor do que o que foi mostrado nos itens 4.1.1 e 4.1.2.

Na Figura 22 e na Figura 23 são demonstrados os valores das eficiências elétricas global e da PaCOS para diferentes valores de  $f_{H_2O,ext}$  nos casos de  $V/E$  igual a 2 e 4. Comparando esses dados com os resultados obtidos com as condições de operação precedentes, conclui-se que ao utilizar a recirculação anódica é possível obter uma eficiência elétrica global elevada mantendo o valor desejado de  $V/E$ . No caso de  $V/E$  igual a 2 (Figura 22) e valores de  $f_{H_2O,ext}$  inferiores a 0,2 a eficiência elétrica global é ainda maior que no caso de etanol não diluído (Figura 18), embora a diferença seja pequena (0,4 %). Da mesma forma que foi verificado no item precedente, aumentando o valor de  $V/E$  a eficiência elétrica global é reduzida: com  $V/E$  igual a 4 (Figura 23), a eficiência elétrica global é a mesma que no caso de etanol puro (Figura 18) somente se  $f_{H_2O,ext}$  é 0. Isso significa que para valores de  $V/E$  maiores que 4 é impossível evitar uma queda na eficiência elétrica global com respeito ao caso do etanol puro, até utilizando a recirculação anódica.

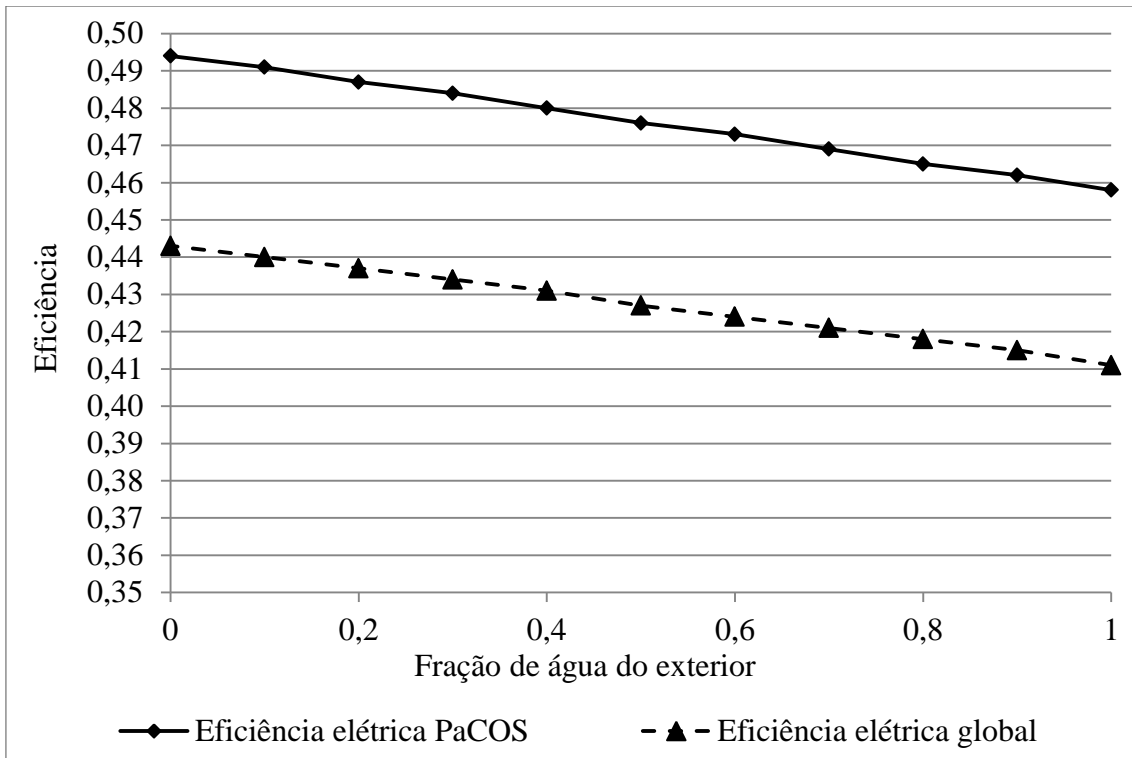


Figura 22 - Eficiências elétricas, recirculação anódica  $V/E = 2$ .

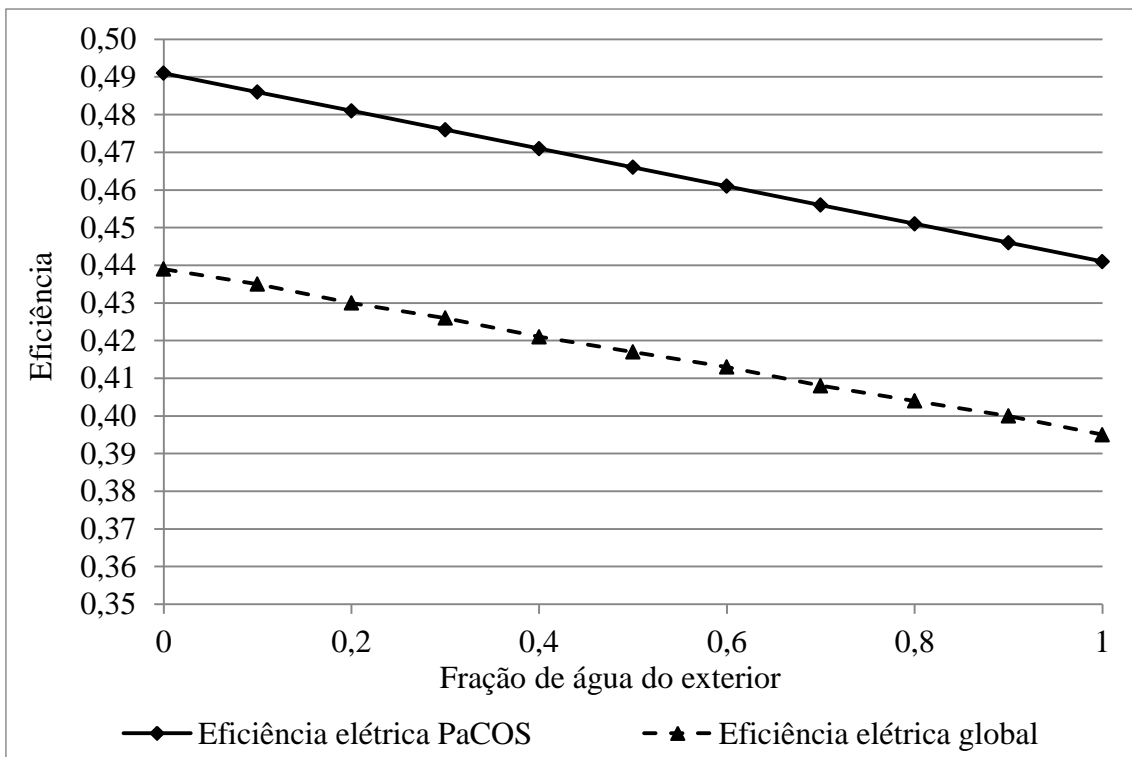


Figura 23 - Eficiências elétricas, recirculação anódica  $V/E = 4$ .

Calculando a sensibilidade de  $\eta_{el}$  às variações de  $f_{H_2O,ext}$  é possível obter informações adicionais. O valor médio da sensibilidade calculada pelas simulações efetuadas é -0,039 no caso de  $V/E$  igual a 2 e -0,054 no caso de  $V/E$  igual a 4. Isso sugere que a influência de  $f_{H_2O,ext}$  sobre  $\eta_{el}$  é maior para valores elevados de  $V/E$ . Além disso, o valor absoluto da sensibilidade é maior quando os valores considerados de  $f_{H_2O,ext}$  são elevados. Isso evidencia que os efeitos positivos da recirculação anódica são muito evidentes já com pequenas reduções do fluxo de água externo (valor de  $f_{H_2O,ext}$  cerca da unidade), enquanto os benefícios adicionais reduzem se quanto mais  $f_{H_2O,ext}$  é perto de 0 (ponto no qual a água é completamente fornecida através da recirculação anódica). Também nesse caso a sensibilidade de  $\eta_{el}$  às variações de  $f_{H_2O,ext}$  é menor que a sensibilidade de  $\eta_{el}$  às variações de  $\lambda_{C_2H_6O}$ .

#### **4.1.4. Recirculação catódica**

De forma análoga a quanto exposto no item 4.1.3 para o anodo, é possível recircular uma parte dos gases da saída do catodo para a sua entrada. Também nesse caso é usualmente utilizado um ejetor. Empregando a recirculação catódica, a vazão de ar comprimido requerida para obter um determinado valor de  $\lambda_{ar}$  é menor. Isso implica uma menor potência elétrica consumida pelo soprador e um menor gasto de potência térmica para pré-aquecer o ar. Como consequência, utilizando essa solução a potência consumida pelos equipamentos auxiliares cai e o desempenho térmico do sistema aumenta. O parâmetro que caracteriza o funcionamento do sistema nesse caso é a fração de recirculação catódica, definida como a razão entre a vazão dos gases de saída catódica que é recirculada para a entrada e a vazão total dos gases que saem dos catodos. O intervalo de valores viáveis de  $f_{rec,C}$  tem um limite superior, devido ao fato que é preciso garantir uma quantidade mínima de oxigênio para sustentar as reações na PaCOS e no pós-combustor. De fato, o aumento de  $f_{rec,C}$  gera uma redução de oxigênio e um aumento do nitrogênio na mistura de gases que entra no catodo.

A Figura 24 demonstra o efeito de  $f_{rec,C}$  sobre a potência consumida pelo soprador e a potência térmica recuperada. Como já evidenciado, o aumento de  $f_{rec,C}$  causa uma queda da potência consumida pelo soprador e um aumento da potência térmica recuperada (sendo menor a potência térmica requerida para pré-aquecer o ar). A recirculação catódica reduz então o consumo elétrico dos dispositivos auxiliares,



melhorando, assim, o manejo térmico do sistema e, conseqüentemente, a eficiência térmica global.

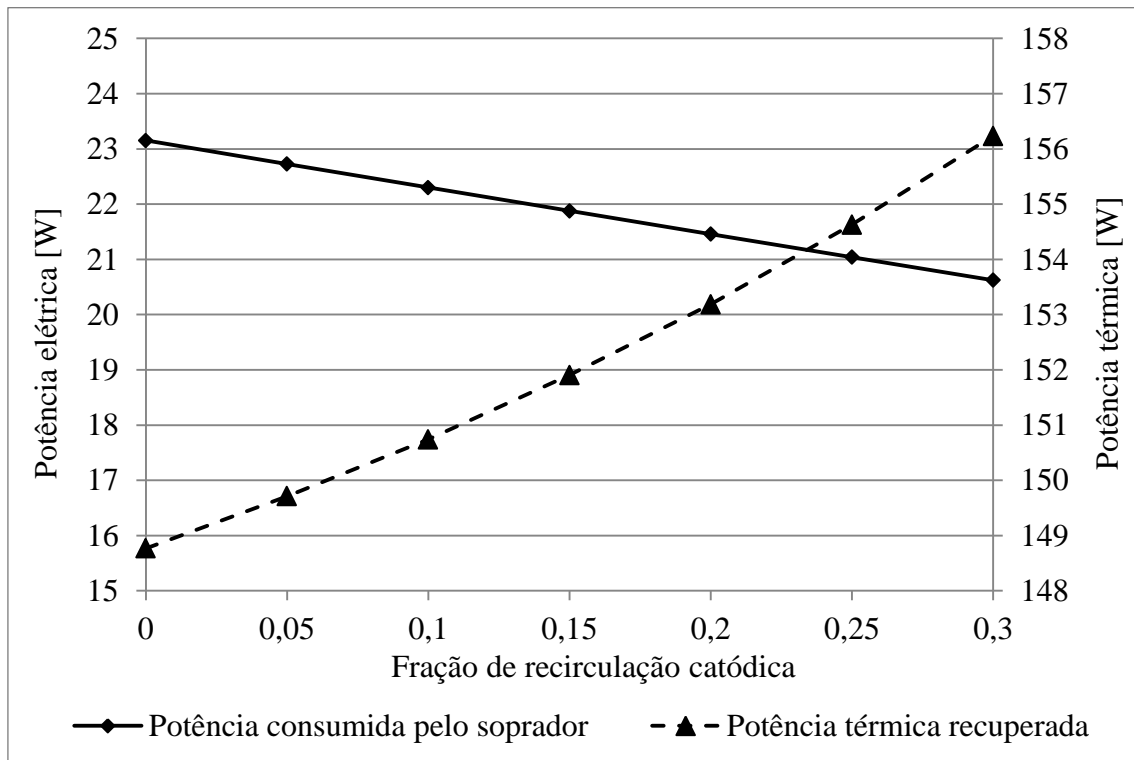


Figura 24 - Potência elétrica consumida pelo soprador e potência térmica recuperada com recirculação catódica.

A Figura 25 mostra o comportamento com recirculação catódica das eficiências elétricas (da PaCOS e global) e da eficiência térmica global. O aumento de  $f_{rec,C}$  provoca a diminuição da concentração de oxigênio no catodo e conseqüentemente a queda da eficiência elétrica da PaCOS. Ao mesmo tempo acontece uma diminuição do gasto energético dos equipamentos auxiliares. A soma desses dois efeitos influi sobre a eficiência elétrica global, mas o efeito da eficiência elétrica da PaCOS prevalece, então a eficiência elétrica global também cai quando  $f_{rec,C}$  aumenta. Contudo, a queda da eficiência elétrica global é pouco pronunciada, em torno de 0,2 % entre os casos de  $f_{rec,C}$  igual a 0 e a 0,3. O impacto de  $f_{rec,C}$  sobre  $\eta_{el}$  é tão limitado que as sensibilidades correspondentes são quase nulas. O efeito da recirculação catódica sobre a eficiência térmica global é um pouco mais pronunciado: o desempenho térmico do sistema sobe aproximadamente de 0,7 % quando  $f_{rec,C}$  passa de 0 para 0,3.

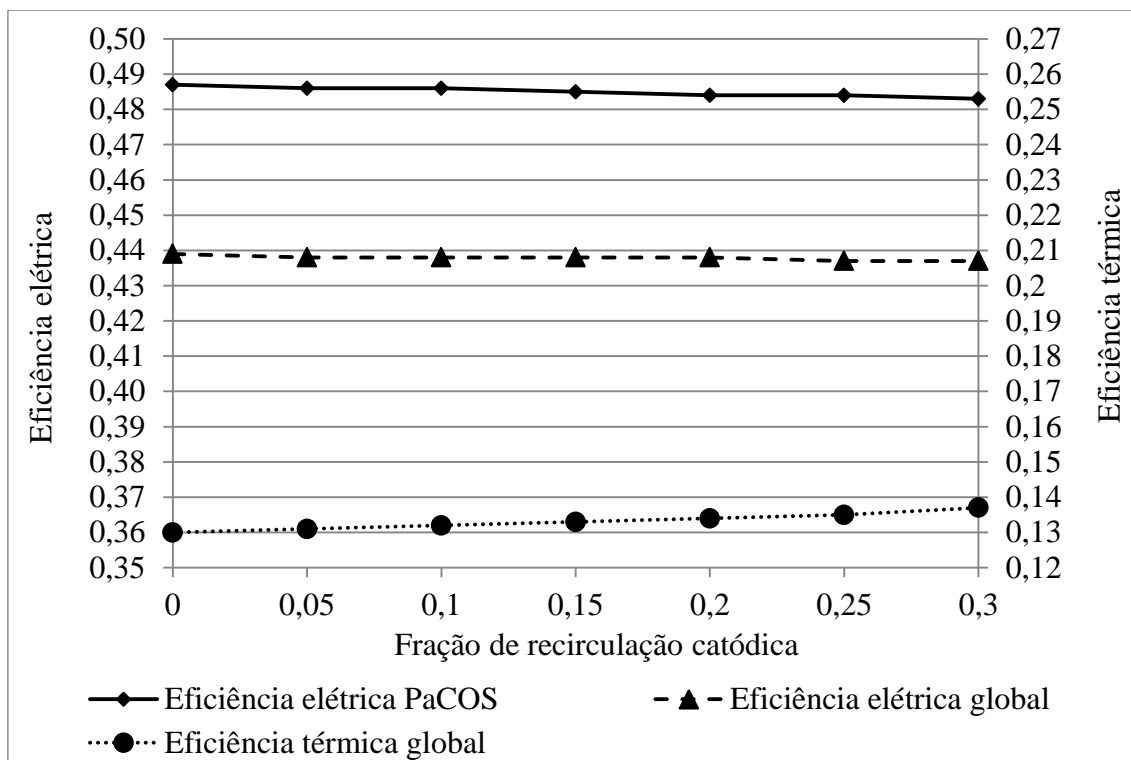


Figura 25 - Recirculação catódica: eficiências elétricas da PaCOS e global, eficiência térmica global.

Os resultados apresentados até agora relativos à utilização da recirculação catódica evidenciam que essa solução não é apropriada para um sistema dedicado à produção elétrica, porque provoca uma queda da eficiência elétrica global. A recirculação catódica é vantajosa no caso em que a eficiência térmica global é um parâmetro importante, dado que o ganho na eficiência térmica é maior que a perda na eficiência elétrica. Contudo, o aumento da eficiência térmica não é muito pronunciado, então o efeito benéfico dificilmente justificaria a maior complexidade do sistema requerida para realizar a recirculação catódica.

## 4.2. PROJETO DOS COMPONENTES

### 4.2.1. Área de alta temperatura

Fazem parte dessa parcela do sistema o empilhamento PaCOS, os trocadores de calor e uma área de combustão auxiliar, onde acontece a queima da parcela de combustível não reagido nos compartimentos anódicos do empilhamento. Seguindo os resultados dos testes experimentais dos empilhamentos comerciais (reportados no item 4.3.1), o projeto

foi concebido de acordo com as necessidades e características do empilhamento *SOFCSMan NIMTE-A-STACK-301*, que foi escolhido para ser integrado no sistema.

A primeira parte a ser desenvolvida foi o sistema mecânico de compressão do empilhamento. Esse sistema é necessário para manter as PaCOS em condições de operação adequadas. Com efeito, as especificações do fabricante requerem que 120 kg de peso sejam constantemente aplicados ao empilhamento, ao variarem-se as condições de temperatura e vazão de gases. Isso foi garantido através de uma estrutura metálica em contato com o lado inferior do empilhamento de um lado e conectada a um parafuso do outro. O parafuso empurra um êmbolo, que por sua vez é conectado a uma chapa metálica que aplica a pressão requerida, sendo apoiada na face superior do empilhamento. Entre o parafuso e o êmbolo foi posicionada uma célula de carga, que mede a carga aplicada. O parafuso é atarraxado ou desatarraxado por um motor de passo, controlado pelo sistema de controle de acordo com a carga medida. Quando a carga é insuficiente, o motor atarraxa o parafuso, empurrando o êmbolo; em caso contrário, desatarraxa, aliviando a pressão. Na Figura 26 podem-se ver as várias partes do sistema de compressão: de cima para baixo aparecem o parafuso (A), a célula de carga (B), o êmbolo (C), a placa de compressão (D), o empilhamento (E) e o fundo da estrutura metálica de suporte (F), conectada com o parafuso pelos tarugos metálicos localizados nas laterais do empilhamento.

O empilhamento e a parte baixa do sistema de compressão foram alojados em uma caixa metálica, com o intuito de criar uma área de combustão para os gases não reagidos que saem do empilhamento. De fato, para manter o balanço térmico do sistema e gerar o calor necessário para pré-aquecer e vaporizar os reagentes estimou-se necessário queimar completamente a parcela de gases não reagidos. A queima do combustível não reagido é também essencial para não emitir hidrocarbonetos não reagidos através da exaustão do sistema.



Figura 26 - Sistema de compressão do empilhamento.

Na Figura 27 é representada uma visão superior da área de alta temperatura do sistema, com indicação dos diferentes componentes da mesma. A área que foi destinada à combustão (A) encontra-se na frente da saída do ar do empilhamento, localizada em uma das faces laterais do empilhamento (B), que apresenta pequenas frestas que permitem ao oxidante não reagido sair do catodo da PaC. O combustível em excesso foi também canalizado para essa área através de um tubo (C) conectado à saída anódica situada na face inferior do empilhamento. A caixa metálica (D) que contém o empilhamento possui duas aberturas laterais (E), em correspondência com a área de combustão, que permitem a saída dos gases de exaustão. No topo da área de combustão é também localizada uma entrada (F) para conexão com o combustor de inicialização, que vai gerar o gás quente necessário ao aquecimento inicial do sistema. Os trocadores de calor foram posicionados nas laterais da caixa metálica, para poder receber os gases quentes provenientes da área de combustão, canalizados entre a caixa do empilhamento e o isolamento térmico externo (G). O vaporizador de água (H) foi colocado de um lado, o de etanol (I) do outro. Do mesmo lado do vaporizador de etanol foi colocado também o pré-aquecedor de ar (J). Uma vez percorrida a lateral da caixa do empilhamento, os gases de exaustão saem da área de alta temperatura do sistema através da tubulação de exaustão (não presente no desenho), localizada acima da área de alta temperatura, do lado oposto do empilhamento com respeito à área de combustão. O ar pré-aquecido entra no empilhamento pela face inferior, através de uma tubulação dedicada (L). Etanol e água, após a vaporização, misturam-se na tubulação de entrada do anodo (M), conectada à face superior do empilhamento. Em correspondência com as tubulações de entrada e saída anódica, foram conectados ao empilhamento os coletores de corrente, que saem verticalmente da área de alta temperatura. O coletor negativo (N) foi conectado à face inferior, saindo por baixo; o coletor positivo (O) foi conectado à face superior, saindo por cima. Todas as tubulações e os coletores de corrente foram acoplados com o empilhamento através de roscas existentes no corpo metálico das faces superior e inferior do *NIMTE-A-STACK-301*.

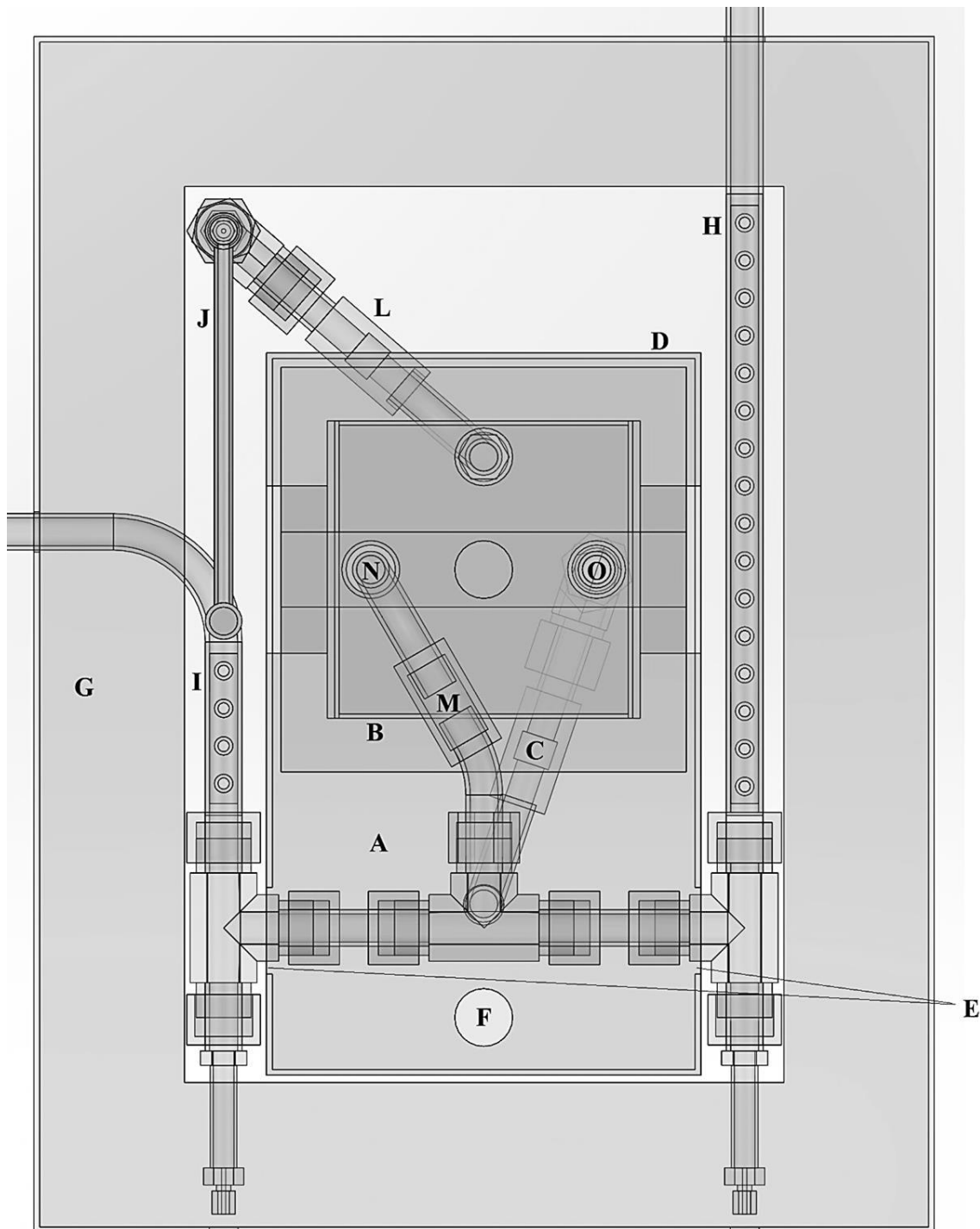


Figura 27 - Área de alta temperatura do sistema.

Na Figura 28 são mostradas outras vistas da área de alta temperatura. A Figura 28 não mostra o isolamento térmico e a caixa do empilhamento, e alguns componentes aparecem só em algumas vistas para favorecer a compreensão. Como complemento é possível consultar também o item 4.4.1, onde é mostrada a montagem real, o Anexo 1 e o Anexo 2, outras representações tridimensionais da área de alta temperatura.

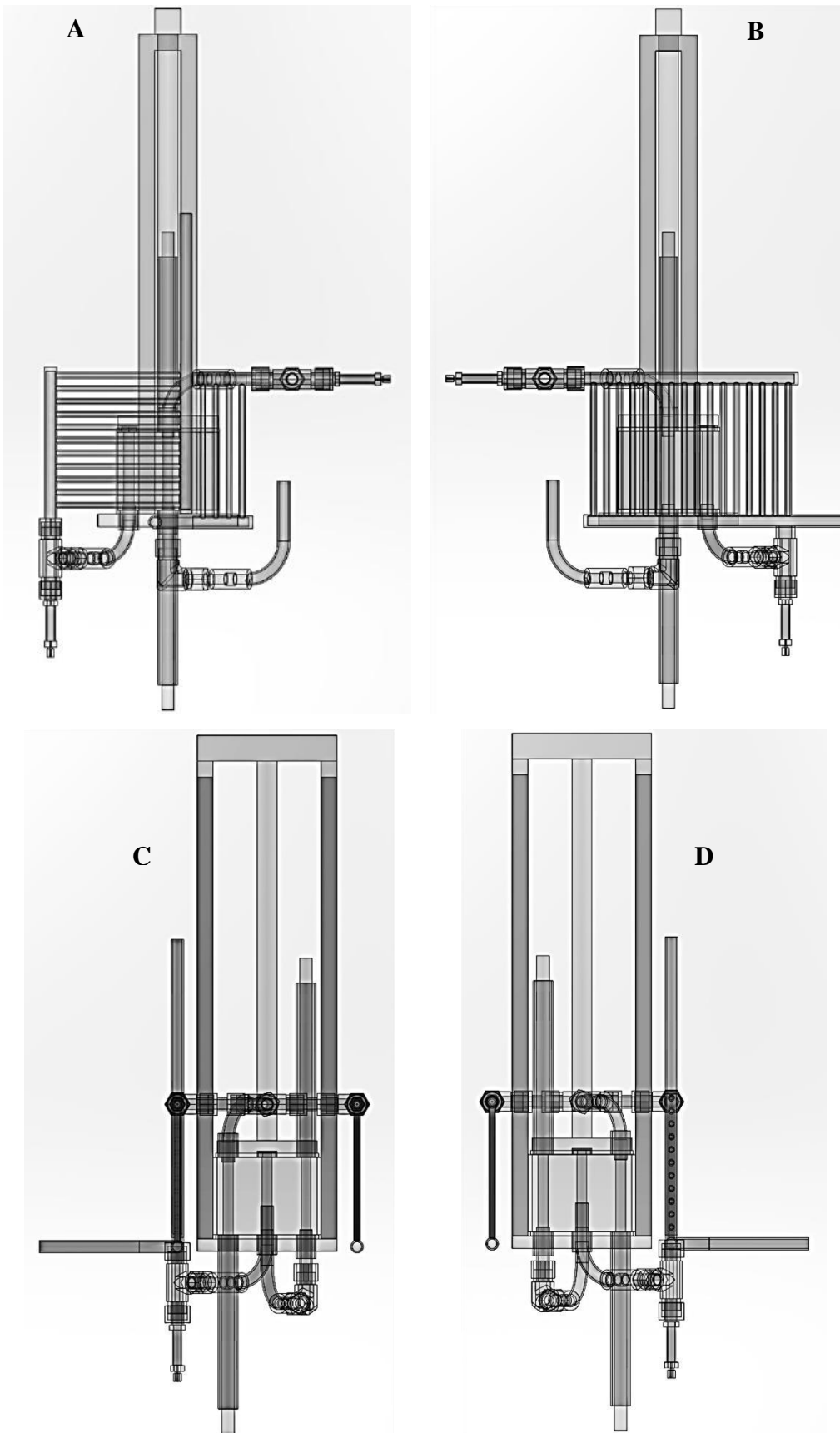


Figura 28 - Representação tridimensional da área de alta temperatura do sistema: vista lateral esquerda (A), lateral direita (B), frontal (C) e de trás (D).

Durante a operação do sistema, a face superior da PaCOS é carregada positivamente, estando o metal da placa que constitui o topo do empilhamento em contato elétrico direto com o catodo da primeira pilha da série. Conseqüentemente, foi necessário tomar cuidados particulares para isolar eletricamente essa parte do resto do sistema. Em primeiro lugar, a tubulação de entrada do combustível, que foi enroscada à placa, teve que ser fabricada com duas partes metálicas (aço) intercaladas com uma parte cerâmica (alumina) que garantiu o isolamento elétrico, como mostrado na Figura 29. Além disso, entre a face superior e o sistema de compressão foi colocada uma placa de mica, material isolante elétrico capaz de suportar temperaturas superiores à temperatura de operação do empilhamento. Placas do mesmo material foram posicionadas para proteção das faces laterais do empilhamento, com exceção da face onde ocorre a saída do ar. Tubos de mica foram também empregados para evitar o contato elétrico entre a placa metálica do sistema de compressão de um lado, e a tubulação de entrada do combustível e coletor elétrico positivo do outro. Os componentes de mica podem ser vistos na Figura 26 (partes mais claras na proximidade do empilhamento).



Figura 29 - Tubulação de entrada do combustível no empilhamento.

#### **4.2.2. Trocadores de calor**

Como mencionado anteriormente, o projeto dos trocadores de calor foi efetuado em conjunto com o da área de alta temperatura do sistema. Na Tabela 3 aparecem os dados de projeto dos três trocadores de calor.



Tabela 3 - Dados de projeto dos trocadores de calor.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
<b>Trocadores de calor</b>			
Diâmetro externo coletores	$d_{ext,c}$	0,5	[“]
Diâmetro externo tubos paralelos	$d_{ext,t}$	0,25	[“]
Espessura parede coletores	$e_{t,c}$	0,05	[“]
Espessura parede tubos paralelos	$e_{t,t}$	0,05	[“]
Largura casco	$l$	20	[mm]
Altura casco	$a$	150	[mm]
<b>Evaporador etanol</b>			
Vazão de fluido frio na entrada	$\dot{V}_{C_2H_6O}$	4,5	[ml/min]
Temperatura do fluido frio na entrada	$T_{C_2H_6O,e}$	30	[°C]
Temperatura do fluido frio na saída	$T_{C_2H_6O,s}$	300	[°C]
Configuração de fluxos	-	Fluxo cruzado	-
<b>Evaporador água</b>			
Vazão de fluido frio na entrada	$\dot{V}_{H_2O}$	9,5	[ml/min]
Temperatura do fluido frio na entrada	$T_{H_2O,e}$	30	[°C]
Temperatura do fluido frio na saída	$T_{H_2O,s}$	200	[°C]
Configuração de fluxos	-	Fluxo cruzado	-
<b>Pré-aquecedor ar</b>			
Vazão de fluido frio na entrada	$\dot{V}_{ar}$	30	[NI/min]
Temperatura do fluido frio na entrada	$T_{ar,e}$	30	[°C]
Temperatura do fluido frio na saída	$T_{ar,s}$	200	[°C]
Configuração de fluxos	-	Contracorrente	-

As características físicas dos trocadores foram em larga parte influenciadas pela configuração geométrica escolhida pela integração dos mesmos na área de alta temperatura: de fato, o isolamento térmico externo da área de alta temperatura e a caixa de contenção do empilhamento constituíram as paredes do casco dos trocadores de calor. Outro fator importante no projeto foi a disponibilidade do material necessário à construção dos trocadores e a viabilidade das técnicas de usinagem e soldagem

necessárias. Para garantir melhor resistência à oxidação em condições de alta temperatura, foram empregados tubos de aço inox AISI 316, disponíveis no mercado em diferentes formatos. Todavia, a necessidade de soldar com facilidade os tubos na configuração desejada impôs o uso de um diâmetro externo mínimo de ¼” para os tubos paralelos e ½” para os coletores de entrada e saída.

O dimensionamento foi efetuado considerando os trocadores de calor na configuração de Figura 27, nas laterais da caixa de contenção do empilhamento, com cada lado recebendo metade do fluxo de gases quentes derivados das reações na pilha e na área de combustão interna à caixa. O pré-aquecedor de ar foi colocado em série ao evaporador de etanol, do mesmo lado da caixa, enquanto o evaporador de água, caracterizado por um fluxo de troca térmica maior do que a soma dos outros dois, está colocado do lado oposto. O resultado do dimensionamento dos trocadores de calor está reportado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado do dimensionamento dos trocadores de calor.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Evaporador etanol</b>		
Número de tubos paralelos	4	-
Comprimento coletores	60	[mm]
Comprimento tubos paralelos	130	[mm]
<b>Evaporador água</b>		
Número de tubos paralelos	4	-
Comprimento coletores	200	[mm]
Comprimento tubos paralelos	130	[mm]
<b>Pré-aquecedor ar</b>		
Número de tubos paralelos	11	-
Comprimento coletores	150	[mm]
Comprimento tubos paralelos	130	[mm]

O Anexo 3, o Anexo 4 e o Anexo 5 representam respectivamente os desenhos técnicos do evaporador de etanol, do evaporador de água e do pré-aquecedor de ar, enquanto no Anexo 6 aparecem os trocadores de calor fabricados.

### 4.2.3. Combustor

De acordo com a metodologia exposta no item 3.2.5, a primeira parte a ser desenvolvida foi o sistema de injeção e nebulização do etanol, necessário à obtenção de uma queima completa e estável do combustível. Subsequentemente, foi construída uma câmara de combustão de dimensões adequadas para conter a chama e canalizar os gases quentes resultantes da combustão.

#### → Injetor de etanol

Sendo as vazões consideradas no projeto relativamente pequenas foi necessário desenvolver um sistema de injeção e vaporização do etanol especialmente para a aplicação objeto dessa tese. Foram testadas várias soluções em sequência:

- **Aerógrafo.** Trata-se de um vaporizador de tinta para pintura de precisão. O aerógrafo é alimentado com ar comprimido, que gera um efeito Venturi, aproveitado para aspirar a tinta. A mistura de tinta e ar é subsequentemente ejetada da ponta do aerógrafo. A regulagem da vazão de tinta é obtida movimentando uma agulha que obstrui parcialmente o bico de saída da tinta. Na aplicação do projeto, o etanol é alimentado no lugar da tinta, sendo aspirado pela vazão de ar comprimido. A vazão de etanol foi regulada ao valor desejado deslocando a agulha, que foi subsequentemente bloqueada na posição apropriada. Durante os testes foi possível obter uma vaporização satisfatória do etanol no ar. Foi, todavia, observada uma queda de pressão muito elevada causada pelo aerógrafo no fluxo de ar, em torno de 1 bar. Essa queda de pressão foi considerada excessiva, sendo diretamente relacionada ao consumo energético do soprador utilizado para comprimir o ar. No intuito de reduzi-la, foram feitas outras mudanças no aerógrafo, como a modificação da entrada do ar, mas não foi possível obter um funcionamento satisfatório em termos de eficácia de vaporização e queda de pressão.
- **Injetor customizado.** A segunda tentativa foi produzir uma peça usinada, com furos de distribuição do ar e para alojar um *gigleur* para vaporizar o etanol. Depois de alguns testes preliminares essa solução foi também descartada, devido à impossibilidade de achar no mercado um *gigleur* de dimensões adequadas às vazões.
- **Pistola para tinta.** Esse sistema é muito semelhante à estrutura do aerógrafo, mas é projetado para vazões maiores. Foram testados diferentes bicos para a pistola, identificando o componente mais adequado para a situação: utilizando esse

equipamento foi possível obter uma nebulização satisfatória do etanol, garantindo ao mesmo tempo uma perda de pressão do ar de cerca 200 mbar. Como consequência, essa foi a solução escolhida para prosseguir às etapas subsequentes.

#### → **Câmara de combustão**

Como mencionado no item 3.2.5, a câmara de combustão projetada compreende duas áreas principais:

- **Área de vaporização.** Nessa parte da câmara acontece a vaporização do etanol nebulizado, graças ao fluxo de calor proveniente da área de combustão. As paredes da câmara permanecem frias durante a operação do combustor, devido ao calor latente de vaporização que o etanol absorve do ambiente ao redor. Na extremidade final da tubulação, logo antes da área de combustão, foi necessário colocar uma rede metálica, com o intuito de distribuir uniformemente o etanol, criando uma mistura homogênea de combustível e comburente capaz de queimar de forma estável. De fato, nos testes sem esse componente evidenciaram-se problemas de instabilidade da chama, com oscilações consideráveis da posição da mesma. Além disso, a rede metálica favorece também a ignição da queima. Foram também inseridos no comprimento da área de vaporização dispositivos de aquecimento, para fornecer o calor necessário à vaporização do etanol em ausência de combustão na câmara, permitindo assim o começo da combustão em condição de combustor frio. No decorrer dos testes verificou-se a impossibilidade de iniciar a combustão sem esses componentes, mas uma vez iniciada a combustão o aquecimento adicional pode ser desligado, sendo o calor necessário à vaporização fornecido pela combustão estável realizada na área de combustão. Os dispositivos empregados para o aquecimento prévio foram velas de preaquecimento de motor diesel, escolhidas pelo baixo preço e a facilidade de aquisição.
- **Área de combustão.** Essa parte é constituída de uma porção cilíndrica, de diâmetro maior que a área de vaporização, e de dois componentes cônicos, que a conectam de um lado à área de vaporização e do outro ao restante do sistema. É a parte da câmara onde a mistura de ar e vapor de etanol queima de forma estável e continua. A primeira seção cônica da área de combustão hospeda também a vela de centelha utilizada para iniciar a combustão, localizada na imediata vizinhança da rede metálica. Foi empregada uma vela de motor de aeromodelo, de dimensões reduzidas. O diâmetro e o comprimento da área cilíndrica de combustão foram estimados de

acordo com as equações (45) - (49), a partir dos dados de projeto listados na Tabela 5, que contém também os resultados do dimensionamento. A pressão de entrada da câmara foi fixada como compromisso entre o gasto energético da compressão do ar e o tamanho da câmara, que aumenta com a diminuição da perda de pressão de projeto.  $T_{comb}$  foi considerada um pouco maior do valor ambiente para tomar em conta o aquecimento devido à compressão do ar. A vazão de ar e o valor de  $\lambda_{comb}$  foram escolhidos de acordo com os critérios mencionados no item 3.2.5. Foram também escolhidos valores de eficiência de combustão  $\eta_{comb}$  e temperatura mínima desejada dos gases de saída do combustor  $T_{comb,min}$  considerados adequados.

A câmara de combustão foi construída em aço inox, utilizando para o corpo principal 200 mm de tubo de 3" de diâmetro externo e 2 mm de espessura de parede, o mais próximo às dimensões que foi encontrado no mercado. O desenho técnico da câmara de combustão projetada é mostrado no Anexo 7. Próximo da saída da câmara foram colocados um termopar e uma sonda lambda, um sensor utilizado para medir o valor real de  $\lambda_{comb}$ : quando a mistura é pobre ( $\lambda_{comb} > 1$ ), o sinal de tensão da sonda é cerca de 0; quando a mistura é rica ( $\lambda_{comb} < 1$ ), o sinal tende a 1 V.

Tabela 5 - Dados de projeto e resultados do dimensionamento da área de combustão.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
<b>Dados de projeto</b>			
Pressão na entrada da câmara de combustão	$p_{comb}$	200	[mbar]
Temperatura na entrada da câmara de combustão	$T_{comb}$	30	[°C]
Vazão mássica do ar alimentada	$\dot{m}_{ar,comb}$	25	[Nl/min]
Relação entre razão etanol/ar estequiométrica e real	$\lambda_{comb}$	1,5	-
Eficiência da combustão	$\eta_{comb}$	> 98	%
Temperatura mínima dos gases de saída	$T_{comb,min}$	850	[°C]
<b>Resultados do dimensionamento</b>			
Diâmetro da câmara de combustão	$d_{tc}$	60,26	[mm]
Comprimento da câmara de combustão	$l_{zc}$	183,79	[mm]
Temperatura máxima teórica dos gases de saída	$T_{comb,max}$	1895	[°C]

#### 4.2.4. Conversor CC/CC

A Tabela 6 contém os dados de projeto do conversor CC/CC e o dimensionamento teórico dos componentes das duas topologias consideradas para a realização do equipamento, com valores arredondados por excesso à unidade.

Tabela 6 - Dados de projeto e resultados do dimensionamento do conversor CC/CC.

Dados de projeto								
Parâmetro	Símbolo	Valor			Unidade			
Potência de entrada e saída	$P_{CC/CC}$	750			[W]			
Frequência de chaveamento	$f_c$	30			[kHz]			
Tensão de entrada máxima	$V_{e,max}$	35			[V]			
Tensão de entrada mínima	$V_{e,min}$	15			[V]			
Tensão de saída máxima	$V_{s,max}$	28			[V]			
Tensão de saída mínima	$V_{s,min}$	19,2			[V]			
Oscilação de tensão máxima	$\Delta V$	1			[V]			
Indutância dos indutores	$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3}$	20			[μH]			

Resultados do dimensionamento								
Tipo	Variável	<i>Buck-boost</i>			<i>Boost+buck</i>			Unidade
	Número do componente	1	2	3	1	2	3	-
Indutores L	Indutâncias	20	20	-	20	20	20	[μH]
	Corrente máxima	108	58	-	31	31	46	[A]
	Tensão máxima	63	63	-	35	35	28	[V]
Diodos D	Corrente máxima	108	-	-	26	26	25	[A]
	Tensão máxima	63	-	-	28	28	35	[V]
Capacitores C	Capacitância (valor comercial)	470	470	470	430	430	62	[μF]
	Corrente máxima	108	108	108	31	31	47	[A]
	Tensão máxima	63	63	63	35	35	35	[V]

Os dados de projeto foram fixados considerando na entrada um empilhamento de 30 pilhas (o *SOFCCMan NIMTE-A-STACK-301* escolhido para integração no sistema) e na

saída um banco de baterias de tensão nominal de 24 V<sub>CC</sub> (ver item 4.2.5 sobre a determinação da tensão). Como indicado no item 3.2.6, o valor das indutâncias foi mantido limitado para viabilizar a construção do conversor na prática (indutores de valor maior resultam em tamanho e peso excessivo).

Para avaliar o desempenho das topologias em termos de eficiência energética, indicada com  $\eta_{CC/CC}$ , e de oscilação da corrente de entrada e saída, as duas alternativas foram simuladas computacionalmente para diferentes valores do estado de carga das baterias (associados a diferentes níveis de tensão das mesmas) e uma potência produzida pelo empilhamento de 750 W, igual ao valor máximo de projeto. A eficiência elétrica é definida como razão entre a potência na saída ( $P_s$ ) e na entrada ( $P_e$ ) do conversor, de acordo com a equação (74):

$$\eta_{CC/CC} = P_s/P_e \quad (74)$$

Os resultados obtidos na simulação estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da simulação em *Matlab-Simulink* dos conversores CC/CC.

Variável	<i>Buck-boost</i>					<i>Boost+buck</i>					Unidade
	1	25	50	75	99	1	25	50	75	99	
Estado de carga das baterias	1	25	50	75	99	1	25	50	75	99	[%]
$\eta_{CC/CC}$	82,1	89,5	89,4	89,7	90,3	92,1	93,8	93,9	94	94,3	[%]
$\Delta I$ na entrada	560	600	730	740	750	10	50	50	50	50	[mA]
$\Delta I$ na saída	14	11	10	10	11	0,6	2,5	2,5	2,5	2,5	[mA]

Como é possível ver nos esquemas da Figura 7 e da Figura 8, o conversor CC/CC *boost+buck* requer mais componentes que o *buck-boost*, necessitando de mais duas chaves, dois diodos e um indutor. Por outro lado, os componentes usados no conversor *boost+buck* precisam sustentar correntes e tensões máximas menores, como é possível verificar na Tabela 6. Conseqüentemente, pode-se esperar que o custo de produção das duas topologias não seja muito diferente, sendo a economia de componentes do *buck-boost* parcialmente compensada pelo maior custo de componentes que possam aguentar tensões e correntes maiores. No entanto, os resultados das simulações computacionais listados na Tabela 7 evidenciam como a opção *boost+buck* mostra-se superior à *buck-boost*, tanto do ponto de vista da eficiência energética, como do ponto de vista da redução das oscilações de corrente. Esse último aspecto resulta em

concordância com as informações da literatura, sendo mencionado como uma das principais vantagens da topologia *interleaved* [51, 52]. Ambos os fatores são de extrema importância no projeto do protótipo. De fato, a eficiência do conversor CC/CC tem uma forte influência sobre a eficiência total do sistema, dado que toda a energia elétrica produzida pelo empilhamento é convertida no dispositivo, sendo reduzida por conta das perdas no mesmo. Manter um baixo valor das oscilações de corrente na saída da PaCOS e na entrada das baterias é fundamental para garantir uma longa vida útil desses equipamentos, que representam as partes mais importantes e caras do protótipo. Em conclusão, a opção *buck+boost*, apesar de ser de construção mais complexa, é mais adequada para a aplicação e foi escolhida para a construção do conversor CC/CC [74].

O projeto completo de todos os detalhes e a realização prática do conversor foram executados em parceria com a *Tracel Veículos Elétricos*, empresa especializada em eletrônica de potência e parceira do Laboratório de Hidrogênio. Tomando em conta os resultados dos testes dos empilhamentos comerciais (ver item 4.3.1), foi decidido de não incluir no conversor o estágio *buck* inicialmente previsto. De fato, esse estágio seria necessário unicamente para diminuir gradativamente a tensão do empilhamento do nível de circuito aberto até o nível da bateria. A partir desse ponto, o estágio *boost* seria o único a funcionar, permitindo de baixar ainda mais a tensão do empilhamento. Todavia, os testes não evidenciaram particulares problemas pela PaCOS em descer rapidamente da tensão de circuito aberto até a tensão das baterias. Inclusive, esse rápido transiente seria aplicado somente após a inicialização do sistema, evento bastante raro no funcionamento prático de um microgerador PaCOS em aplicações reais, sendo os transitórios de aquecimento e resfriamento demorados e associados com várias dificuldades operacionais (como é discutido na seção 5.3). O protótipo projetado foi então concebido para funcionar constantemente e como consequência, o estágio *buck* foi simplesmente substituído por um relé, controlado pelo *software* do sistema. Dessa forma, para iniciar a produção elétrica, foi suficiente fechar o relé, baixando instantaneamente a tensão do empilhamento ao nível das baterias. Essa solução, além de simplificar a topologia do conversor, permite aumentar a eficiência do mesmo, evitando as perdas relacionadas com a chave e o indutor no estágio *buck*. No Anexo 8 é mostrado o esquema elétrico do conversor, enquanto no Anexo 9 são mostrados frente e verso da placa realizada. No projeto foi incluída uma placa de amostragem (esquema no Anexo 10), utilizada para medir tensão e corrente na entrada e na saída do conversor.



#### 4.2.5. Banco de baterias

A Figura 30 mostra os resultados da atualização e da amplificação da curva de carga, enquanto a Figura 31 contém os resultados do cálculo da potência fornecida (ou absorvida) pelas baterias e da carga armazenada nas mesmas ao longo de um dia padrão. Como discutido no item 3.2.8, a média horária da potência que entra ou sai das baterias é obtida subtraindo ao perfil de carga a potência útil constante produzida pelo empilhamento (500 W). Em cada hora, a energia associada a essa potência média incrementa ou decrementa a energia acumulada no banco de baterias  $E_{bat}$ . Tomando isso em conta, foi possível construir a curva que descreve a variação do estado de carga das baterias ao longo do dia. No caso em que a energia acumulada inicialmente nas baterias seja nula, o valor de pico diário da energia acumulada  $E_{bat,pico}$  resulta igual a 2040 Wh, correspondente a uma capacidade do banco de baterias de 85 Ah. Esse é o valor mínimo de capacidade que o banco de baterias deve possuir para ser adequado à aplicação.

A tensão nominal do banco foi fixada em  $24 V_{CC}$ , valor pertencente à faixa de tensão de operação do empilhamento e adequado à alimentação direta da maior parte dos equipamentos auxiliares que compõem o BdP, com a exceção das velas de aquecimento e de centelha ( $12 V_{CC}$ ) e de alguns componentes do sistema de controle ( $5 V_{CC}$ ).

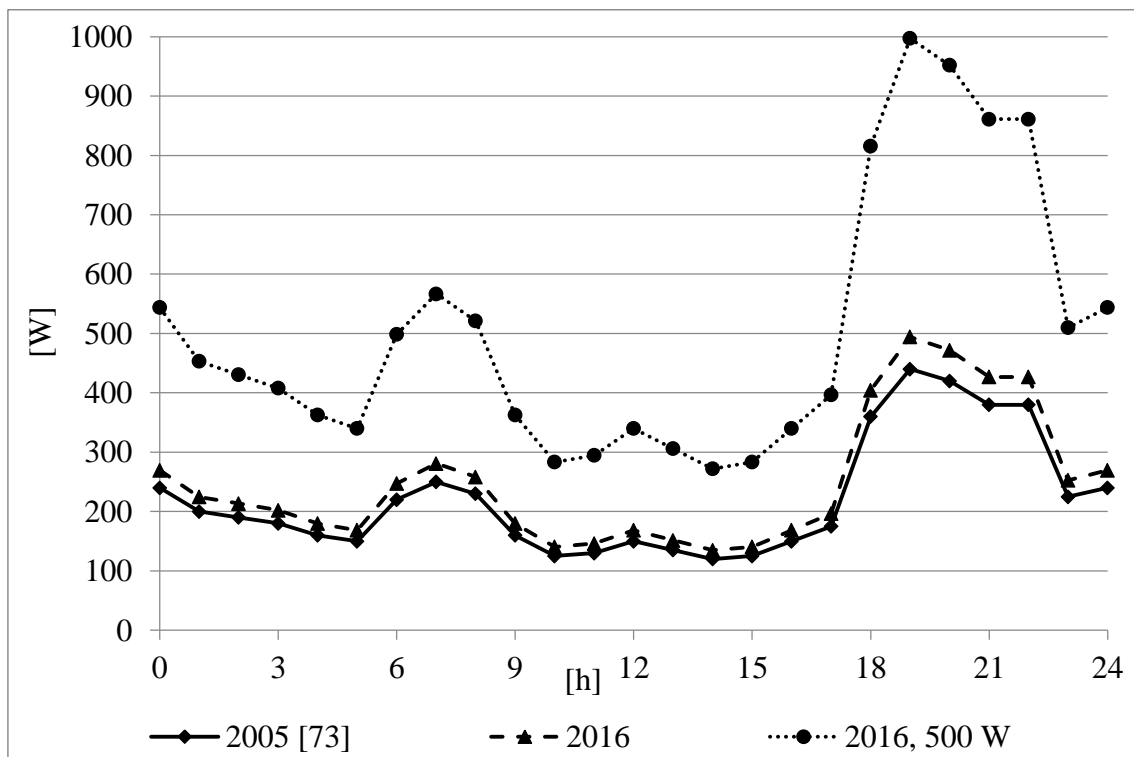


Figura 30 - Atualização e amplificação da curva de carga diária obtida na literatura.

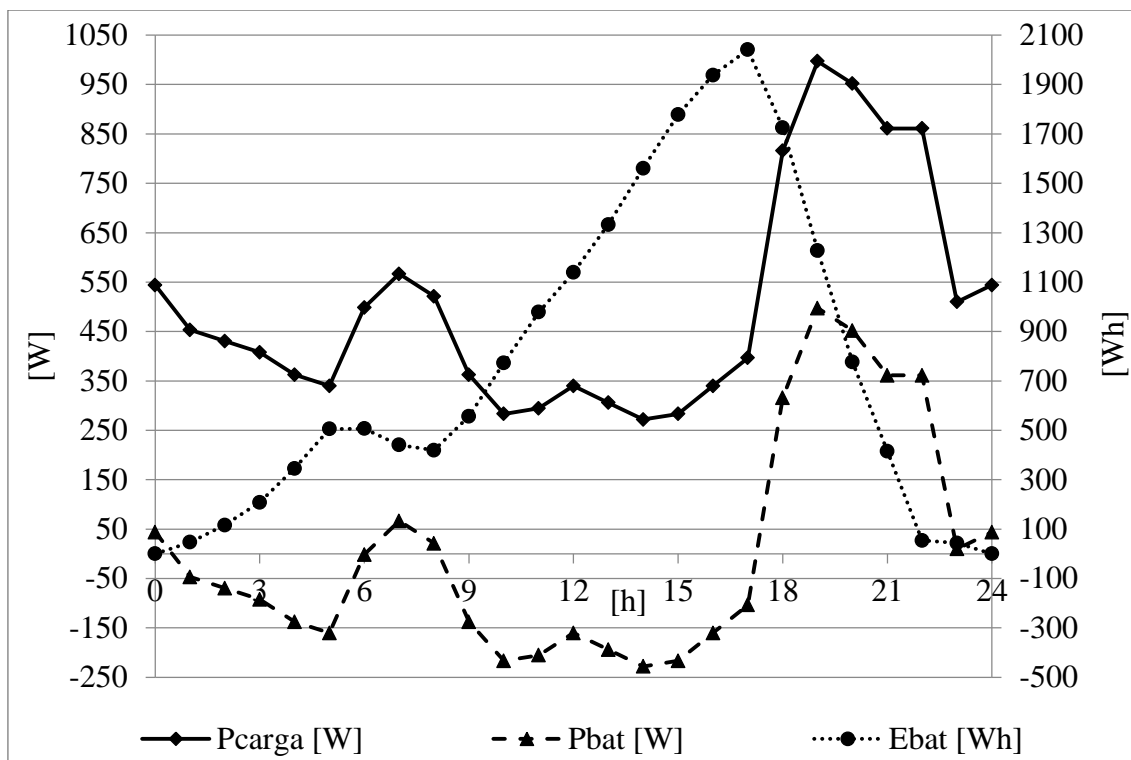


Figura 31 - Carga, potência fornecida pelo banco de baterias e energia armazenada no mesmo banco, ao longo de um dia padrão.

Por ser já disponíveis no Laboratório de Hidrogênio, as baterias escolhidas para compor o banco foram da marca *ThunderSky*, modelo *TS-LYP160AHA*. Para chegar a 24 V<sub>CC</sub> de tensão nominal, foram necessários 7 módulos. Essas baterias são caracterizadas por uma capacidade igual a quase o dobro do valor mínimo calculado, sendo mais que adequadas à aplicação. Sendo da tecnologia íon-lítio, são também caracterizadas por um valor muito elevado de corrente máxima. Os dados principais do banco de baterias empregado no protótipo são listados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características de um banco de 7 unidades da bateria *TS-LYP160AHA*.

Parâmetro	Valor	Unidade
Capacidade $\Delta E_{bat}$	160	[Ah]
Tensão mínima	19,6	[V]
Tensão máxima	28	[V]
Corrente máxima	480	[A]
Corrente nominal	80	[A]

Cada bateria que compõe o banco foi equipada com um sistema de monitoramento e balanceamento *BMS-CM400*, para evitar sobrecarga da bateria individual.

#### **4.2.6. Sistema de controle**

A Figura 32 representa esquematicamente o conjunto de sensores do sistema de controle completo, incluindo manômetros, termopares, amperímetros, voltímetros, célula de carga e sonda lambda. Esses dispositivos transmitem vários tipos de sinais ao sistema *CompactRIO*, modelo *NI9082*, equipado de módulos capazes de enviar ou receber diferentes tipos de sinais analógicos e digitais. O *NI9082* por sua vez comunica via LAN com um computador, que constitui a interface homem/máquina do sistema. A Figura 33 relata em vez os atuadores conectados ao sistema de controle, principalmente relés colocados na linha de alimentação dos diferentes componentes do sistema (eletroválvulas, motor de passo, velas de aquecimento e ignição, soprador e bombas) ou na interface entre empilhamento e conversor CC/CC. No esquema são também representados os sinais analógicos de controle do soprador, das bombas e do conversor CC/CC, além dos sinais digitais de controle do motor de passo. Para utilizar os sinais TTL 0 - 5 V<sub>CC</sub> gerados pelo *NI9082* para operar os relés e controlar o motor de passo, foi necessário desenvolver um quadro eletrônico de interface, mostrado no Anexo 11.

Muitas porções do sistema de controle foram projetadas inicialmente para operar o controle e as medições necessárias aos testes dos vários equipamentos, de acordo com os esquemas reportados na seção 3.3. Dessa forma, o sistema de controle evoluiu gradativamente, juntando as partes até alcançar o estágio de controle do sistema integrado. Um procedimento parecido foi aplicado para o desenvolvimento do *software* de controle, que foi realizado com a linguagem de programação *LabVIEW*. Grandes vantagens dessa linguagem são a facilidade de uso, a criação automática da interface homem/máquina junto com a lógica de controle e o fato de ser concebido especificadamente para trabalhar com o *hardware* empregado. O *software* desenvolvido é semiautomático, dependendo da presença de um operador para ajustar alguns parâmetros de controle. Em desenvolvimentos futuros será possível transformar o programa em uma rotina completamente automática de gerenciamento do protótipo. No Anexo 12 são mostradas algumas abas da interface homem/máquina do sistema de controle do protótipo.

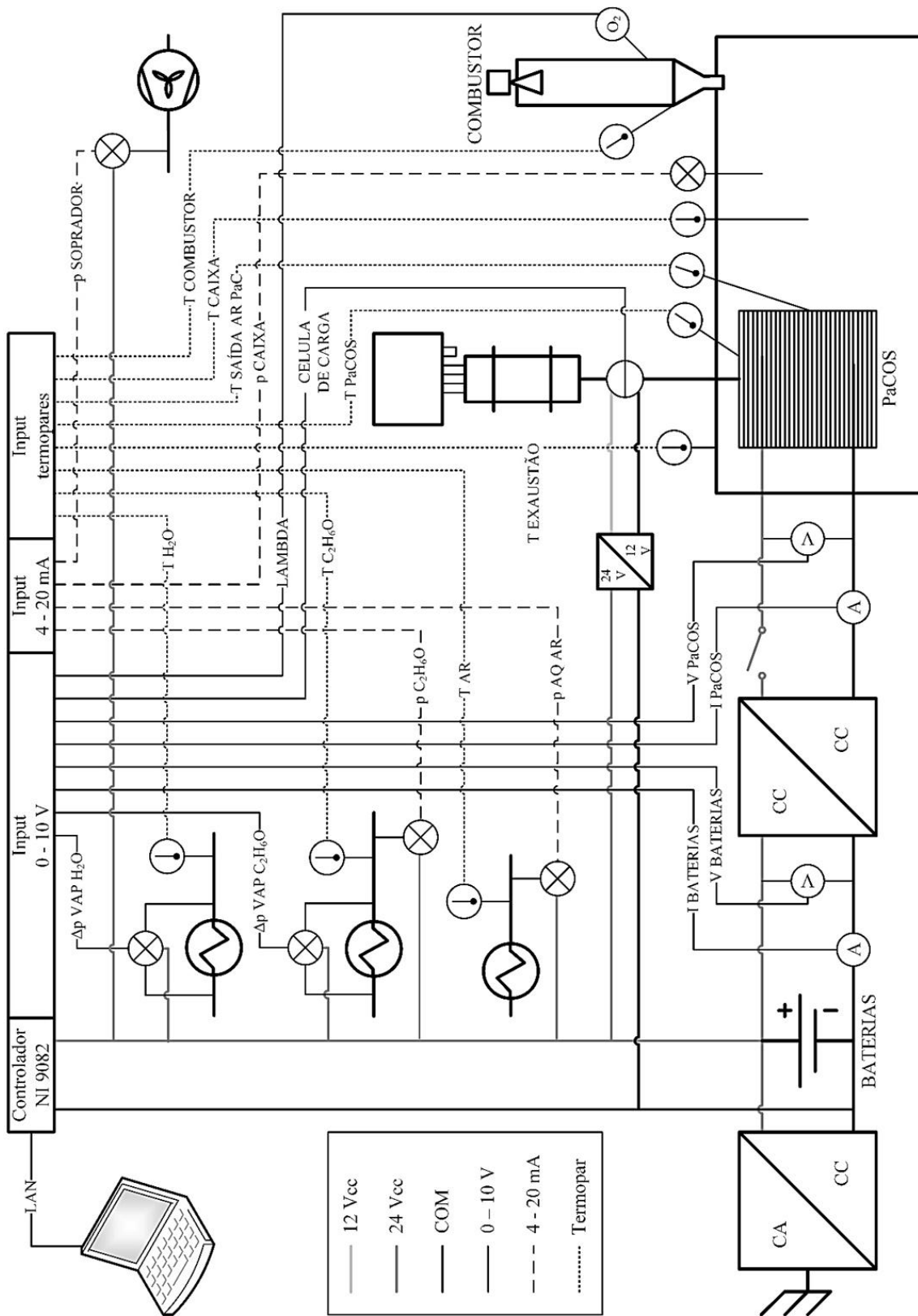


Figura 32 - Sensores do sistema de controle.

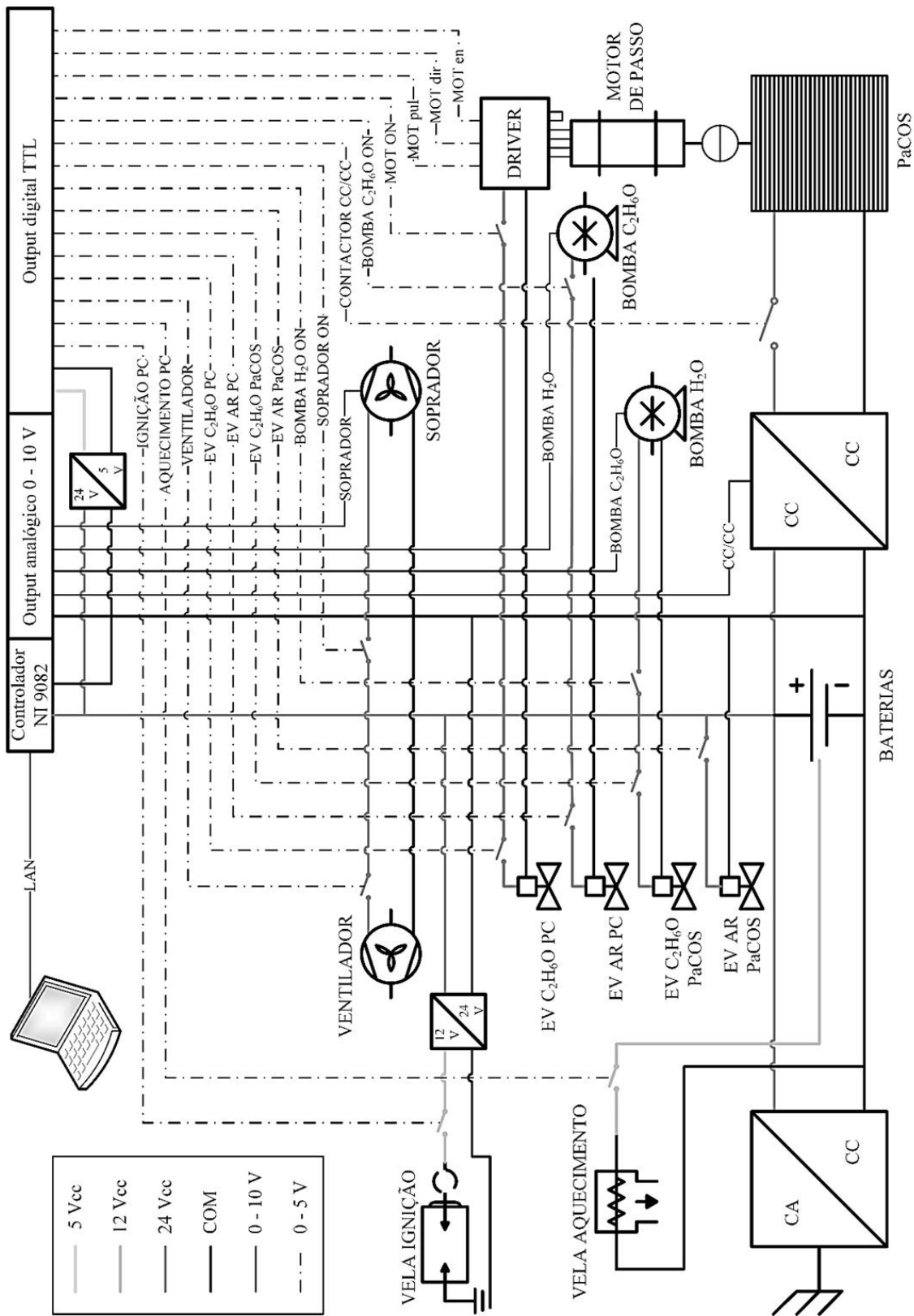


Figura 33 - Atuadores do sistema de controle.

Apesar do *software* ainda não ter alcançado o estágio de funcionamento completamente automático, nessa tese foi desenvolvida a lógica de funcionamento do sistema de controle, com especial atenção ao funcionamento da eletrônica de potência, componente essencial para atingir os objetivos do sistema de geração. Para definir essa lógica foram utilizados alguns parâmetros relacionados com o banco de baterias, dependentes da tecnologia escolhida para o mesmo. Os parâmetros que é necessário fixar são:

- **Carga mínima das baterias  $E_{min}$ .** É o valor mínimo de energia armazenada nas baterias  $E_{bat}$  que pode ser alcançado no funcionamento do sistema. Com o intuito de evitar problemas de descarga profunda, o valor de  $E_{min}$  fixado deve ser maior do que o mínimo absoluto permitido da carga das baterias. A margem de segurança entre  $E_{min}$  e esse mínimo absoluto depende do tipo de acumulador adotado.
- **Carga máxima das baterias  $E_{max}$ .** É o valor máximo de  $E_{bat}$  que pode ser alcançado no funcionamento do sistema.
- **Carga ótima das baterias (objetivo)  $E_{obj}$ .** É o valor de energia armazenada nas baterias que o sistema em funcionamento normal tenta manter constante. O valor desse nível depende da tecnologia das baterias, e está fixado de forma a maximizar a relativa vida útil, permitindo ao mesmo tempo um funcionamento adequado do sistema de geração. Com efeito, no funcionamento normal as baterias não podem se aproximar ao estado de carga mínima nem ao estado de carga máxima, porque em caso de falta da rede isso significaria a impossibilidade pelo sistema de absorver efetivamente as flutuações de potência da carga. No primeiro caso, se a carga permanecesse maior que a potência da PaCOS por um longo período de tempo, as baterias descarregariam muito rapidamente. No segundo caso, as baterias alcançariam em pouco tempo o estado de carga máxima no caso em que a carga fosse menor que a potência da PaCOS. A potência da pilha a combustível, que é igual à potência média do sistema de geração, foi escolhida com o intuito de igualar a potência média requerida pela carga. Isso significa que para minimizar a probabilidade dos eventos descritos acima, o valor de  $E_{obj}$  deveria ser aproximadamente igual ao 50 % de  $E_{max}$ , de modo a obter uma margem igual  $E_{max} - E_{obj}$  e  $E_{obj} - E_{min}$ . Todavia, alguns tipos de baterias sofrem de uma considerável redução da vida útil se o relativo estado de carga é mantido por muito tempo em determinados níveis. É então preciso incluir no cálculo de  $E_{obj}$  também considerações relativas às necessidades do banco de baterias.

- **Tempo máximo de inatividade  $t_{off}$ .** É o intervalo de tempo máximo para o qual a PaCOS pode permanecer na temperatura de operação sem produzir eletricidade (modo de espera).

Uma vez atribuído o valor apropriado aos parâmetros listados acima, a lógica de funcionamento definida prevê vários estados do sistema possíveis:

1. **Estado normal** (rede ligada,  $E_{bat} = E_{obj}$ ).

Toda a potência da pilha a combustível (500 W) passa pelo inversor, sendo fornecida às cargas e/ou à rede. É preciso fixar a saída do inversor ao valor de 500 W, de forma a manter o nível de carga das baterias constante. Em caso de falta da rede, o sistema passa a funcionar no estado de emergência 2. Para não danificar as baterias, um ciclo de carga/descarga 5 tem que ser aplicado a intervalos regulares, cuja duração é dependente da tecnologia das baterias utilizadas.

2. **Emergência** (rede desligada,  $E_{min} < E_{bat} < E_{max}$ ).

O inversor fornece a potência requerida às cargas. Nesse caso a potência transmitida pelo inversor segue as necessidades das cargas. Todavia, as cargas conectadas ao inversor não podem ter potência total superior à potência máxima do inversor. Se as baterias são completamente carregadas ou descarregadas, o sistema entra em funcionamento anormal 4. Se a rede volta a ser novamente disponível, o sistema entra no estado de pós-emergência 3.

3. **Pós-emergência** (rede ligada,  $E_{bat} \neq E_{obj}$ ).

Nesse caso a lógica de funcionamento tem duas opções:

- $E_{bat} < E_{obj}$ . A transferência de potência através do inversor é parada e as baterias são carregadas até o  $E_{obj}$  aproveitando da potência produzida pela PaCOS;
- $E_{bat} > E_{obj}$ . O inversor é ativado à máxima potência, fornecendo potência à rede e às cargas, até as baterias alcançarem a carga  $E_{obj}$ .

Uma vez que as baterias alcançam  $E_{obj}$ , o sistema passa ao estado normal 1.

4. **Estado anormal** (rede desligada,  $E_{bat} = E_{min}$  ou  $E_{bat} = E_{max}$ ).

Nesse caso a lógica de funcionamento tem duas opções:

- $E_{bat} = E_{min}$ , a transferência de potência através do inversor é parada, desatendendo às necessidades das cargas, e as baterias são carregadas até 20 % aproveitando da potência produzida pela PaCOS. Se, no entanto, a rede permanece indisponível, ao final da carga o sistema passa ao estado de

emergência 2. Se ao contrário a rede volta a ser presente, o sistema passa imediatamente ao funcionamento de pós-emergência 3;

- $E_{bat} = E_{max}$ , a produção de potência da PaCOS é suspensa, enquanto o inversor continua a satisfazer as cargas, absorvendo energia das baterias. Quando a carga das baterias desce abaixo de 80 % do total, a PaCOS é novamente ativada. No caso em que o tempo de inatividade da pilha a combustível supere  $t_{off}$ , a transferência de potência através do inversor é interrompida e é operada sequência de desligamento do sistema.

### 5. Ciclo de manutenção das baterias.

Como indicado na descrição do estado normal 1, é preciso operar periodicamente um ciclo de manutenção das baterias que compreende as seguintes etapas:

- a transferência de potência através do inversor é parada e as baterias são carregadas até  $E_{max}$  aproveitando da potência produzida pela PaCOS;
- o inversor é ativado à máxima potência, fornecendo potência à rede e às cargas, até as baterias serem completamente descarregadas (até  $E_{min}$ );
- a transferência de potência através do inversor é novamente parada e as baterias são carregadas até o  $E_{max}$  aproveitando da potência produzida pela PaCOS;
- o inversor é de novo ativado à máxima potência, fornecendo potência à rede e às cargas, até as baterias alcançar o estado de carga  $E_{obj}$ .

Na Figura 34 é apresentado um esquema da lógica de controle descrita.

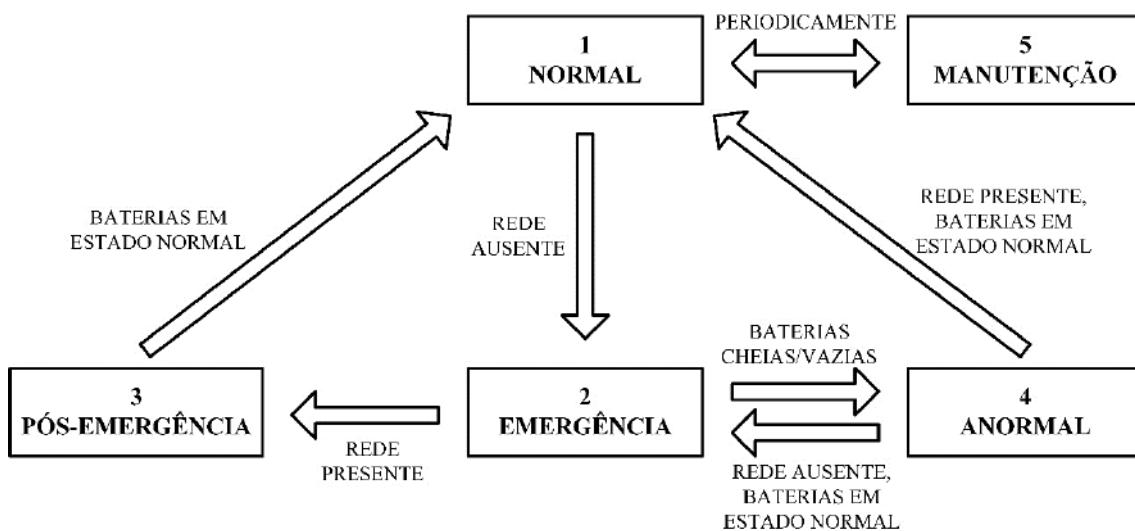


Figura 34 - Esquemático da lógica de controle da eletrônica de potência.



### 4.3. TESTES DOS COMPONENTES

#### 4.3.1. Empilhamentos PaCOS

O primeiro empilhamento testado foi o produzido pela *Almus AG*. Os resultados principais estão resumidos nos gráficos da Figura 35 e da Figura 36. Na Tabela 9 estão indicadas as temperaturas médias, mínima e máxima registradas durante a medição de cada curva. As curvas foram medidas uma depois da outra, em sequência. Uma vez terminados os testes, o sistema foi desligado, reduzindo a temperatura até a temperatura ambiente, circulando no lado anódico uma vazão de nitrogênio de 0,3 NI/min para evitar a reoxidação do anodo. Nas sessões de testes seguintes, os empilhamentos apresentaram uma rápida deterioração no funcionamento com hidrogênio, inviabilizando a obtenção de dados significativos sobre o funcionamento do mesmo com etanol como combustível.

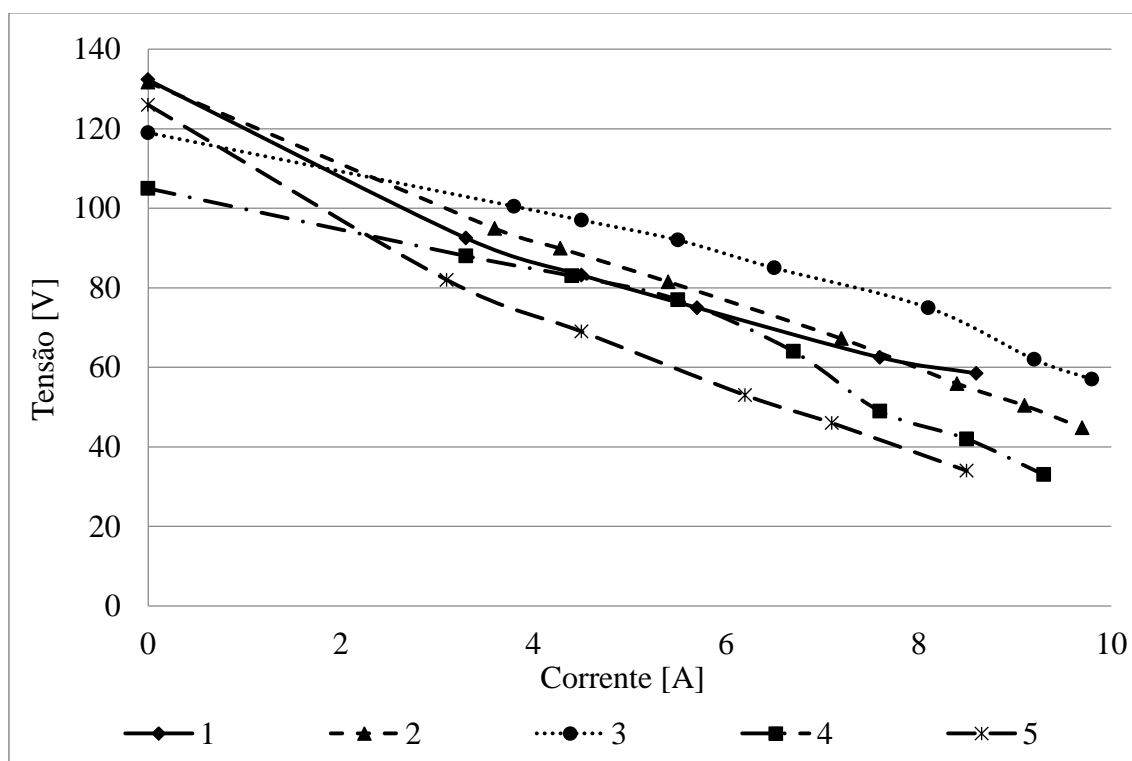


Figura 35 - Curvas de polarização medidas na operação do empilhamento *Almus AG*.

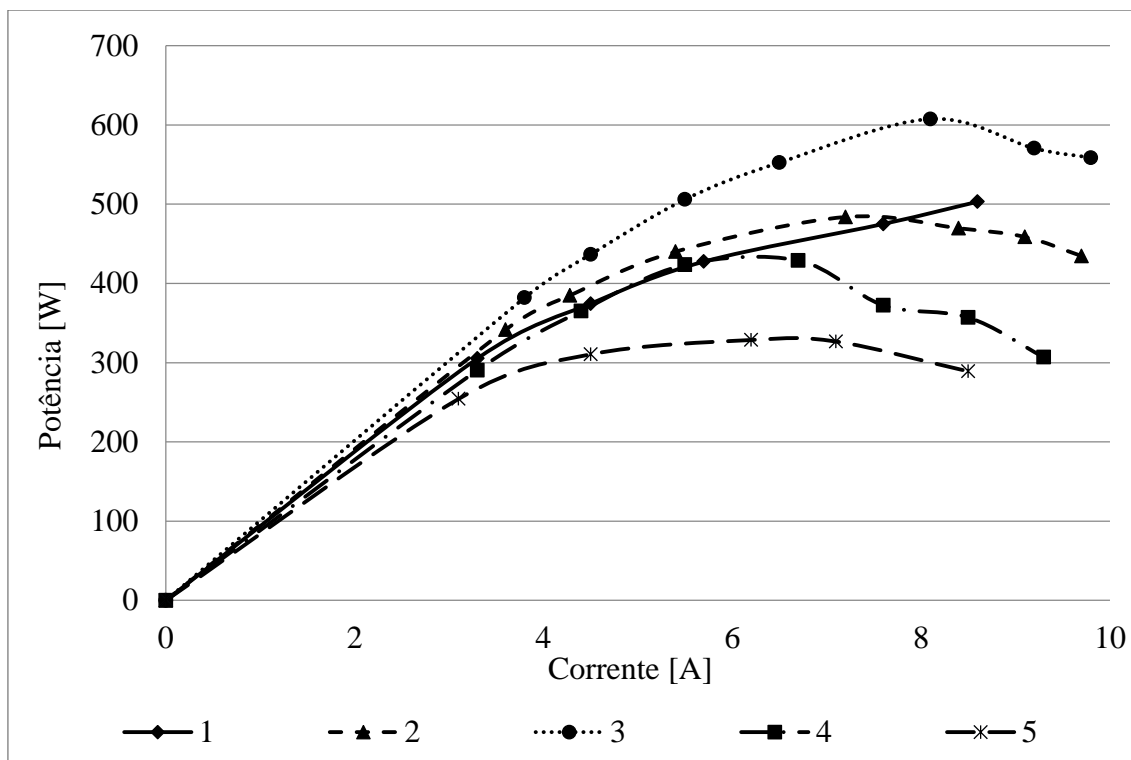


Figura 36 - Curvas de potência medidas na operação do empilhamento *Almus AG*.

Tabela 9 - Resultados dos testes do empilhamento *Almus AG*.

Curva	1	2	3	4	5	Unidade
Temperatura mínima	605	692	757	851	655	[°C]
Temperatura máxima	653	709	780	876	685	[°C]
Vazão de hidrogênio	12	12	12	10	12	[NI/min]
Vazão de ar	33,6	33,6	33,6	28	33,6	[NI/min]
Perda de pressão anodo	38,7			33	33	[mbar]
Perda de pressão catodo	194			147	188	[mbar]
Eficiência elétrica máxima	23,3	22,4	28,1	23,8	18,2	[%]

Para obter mais detalhes sobre as possíveis causas da degradação do sistema, uma vez concluídos os testes o mesmo foi desmontado. Um dos empilhamentos foi aberto e as pilhas analisadas. Na Figura 37 são representadas fotografias das pilhas investigadas: as pilhas (A) e (B) foram desmontadas da parte superior do empilhamento; as pilhas (C) e (D) foram desmontadas da parte inferior do mesmo. As pilhas da parte superior do empilhamento mostraram-se muito danificadas, quebradas, reduzidas em pedaços ou com eletrodos descolados do eletrólito. As pilhas da parte inferior do empilhamento, ao

contrário, mostraram-se relativamente íntegras, com apenas leves danos, provavelmente mesmo provocados pelo processo de desmontagem.

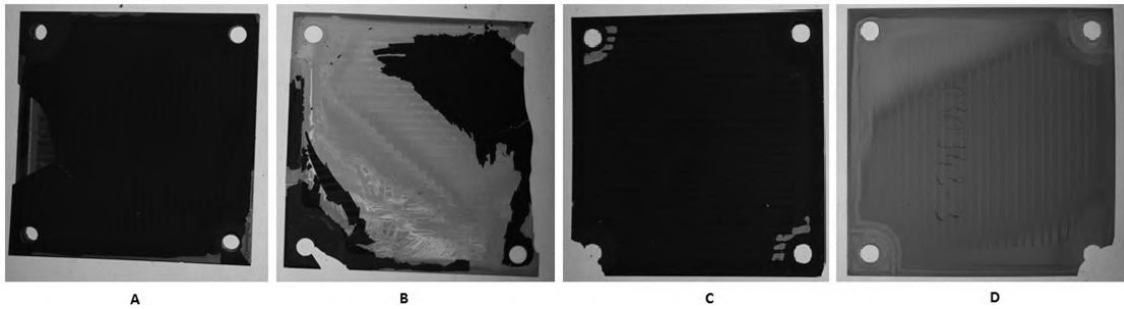


Figura 37 - Pilhas a combustível desmontadas do empilhamento da *Almus AG*.

Os principais resultados obtidos nos testes do segundo modelo de empilhamento, o *SOFCSMan NIMTE-A-Stack-301*, são resumidos na Figura 38, na Figura 39 e na Tabela 10. Em total, são relatados os resultados de seis testes, quatro com hidrogênio ( $H_2$  (1) - (4)) e dois com etanol ( $C_2H_6O$  (1) - (2)), realizados na sequência indicada na Tabela 10 (a partir da segunda coluna até a sétima coluna).

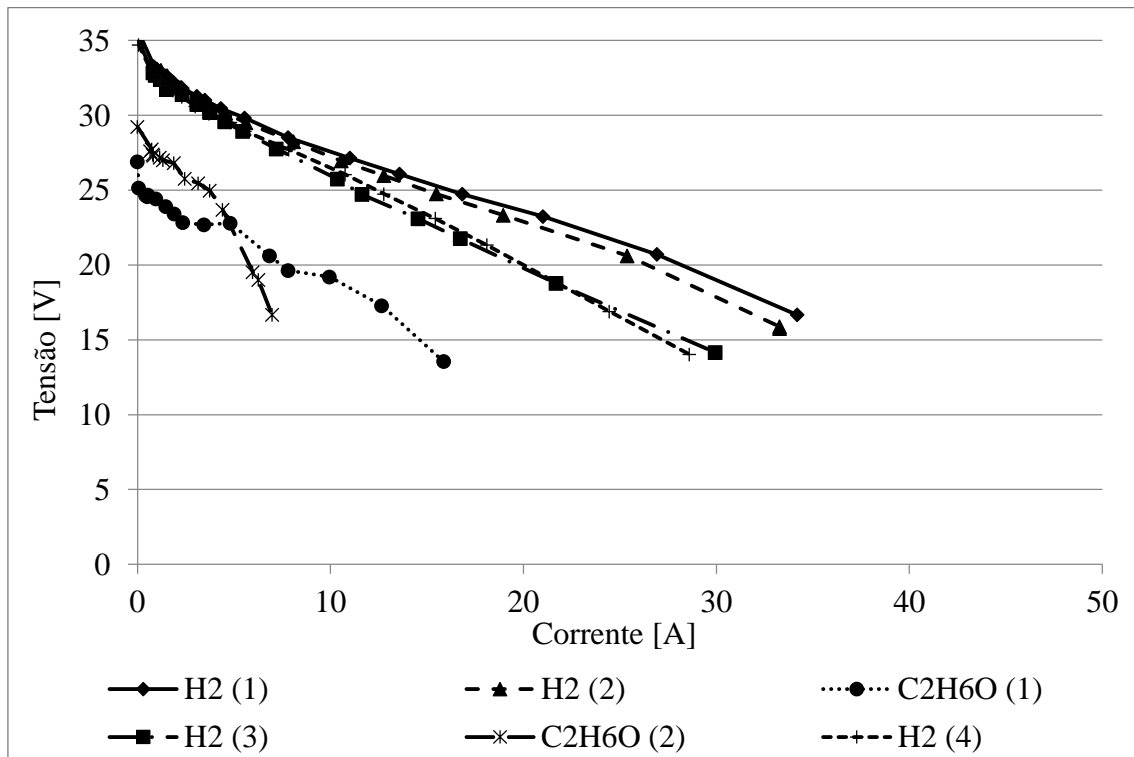


Figura 38 - Curvas de polarização medidas na operação do primeiro empilhamento *SOFCSMan NIMTE-A-Stack-301*.

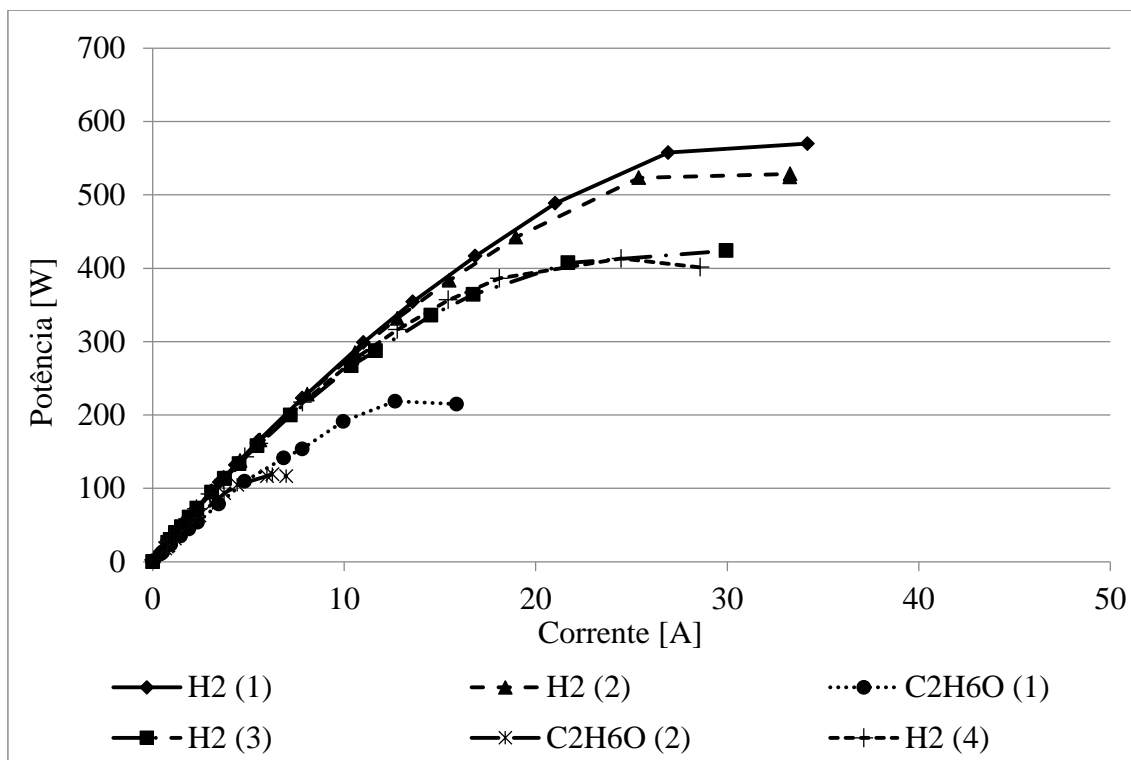


Figura 39 - Curvas de potência medidas na operação do primeiro empilhamento SOFCMan NIMTE-A-Stack-301.

Tabela 10 - Resultados dos testes do primeiro empilhamento NIMTE-A-STACK-301.

Variável	H <sub>2</sub> (1)	H <sub>2</sub> (2)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (1)	H <sub>2</sub> (3)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (2)	H <sub>2</sub> (4)	Unidade
Temperatura do empilhamento	756	756	755	755	770	766	[°C]
Temperatura de entrada ar	33	36	36	36	33	35	[°C]
Temperatura de entrada combustível	336	325	446	325	502	350	[°C]
Vazão hidrogênio	9,5	9,5	-	9,5	-	9,5	[NI/min]
Vazão etanol	-	-	1,6	-	1,6	-	[ml/min]
Vazão água	-	-	2	-	2	-	[ml/min]
Vazão ar	25						[NI/min]
Perda de pressão anódica	15	23	16	8	3	13	[mbar]
Perda de pressão catódica	12	8	8	8	12	12	[mbar]
Eficiência elétrica	34	30,8	36	24,8	25,6	23,8	[%]

No começo da sessão de teste, foram aplicadas as vazões de ar e hidrogênio que permitiram obter a máxima potência elétrica. Feito isso, foram realizadas algumas

tentativas de operação com uma mistura etanol/água no lugar do hidrogênio. Inicialmente, não foi possível alcançar um funcionamento estável do empilhamento nessa condição. Reduzindo a quantidade de água alimentada foi possível medir algumas curvas de polarização também utilizando etanol como combustível. Depois de cada período de funcionamento com etanol, o empilhamento foi realimentado com hidrogênio, efetuando medições para detectar a possível degradação do dispositivo. O desempenho medido foi decaindo ao longo dos testes, tanto em termos de potência máxima quanto de eficiência elétrica do empilhamento.

Devido à marcada piora do desempenho do primeiro exemplar, foi decidido de executar a montagem do protótipo com a segunda unidade do *NIMTE-A-STACK-301* adquirida. Todavia, essa também foi testada preliminarmente em bancada, para obter alguns dados de funcionamento a comparar com o desempenho obtido no sistema completo. Primeiramente foram medidas quatro curvas de polarização e de potência, reportadas na Figura 40 e na Figura 41. As curvas foram medidas uma depois da outra, nas condições listadas na Tabela 11, que contém também os valores de eficiência máxima, obtidos em correspondência dos pontos de maior potência. Para esse empilhamento, todos os testes de bancada foram feitos alimentando com hidrogênio, para não correr o risco de danificar o empilhamento antes de monta-lo no protótipo. É possível notar que o aumento da vazão de hidrogênio provocou um marcado aumento da potência máxima produzida pelo empilhamento (IV curva), mantendo ao mesmo tempo valores de eficiência parecidos ao melhor resultado obtido com a vazão mais baixa (I curva). A variação da vazão de ar parece ter o efeito oposto, provocando uma redução da eficiência do empilhamento quando aumentada.

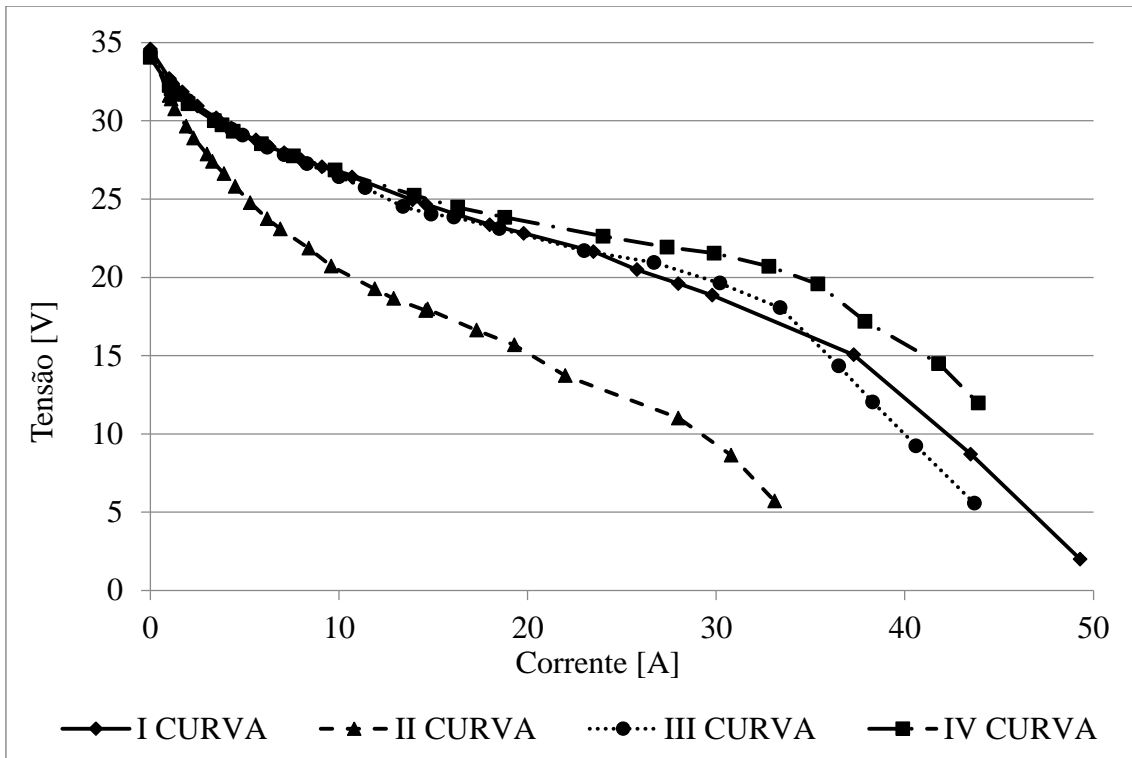


Figura 40 - Curvas de polarização medidas na operação do segundo empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301*.

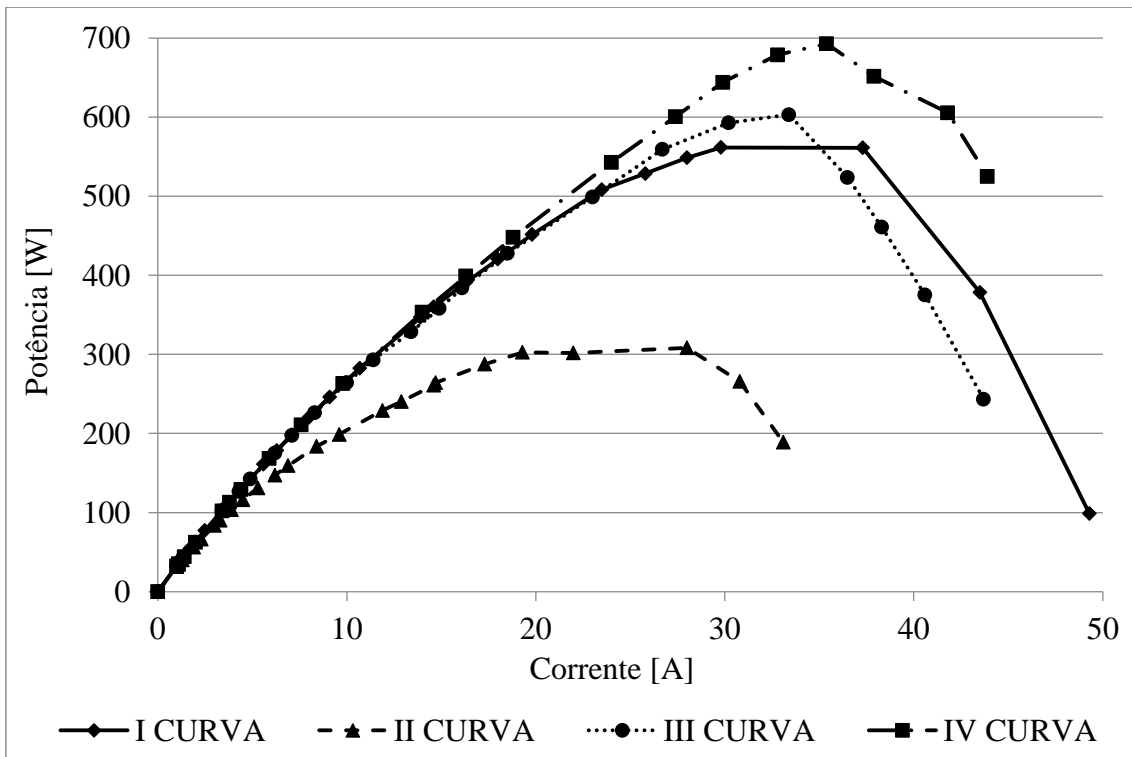


Figura 41 - Curvas de potência medidas na operação do segundo empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301*.

Tabela 11 - Condições de teste do segundo empilhamento *NIMTE-A-STACK-301*.

Curva	I	II	III	IV	Unidade
Temperatura PaCOS	767	739	766	743	[°C]
Vazão de hidrogênio	8	8	8	10	[NI/min]
Vazão de ar	24	29,5	19,8	19,8	[NI/min]
Eficiência elétrica máxima	39,05	21,43	41,93	38,53	[%]

Para investigar de forma mais detalhada a influência das vazões de combustível e oxidante sobre o funcionamento do empilhamento, foram efetuados testes adicionais, variando separadamente as vazões dos dois reagentes: enquanto foi mudada a vazão de um, a do outro foi mantida fixa (igual respectivamente a 10 NI/min para o H<sub>2</sub> e 22,6 NI/min para o ar). Os gráficos da Figura 42 e da Figura 43 mostram o efeito das vazões sobre potência e eficiência do empilhamento.

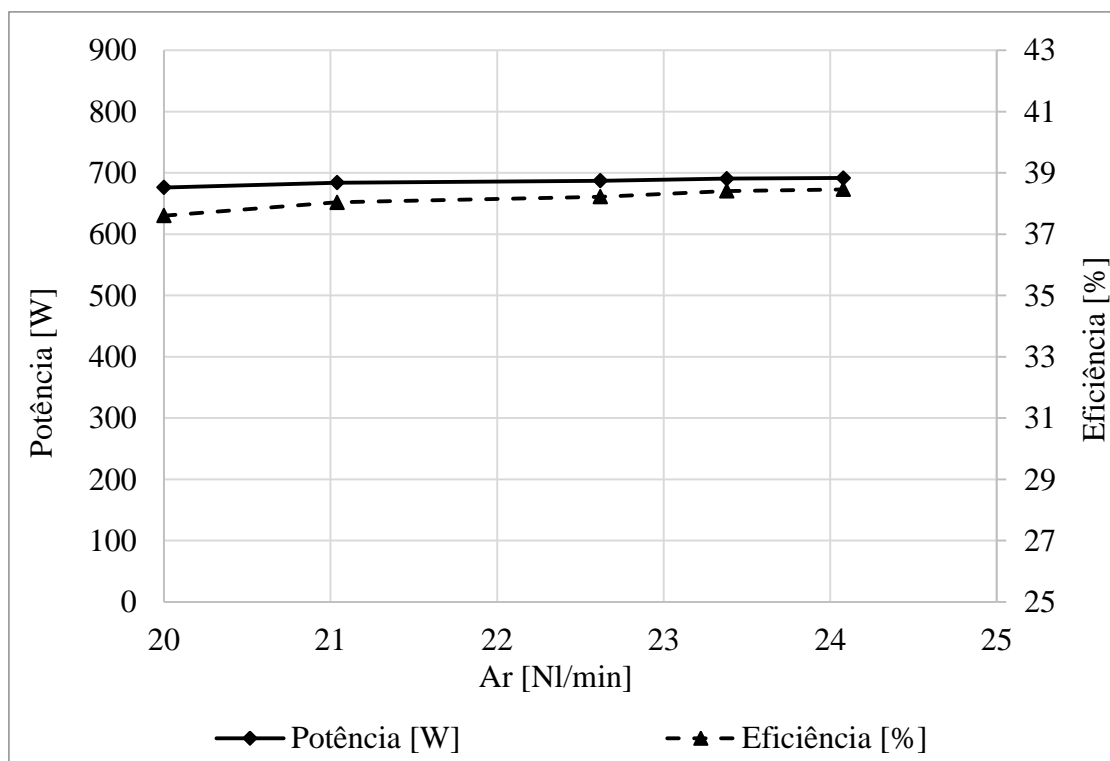


Figura 42 - Potência e eficiência do segundo empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* em função da vazão de ar.

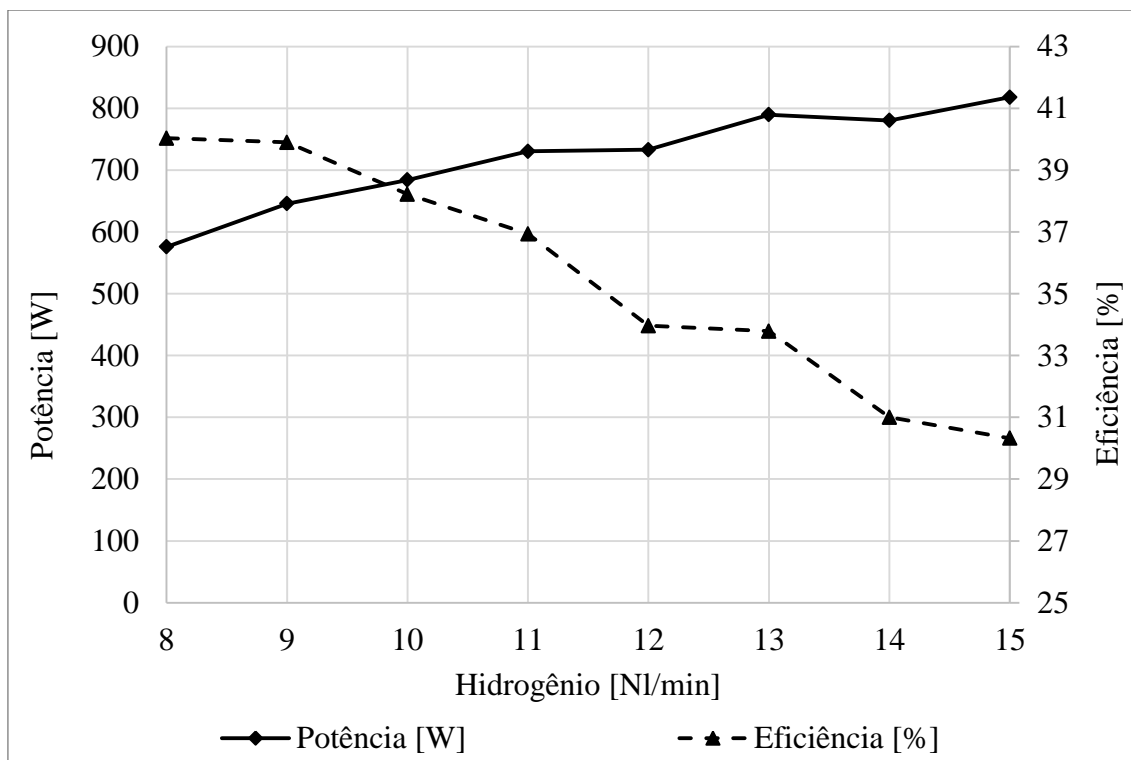


Figura 43 - Potência e eficiência do segundo empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* em função da vazão de hidrogênio.

#### 4.3.2. Bombas

Durante os testes, a bomba *KNF FEM 1.02* gerou uma vazão entre 2 e 15 ml/min, tanto de etanol quanto de água, com um consumo de potência reduzido (entre 6,5 e 7 W, menos que 5 % do consumo total do BdP) e uma baixa oscilação de vazão (cerca de 0,2 ml/min). A vazão gerada e a potência consumida ficaram aproximadamente constantes com a variação da diferença de pressão entre entrada e saída da bomba, dependendo principalmente da velocidade de rotação do motor. No gráfico da Figura 44 são reportados os valores de vazão gerados em função do sinal de controle aplicado, desprezando as pequenas variações devidas à variação da pressão na saída da bomba.



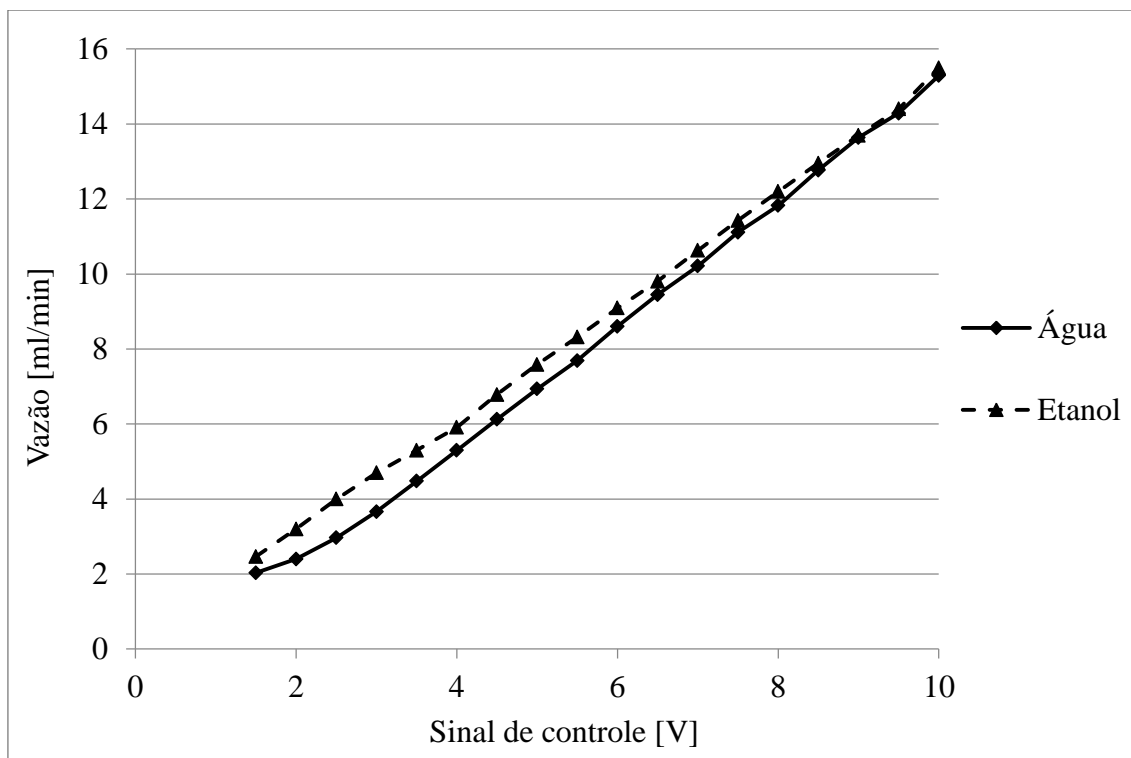


Figura 44 - Vazão da bomba peristáltica em função do sinal de controle aplicado.

#### 4.3.3. Soprador

O primeiro soprador testado, o modelo *Vairex VRB2 2 48VCC*, foi capaz de gerar uma vazão de ar máxima de quase 80 NI/min com uma diferença de pressão máxima entre entrada e saída superior a 400 mbar, como demonstrado nos dados experimentais de Figura 45. O gráfico reporta as curvas vazão/pressão para diferentes valores do sinal de controle, cujos valores estão indicados na legenda interna da Figura, em volts. Na Figura 46 é relatada a potência consumida pelo soprador em função da vazão produzida, para diferentes valores da diferença de pressão enfrentada. A potência máxima consumida, relacionada com valores elevados de  $\Delta p$  e vazão, excede os 250 W.

O modelo *Hi-Blow FC-8040* foi caracterizado por uma vazão máxima de aproximadamente 50 NI/min com uma diferença de pressão entre entrada e saída em torno de 235 mbar. Ao aumentar a diferença de pressão o soprador consegue alcançar vazões decrescentes. A Figura 47 mostra as características vazão/pressão do soprador para diferentes valores do sinal de controle, cujos valores estão indicados na legenda interna da Figura, em volts. Na Figura 48 aparecem as curvas de potência consumida em função da vazão gerada, para diferentes valores da diferença de pressão enfrentada. A potência máxima medida é pouco superior aos 35 W, bem abaixo do valor máximo reportado para o soprador *VBR2-2 48VCC*.

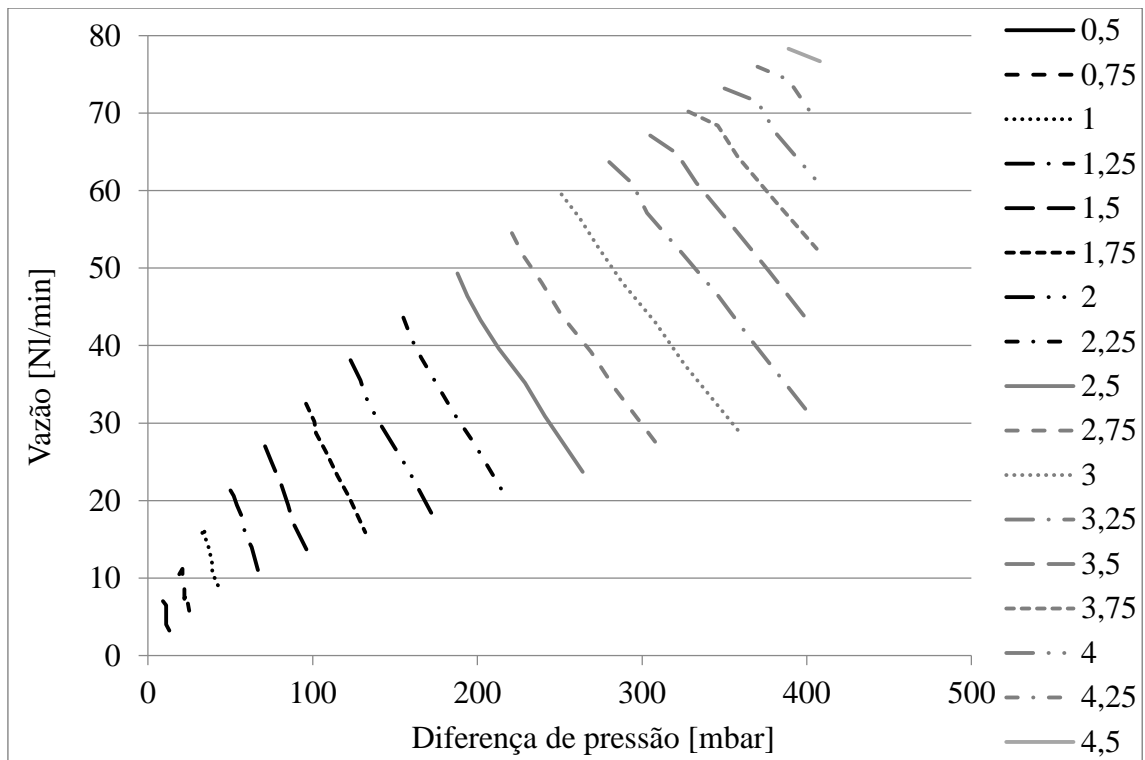


Figura 45 - Característica vazão/pressão do soprador *Vairex VBR2-2 48VCC* para diferentes valores do sinal de controle.

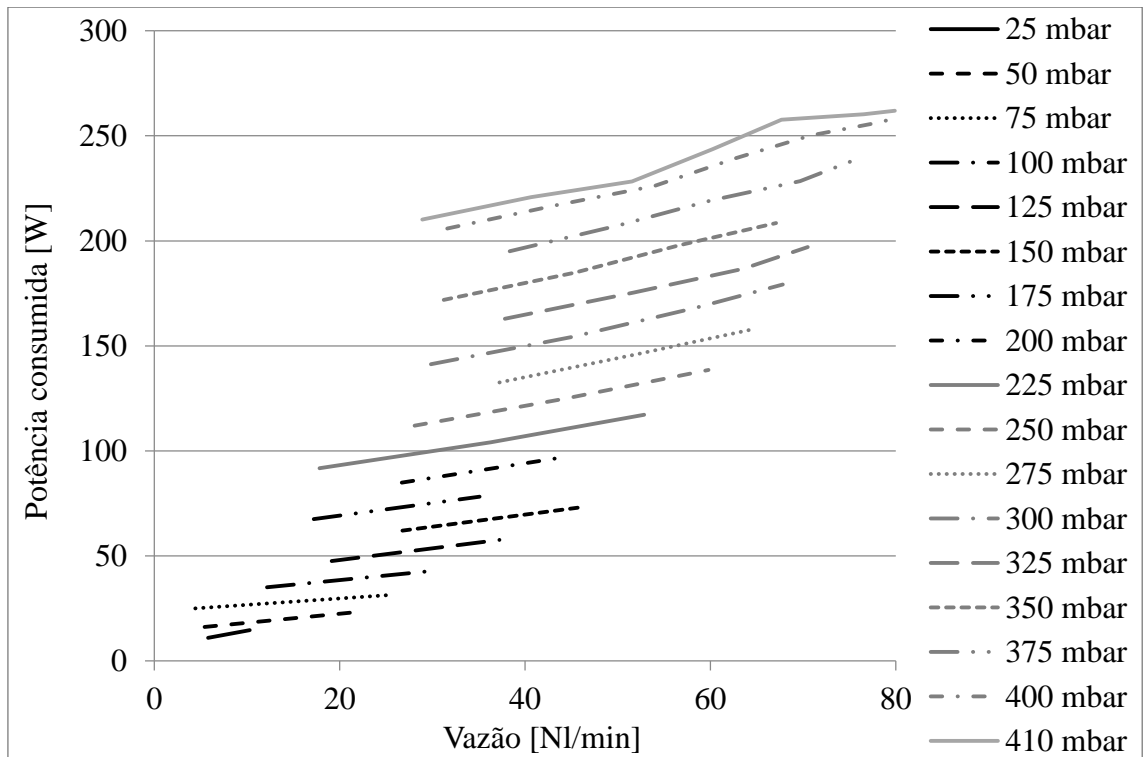


Figura 46 - Característica potência/vazão do soprador *Vairex VBR2-2 48VCC* para diferentes valores de diferença de pressão.

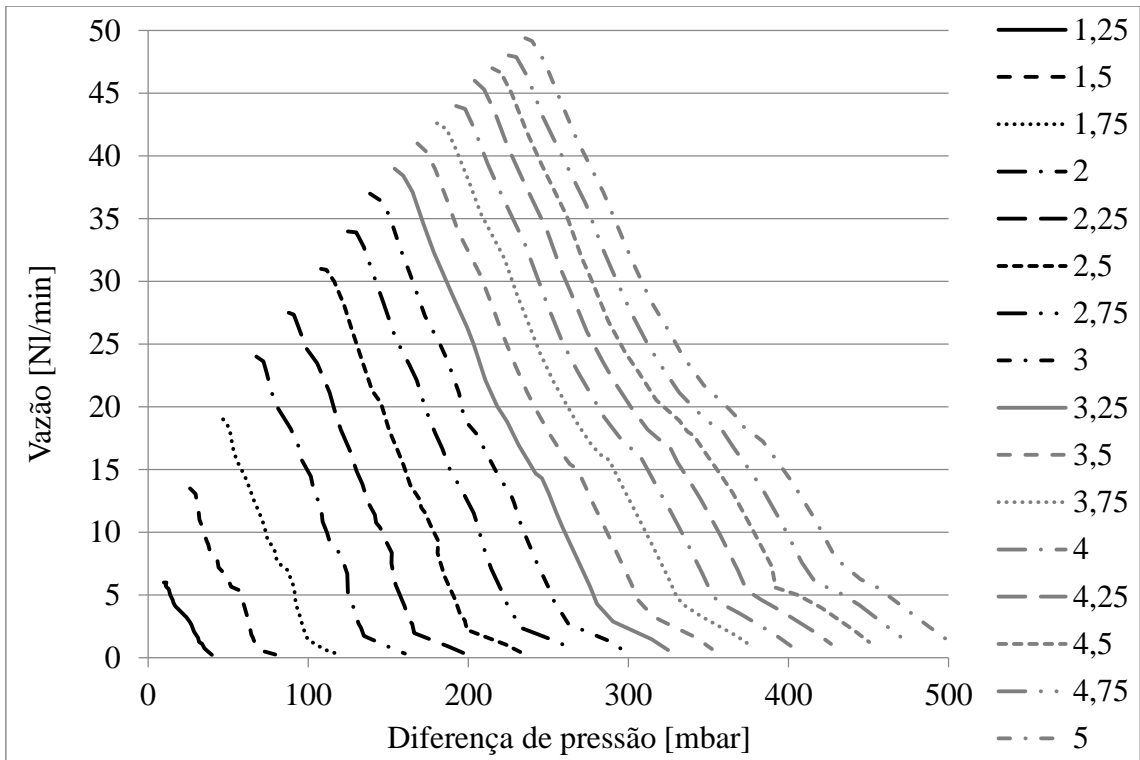


Figura 47 - Característica vazão/pressão do soprador *Hi-Blow FC-8040* para diferentes valores do sinal de controle.

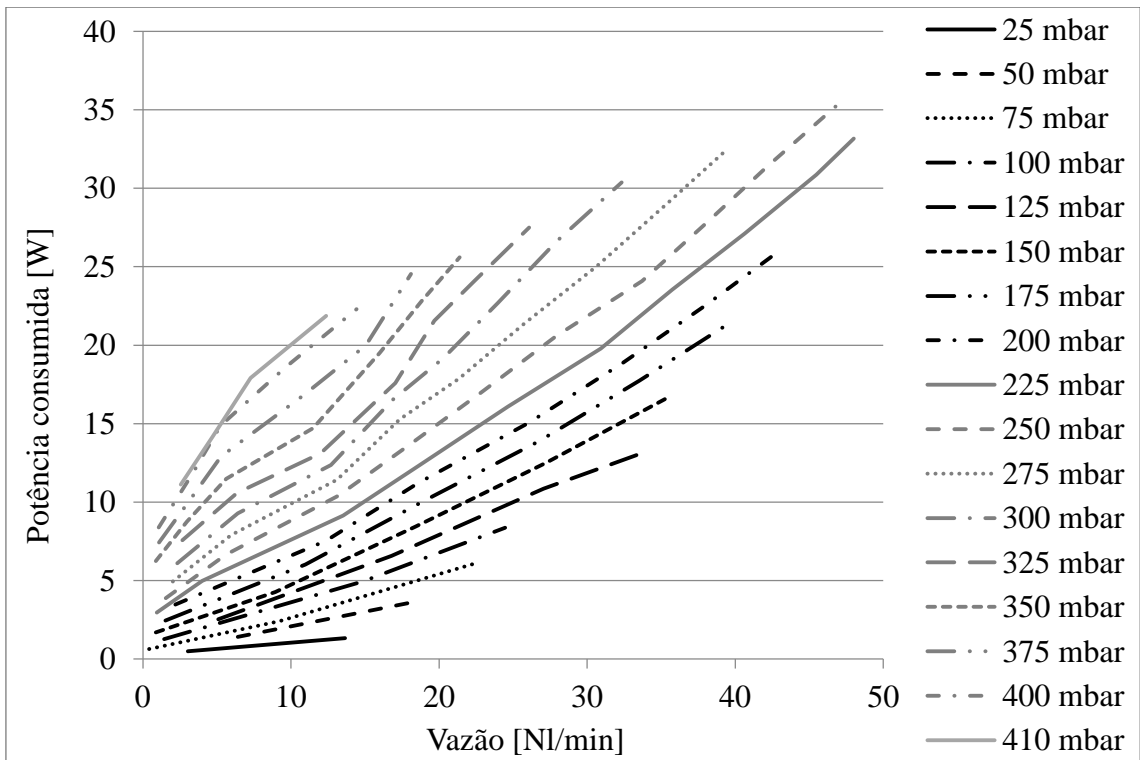


Figura 48 - Característica potência/vazão do soprador *Hi-Blow FC-8040* para diferentes valores de diferença de pressão.

#### 4.3.4. Trocadores de calor

Os trocadores de calor foram testados depois de serem integrados com o resto do sistema, medindo as variáveis necessárias no decorrer dos testes do sistema completo. Conseqüentemente, a temperatura e a vazão dos gases do lado casco (gases quentes) dependeram do funcionamento de regime do sistema, ponto no qual foi praticada a caracterização. Os testes do pré-aquecedor do ar e do evaporador da água foram efetuados no funcionamento com  $H_2$ . No caso do evaporador do etanol, o combustível empregado para manter o sistema em temperatura foi o mesmo etanol vaporizado no trocador. No caso do evaporador da água, não foi possível obter uma medição significativa do  $\Delta p$  entre entrada e saída, porque os valores medidos foram muito baixos, próximos do erro de medição do sensor de pressão empregado. Os gráficos da Figura 49 e da Figura 50 são relacionados com os evaporadores, enquanto a Figura 51 e a Figura 52 são relativas ao pré-aquecedor do ar. O pré-aquecedor do ar foi testado para todo o intervalo de vazões permitidas pelo fabricante do empilhamento. O evaporador da água foi testado até uma vazão de 12 ml/min: acima desse valor o equipamento demonstrou-se inadequado a vaporizar a água de forma estável e contínua, provocando marcadas oscilações nas variáveis medidas (ver Figura 66 e Figura 67). O evaporador do etanol foi testado para vazões de fluido imediatamente acima do valor de projeto.

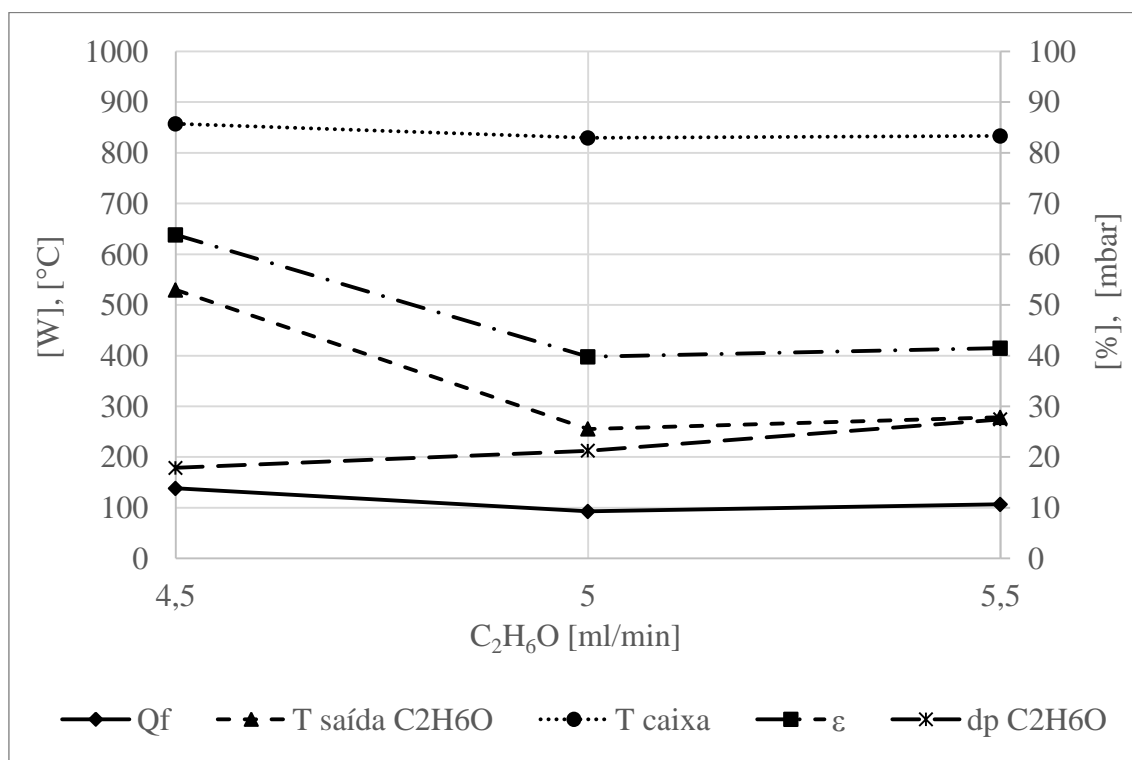


Figura 49 - Resultados dos testes do evaporador do etanol.

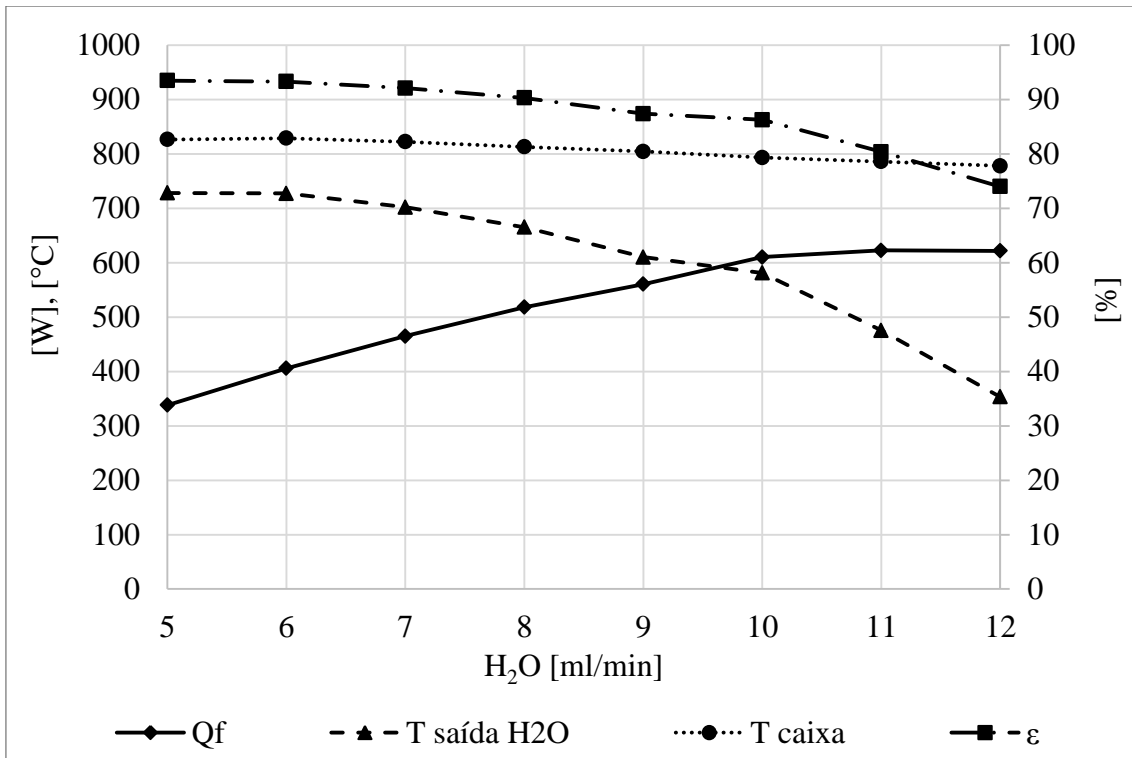


Figura 50 - Resultados dos testes do evaporador da água.

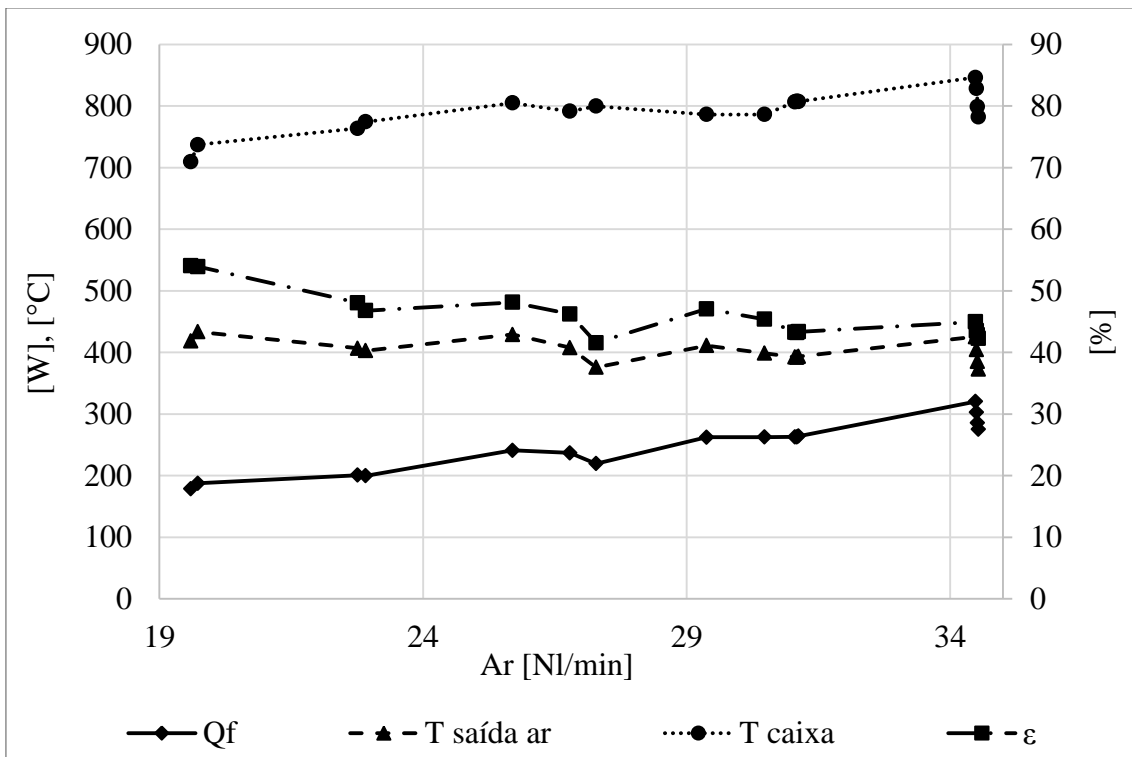


Figura 51 - Resultados dos testes do pré-aquecedor do ar.

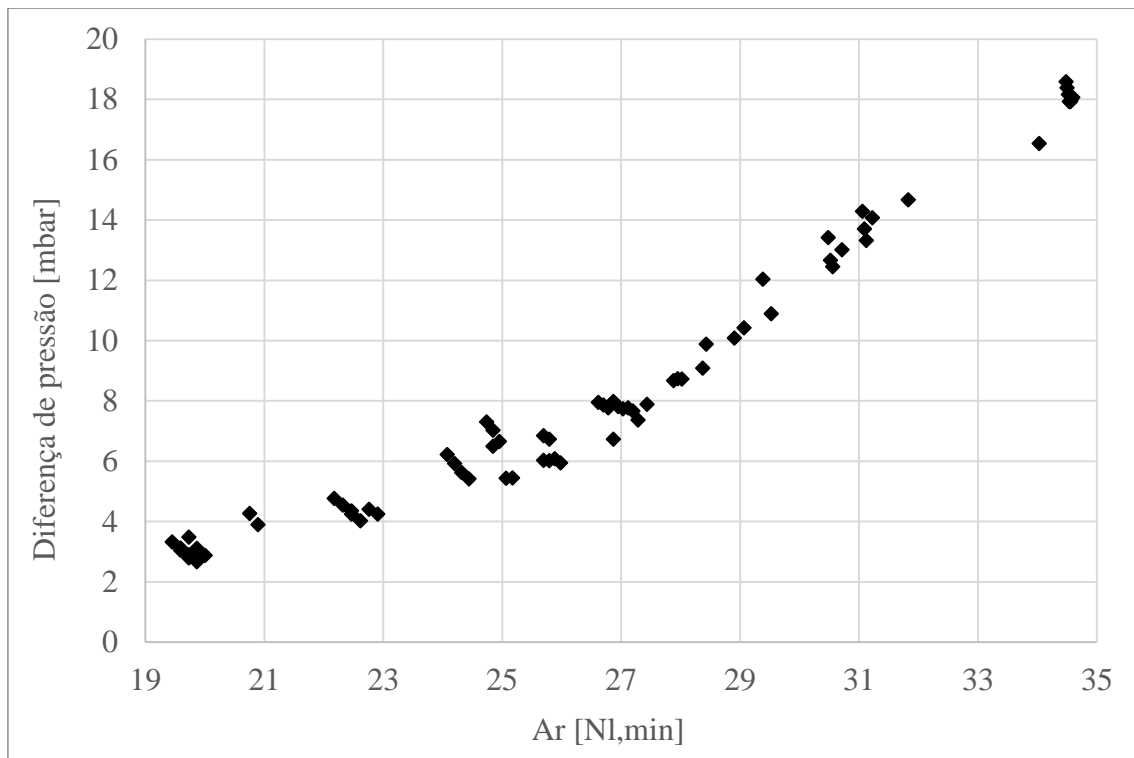


Figura 52 - Perda de pressão no pré-aquecedor do ar.

#### 4.3.5. Combustor

Os testes da câmara de combustão com o nebulizador de etanol demonstraram que as dimensões utilizadas, junto com a utilização da rede metálica que homogeneiza a mistura, permitem a produção e a manutenção de uma queima estacionária e completamente contida na área de combustão. Os testes evidenciaram também a necessidade da presença das velas de preaquecimento: de fato, não foi possível obter a ignição da queima em situação de combustor frio sem pré-aquecer a área de vaporização. Depois do aquecimento, pode ser operada a ignição da mistura ar-etanol ligando a vela de centelha, queimando o combustível de forma estável e aquecendo gradativamente o combustor.

No decorrer dos testes, foi identificada a rotina seguinte, que permite iniciar a combustão de forma eficiente e segura:

- ligar as velas de preaquecimento por aproximadamente 30 segundos;
- alimentar o injetor com 20 NI/min de ar e 4 ml/min de etanol;
- uma vez estabelecidas as vazões requeridas, ligar a vela de centelha;
- iniciada a combustão, desligar as velas de preaquecimento;
- quando a temperatura da saída do combustor supera os 500 °C, desligar a centelha;

- quando a temperatura de saída do combustor alcança os 700 °C, aumentar a vazão de ar ao valor de regime de 25 NI/min.

O gráfico da Figura 53 demonstra o perfil de temperatura próximo da saída da câmara de combustão, do sinal da sonda lambda e da vazão e pressão de entrada do ar e do etanol no injetor durante o teste do combustor. A perda de pressão total do conjunto injetor/câmara de combustão relativa ao ar atestou-se em torno de 335 mbar, um valor considerado adequado pela aplicação. O valor desejado de temperatura de saída (fixado a um mínimo de 850 °C) foi alcançado e superado, beirando os 1000 °C. Para iniciar a combustão (área A do gráfico) foi necessário empregar uma mistura rica de combustível ( $\lambda_{comb} \cong 0,9$ ), como evidenciado pelo sinal da sonda lambda, próximo de 1000 mV. Uma vez estabelecida a combustão, foi possível aumentar a vazão de ar (área B do gráfico), aumentando o valor do parâmetro  $\lambda$  acima da unidade ( $\lambda_{comb} \cong 1,14$ ).

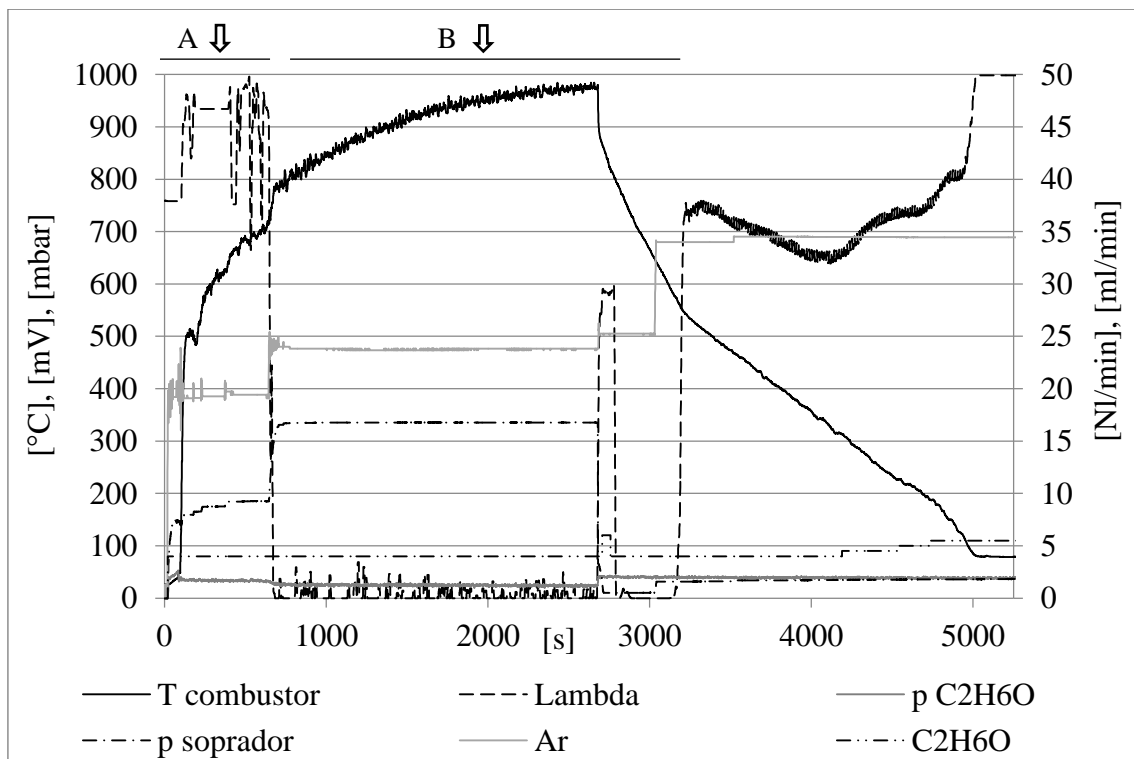


Figura 53 - Teste do combustor de etanol integrado no sistema.

O Anexo 13 e o Anexo 14 mostram imagens do combustor ainda não integrado no sistema, enquanto no Anexo 15 o dispositivo aparece já na montagem definitiva.

#### 4.3.6. Conversor CC/CC

Como mencionado no item 4.2.4, o conversor CC/CC foi realizado com a colaboração da empresa *Tracel Veículos Elétricos*. A montagem final, mostrada na Figura 54, foi completada no Laboratório de Hidrogênio depois que as placas foram montadas e testadas na empresa. No topo da parte central da Figura está a placa principal do conversor, enquanto em baixo pode-se ver a placa de amostragem utilizada para medir tensão e corrente de entrada e saída. Ao lado da placa de amostragem estão os indutores do conversor e na esquerda a ventoinha de resfriamento.

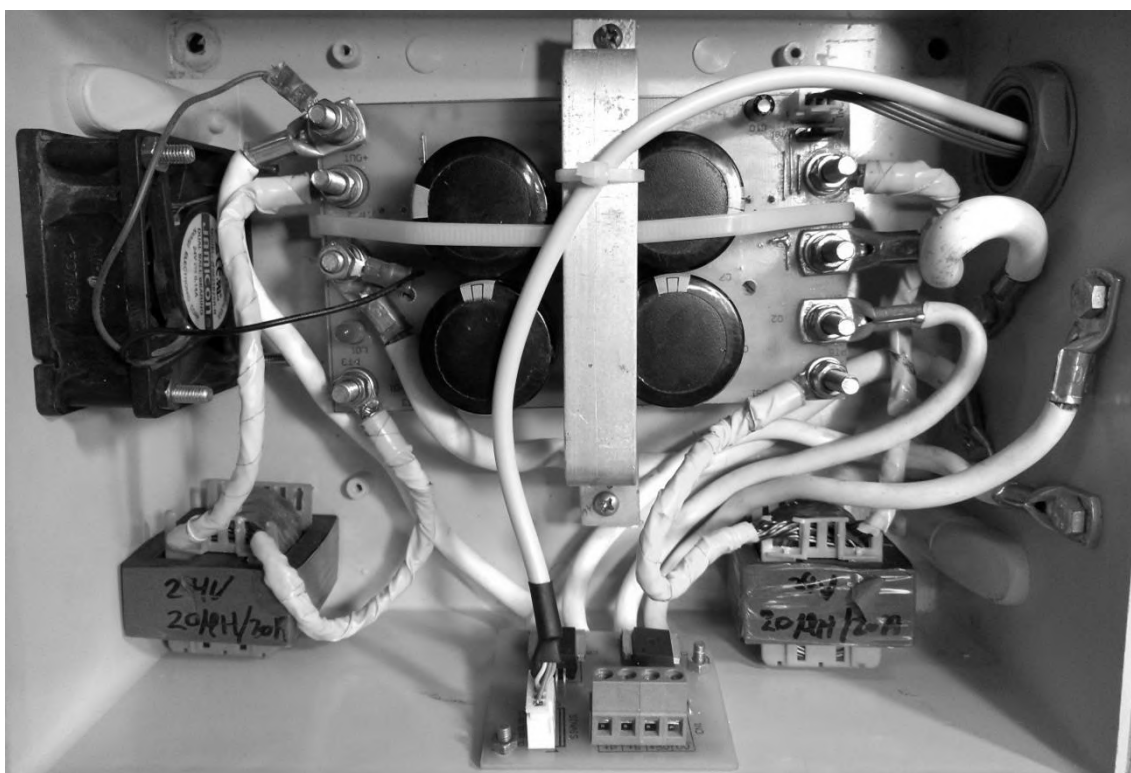


Figura 54 - Realização prática do conversor CC/CC.

Para os primeiros ensaios de funcionamento, o conversor CC/CC foi testado em bancada utilizando uma fonte chaveada regulável como fonte de potência em corrente contínua. Todavia, as limitações da fonte regulável em termos de corrente e potência máxima não permitiram obter condições de funcionamento representativas da operação real da PaCOS. Consequentemente, os testes prosseguiram utilizando o mesmo empilhamento como fonte de corrente. O gráfico de Figura 55 mostra os resultados dos testes em termos de potência de saída (lado baterias) e eficiência do conversor, em função da potência em entrada (lado empilhamento). No gráfico são reportados também



a corrente e a tensão na entrada do conversor para cada ponto de operação. A eficiência do conversor resultou decrescente ao crescer da potência de entrada, mas permaneceu bastante elevada, sempre acima de 94 %.

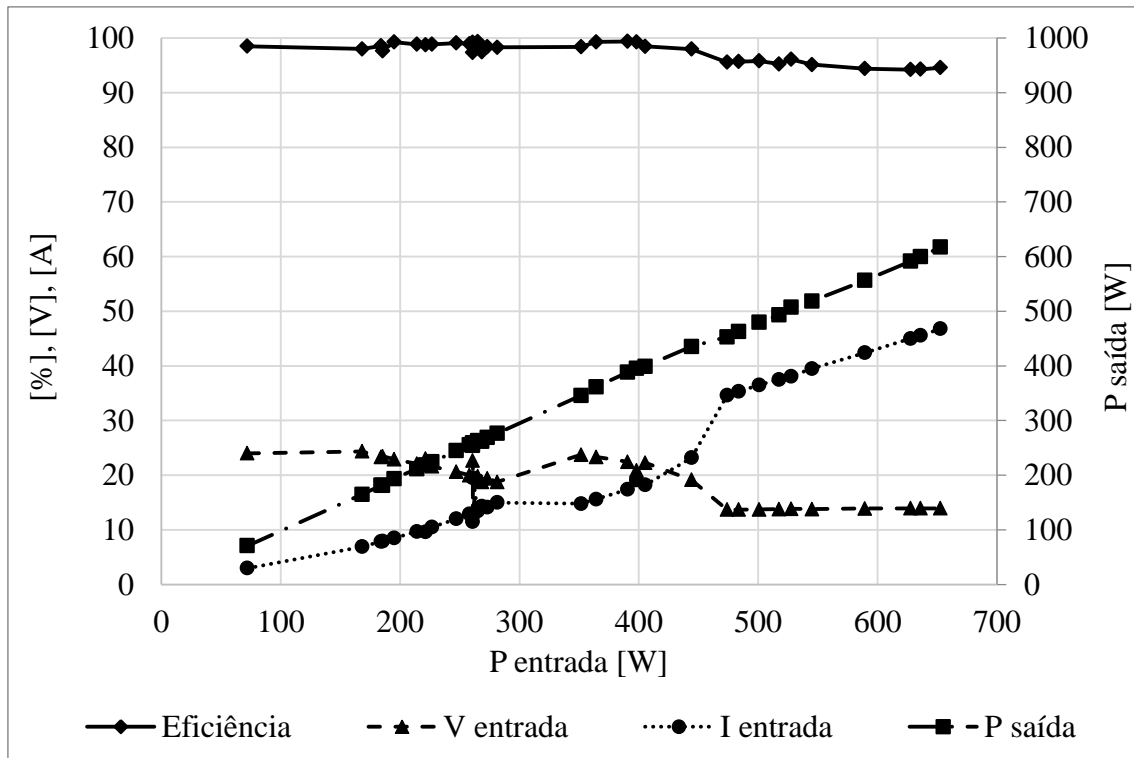


Figura 55 - Resultados dos testes do conversor CC/CC.

Na Tabela 12 são explicitados os valores das variáveis elétricas nos pontos de maior potência que foi possível obter durante os experimentos. Desses pontos, o último foi caracterizado por uma potência de saída do conversor suficientemente alta a alimentar os sistemas auxiliares e produzir uma potência em corrente alternada superior a 500 W, após o inversor. Esse estado de funcionamento do sistema é o mesmo reportado na Tabela 15 no caso de funcionamento com hidrogênio. Os valores de eficiência do conversor indicados nas duas Tabelas são diferentes porque no valor da Tabela 15 são embutidas as perdas ôhmicas na transmissão de potência entre PaCOS e conversor CC/CC, entre conversor CC/CC e bateria, e entre bateria e inversor.

Tabela 12 - Dados de funcionamento do conversor CC/CC próximo da potência de projeto do protótipo.

$V_e$	$I_e$	$P_e$	$V_s$	$I_s$	$P_s$	$\eta_{cc/cc}$
[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	[%]
13,90	42,40	589,36	25,17	22,10	556,26	94,38
13,95	45,00	627,75	25,17	23,50	591,50	94,22
13,95	45,60	636,12	25,20	23,80	599,76	94,28
13,95	46,80	652,86	25,20	24,50	617,40	94,57

#### 4.3.7. Inversor

Na Figura 56 são representados os resultados experimentais obtidos com o *MultiPlus Compact* fornecendo energia à rede. Na parte esquerda do gráfico são reportados os dados recolhidos no teste de bancada; na parte direita, aparecem os dados medidos uma vez que o inversor foi integrado no sistema. No segundo caso, a tensão de rede no momento do teste resultou um pouco maior. É possível ver no gráfico que o andamento das variáveis se confirmou entre os dois testes.

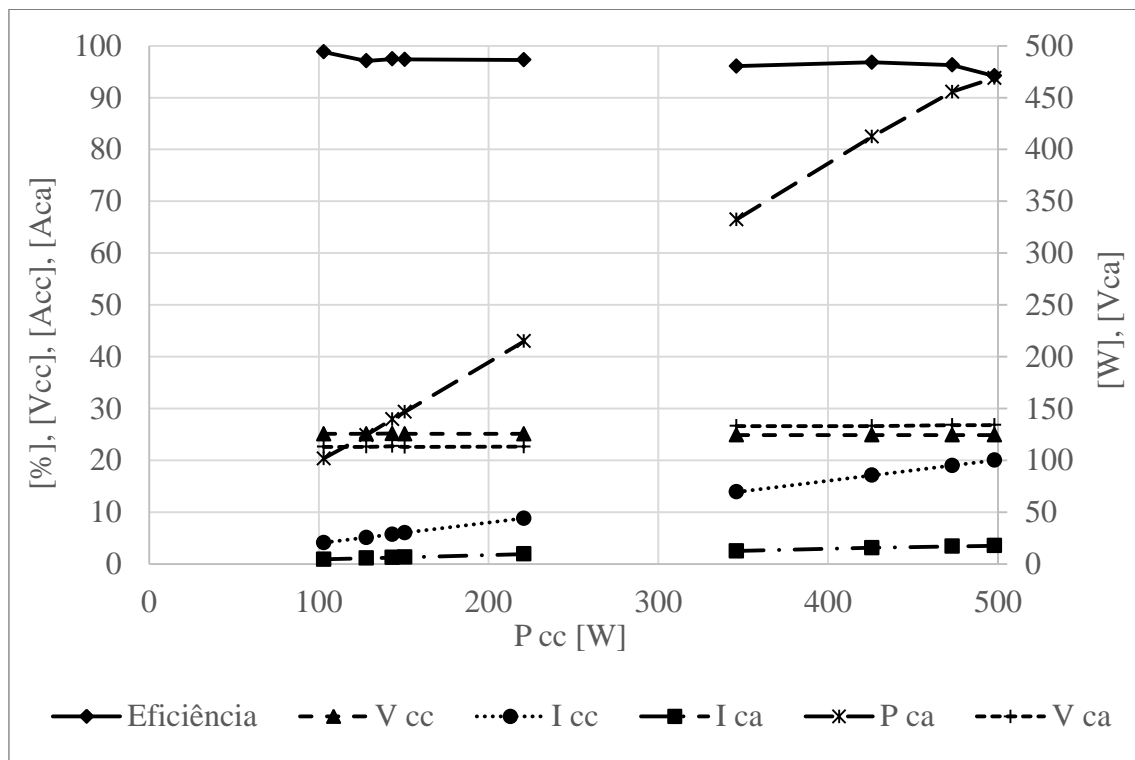


Figura 56 - Desempenho do inversor *MultiPlus Compact* injetando energia na rede.

Na Tabela 13 são reportados os dados obtidos na alimentação de cargas através da saída monodirecional, com o inversor retirando potência das baterias. Foram aplicados três diferentes valores de carga em CA e foi também quantificado o consumo do equipamento em *stand-by*, ou seja, sem nenhuma carga. A Tabela contém os valores de tensão, corrente e potência na entrada (corrente contínua) e na saída (corrente alternada) do inversor.

Tabela 13 - Desempenho do inversor *MultiPlus Compact* alimentando cargas.

$V_{CC}$	$I_{CC}$	$P_{CC}$	$V_{CA}$	$I_{CA}$	$P_{CA}$	Eficiência
[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	[%]
23,96	0,36	8,63	119,9	0	0	-
23,86	2,32	55,35	118,9	0,39	46,37	83,77
20,7	60,05	1243,04	120	9,56	1147,2	92,29
20,98	59,46	1247,47	119,9	9,63	1154,73	92,57

#### 4.4. TESTES DO SISTEMA COMPLETO

O sistema formado por todos os componentes mencionados, construído de acordo com o esquema de princípio de Figura 6, foi testado como um conjunto, para demonstrar a capacidade de inicializar e sustentar autonomamente a produção de energia elétrica. Nessa seção são relatados os principais resultados obtidos, divididos em subseções relacionados com os diferentes momentos da operação do sistema.

##### 4.4.1. Montagem do sistema

O protótipo foi montado de acordo com os projetos mecânico e elétrico expostos na seção 4.2. Cuidado particular foi dedicado ao procedimento de montagem da área de alta temperatura do sistema, porção crítica para o funcionamento adequado do protótipo, que incluiu as seguintes etapas:

- conexão do tubo de entrada do combustível com o empilhamento;
- proteção da face superior do empilhamento e do tubo com mica;
- colocação do êmbolo de compressão (com célula de carga) no topo do empilhamento e conexão do coletor de corrente (polo positivo);

- montagem da estrutura de compressão e aplicação da carga requerida. Em seguida, retirada dos parafusos de segurança das laterais do empilhamento;
- proteção das faces laterais da PaCOS com mica e colocação do conjunto empilhamento/estrutura de compressão na caixa de contenção;
- conexão do tubo de entrada do ar, do tubo de saída anódica e do coletor de corrente (polo negativo) à face inferior do empilhamento;
- conexão do tubo de entrada do ar com o pré-aquecedor do ar;
- montagem dos evaporadores da água e do etanol dentro do isolamento térmico da área de alta temperatura do sistema;
- colocação da caixa de contenção no isolamento térmico;
- conexão do tubo de entrada do combustível com os evaporadores e colocação do isolamento térmico em torno da saída do evaporador do etanol (ver item 5.2.4);
- fechamento da caixa de contenção do empilhamento e finalização do isolamento térmico com a colocação do isolamento da parte superior da caixa;
- montagem da tubulação de exaustão e do combustor acima do isolamento;
- conexão das entradas dos trocadores de calor e do injetor com o resto do sistema;
- conexão do motor de passo com o parafuso do sistema de compressão;
- colocação no lugar dos sensores de pressão e temperatura necessários ao monitoramento do sistema.

Uma vez completada a montagem, o protótipo encontrou-se pronto para ser testado. Na Figura 57, na Figura 58 e na Figura 59 aparecem imagens em sequência do procedimento aplicado. Na Figura 58 (D) pode-se notar o isolamento térmico da entrada do etanol, enquanto na Figura 59 (A) é visível o ponto de conexão do combustor com a caixa do empilhamento.



Figura 57 - Montagem: mica de proteção (A); êmbolo de compressão e coletor de corrente positivo (B); sistema de compressão (C); caixa do empilhamento (D).



Figura 58 - Montagem: área de combustão interna (A); lado inferior da caixa do empilhamento (B); evaporadores montados no isolamento térmico (C); entrada anódica do empilhamento (D).



Figura 59 - Montagem: finalização do isolamento térmico (A); duto de exaustão (B).

#### 4.4.2. Aquecimento do sistema

A fase inicial do funcionamento do sistema é o aquecimento, necessário para elevar a temperatura até o nível de operação da PaCOS (no caso do *NIMTE-A-Stack-301*, entre 700 e 800 °C). Nos gráficos da Figura 60 e da Figura 61 é possível distinguir as diferentes fases da inicialização do sistema, cuja duração média foi aproximadamente de 2,5 horas. O aquecimento se desenvolveu como segue:

- **Ativação do combustor.** O combustor é inicializado de acordo com a rotina exposta no item 4.3.5 (ponto A).
- **Gás de proteção.** Quando a temperatura indicada como T PaCOS (medida por um termopar em contato com a placa de compressão colocada no topo do empilhamento) sobe acima de 150 °C, começa-se a introduzir no compartimento anódico um pequeno fluxo de gás inerte (ponto B), com a função de proteção contra a reoxidação do níquel. De fato, os ciclos redução-oxidação do material anódico das PaCOS são uma das causas principais das falhas desses dispositivos [75]. Nos testes efetuados, o gás empregado foi nitrogênio, com uma vazão de 2 NI/min. A introdução do nitrogênio provoca uma pequena queda da temperatura e um leve aumento da pressão na entrada do anodo.
- **Desligamento do combustor.** Uma vez que a temperatura da área de combustão situada na caixa do empilhamento alcança 500 °C (ponto C), é possível desligar o combustor externo e transferir a combustão nessa área, mais próxima ao empilhamento. Isso acontece aproximadamente 45' depois da ativação do combustor. Dessa forma, garante-se que o aquecimento do sistema proceda com uma taxa maior, sendo evitadas as perdas de calor associadas ao uso do combustor. O fluxo de ar enviado ao combustor é parado, enquanto começa-se a enviar ar ao empilhamento, na vazão máxima permitida de 35 NI/min. Alimentar o ar através da linha catódica provoca um pico da temperatura de entrada do ar no empilhamento, devido ao fato que o pré-aquecedor se encontra a uma temperatura elevada, permitindo um rápido aquecimento do fluxo fluido. Após o pico, a temperatura diminui, enquanto o metal do trocador de calor é resfriado pelo fluxo de ar, até alcançar o estado de regime permanente, no qual a temperatura aumenta novamente, mais devagar, junto com o resto do sistema. A nova modalidade de alimentação do ar provoca também uma rápida queda da temperatura de saída do ar do empilhamento, sendo o fluxo fluido que sai da PaCOS a uma temperatura menor que a da área de combustão interna à caixa. Todavia, a ignição da combustão nessa área reverte rapidamente a situação,



provocando o incremento rápido também da temperatura da caixa, da saída do evaporador da água e do corpo metálico da PaCOS. O etanol continua a ser alimentado através do injetor, vaporizando no interior do combustor graças ao calor proveniente da área de combustão interna. De fato, é possível verificar que, depois de um transitório de resfriamento, a temperatura de saída do combustor atesta-se ao valor associado à mudança de fase do etanol, permanecendo constante.

- **Regime de aquecimento com combustão interna.** Com o proceder da combustão no interior da caixa do empilhamento, todas as temperaturas do sistema aumentam. Para obter esse resultado, a vazão de etanol enviada através do combustor é aumentada gradativamente, até chegar a 6 ml/min. Quando a vazão de etanol chega a 5,5 ml/min, o líquido não vaporiza mais completamente no combustor, provocando a queda e a instabilidade da temperatura medida na área de combustão da caixa do empilhamento T caixa (ponto D). De fato, o termopar correspondente está localizado próximo da saída do combustor, onde pode ser alcançado por gotas de etanol líquido, que vaporizam só na caixa do empilhamento, subtraindo calor a essa área. A esse evento é associada também uma pequena redução da taxa de aumento da temperatura da PaCOS e da saída do evaporador da água. Ao aumentar a temperatura do sistema, aumenta também a queda de pressão no circuito catódico (a pressão de saída do soprador cresce). Esse aumento parece devido ao incremento da queda de pressão no empilhamento, dado que a diferença de pressão entre entrada e saída do pré-aquecedor do ar manteve-se constante.
- **Regime de produção elétrica.** Uma vez alcançada a temperatura de operação, é possível parar o fluxo de etanol ao combustor e alimentar o combustível exclusivamente através do empilhamento (ponto E). O combustível não reagido alcança a área de combustão interna da caixa através da tubulação de saída anódica, queimando no interior do sistema e contribuindo a manter o balanço térmico do mesmo. A fase de produção elétrica é descrita com mais detalhes no item 4.4.3.

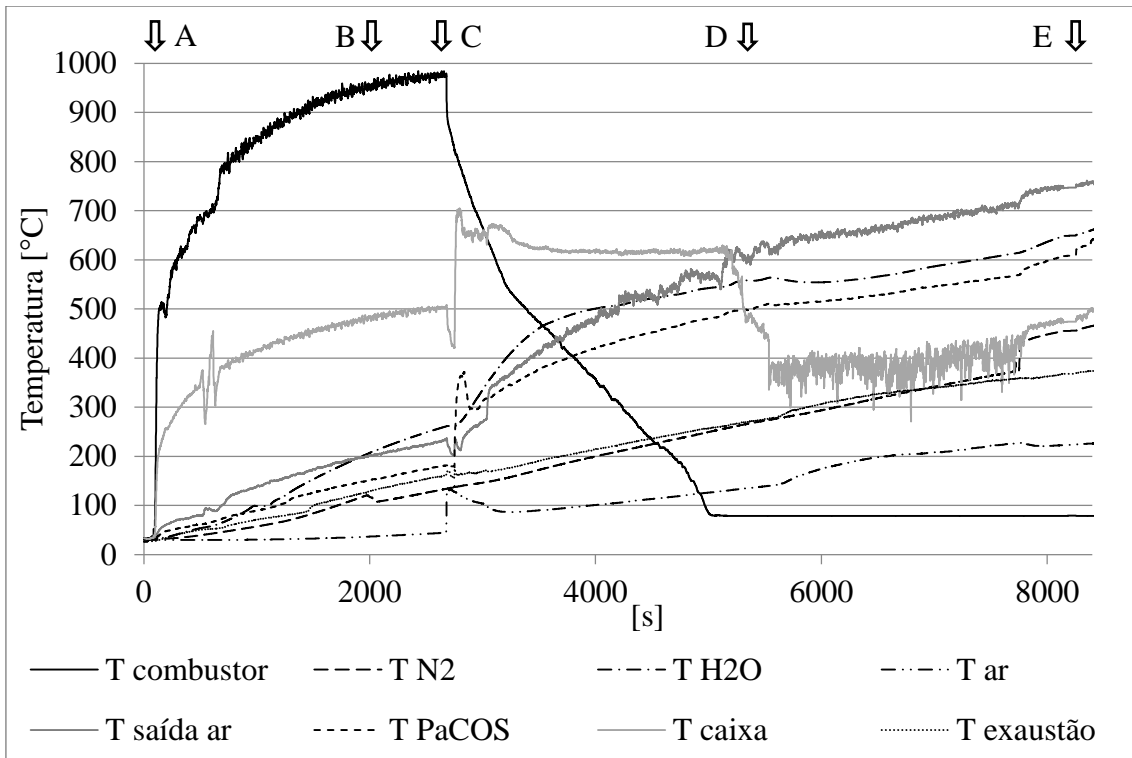


Figura 60 - Aquecimento do protótipo: temperaturas.

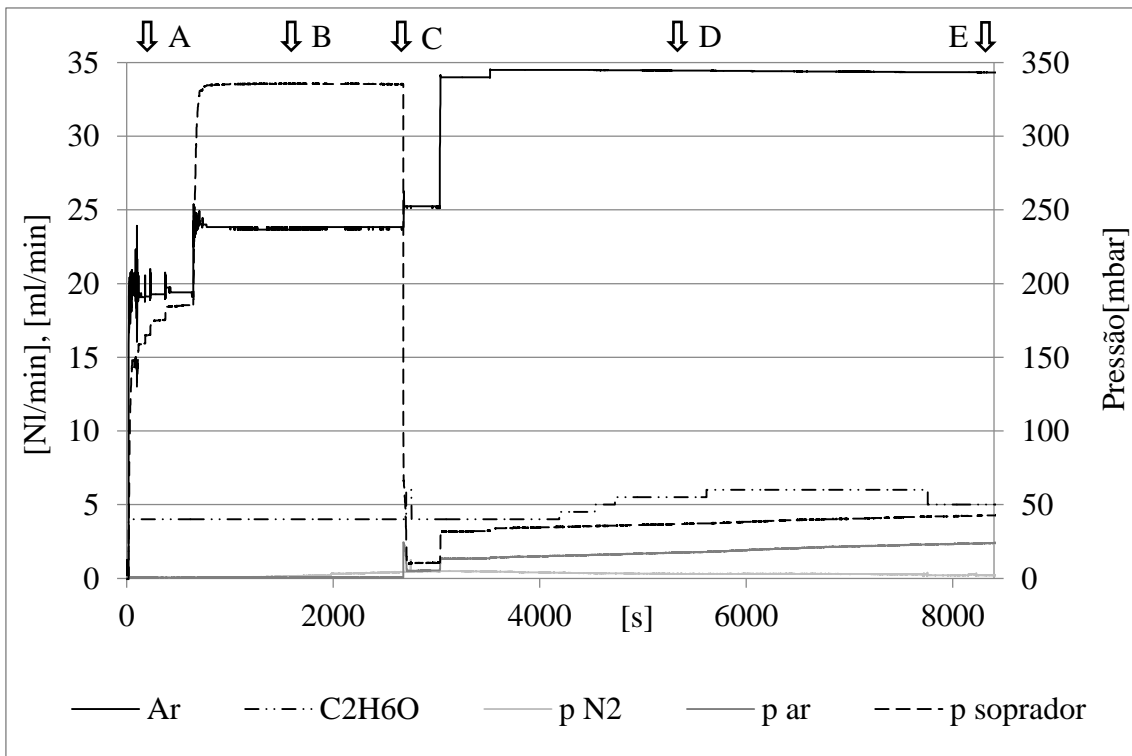


Figura 61 - Aquecimento do sistema protótipo: vazões e pressões.

Foram estimadas a potência e a energia elétrica consumidas pelos dispositivos auxiliares durante o transitório de aquecimento. Esses dados, relatados na Tabela 14, são importantes para a operação do sistema. A potência consumida pelo controle e pelas eletroválvulas manteve-se constante ao longo do transitório, enquanto para o soprador foi calculado um valor médio de acordo com as vazões utilizadas ao longo do período. A potência consumida pelas bombas foi considerada constante e igual ao consumo máximo demonstrado nos testes do componente expostos no item 4.3.2.

Tabela 14 - Consumo elétrico dos dispositivos auxiliares durante o aquecimento.

Variável	Soprador	Bombas	Válvulas	Controle	Total	Unidade
Potência média	25,01	14	39,71	17,51	96,23	[W]
Energia	62,53	35	99,27	43,78	240,58	[Wh]

#### 4.4.3. Geração elétrica

No decorrer dos trabalhos foram realizados vários ensaios de produção elétrica, tanto com hidrogênio quanto com etanol. Nesse item são relatados os resultados dos testes mais representativos.

##### → Geração elétrica com hidrogênio

Seguindo as indicações dos testes de bancada do empilhamento *NIMTE-A-STACK-301* descritos no item 4.3.1, na operação do protótipo os fluxos de combustível e oxidante foram variados em um intervalo de valores que permitam a geração de uma potência elétrica máxima em torno de 650 W. Essa potência da PaCOS foi considerada suficiente a alcançar o objetivo de 500 W de potência útil, descontando o consumo dos equipamentos auxiliares e as perdas devidas à eletrônica de potência. Objetivo dos testes foi de alcançar esse nível de produção elétrica com a menor vazão possível de hidrogênio, de forma a maximizar o rendimento do empilhamento.

Os resultados melhores, aqui reportados, foram obtidos depois de um período de inatividade do empilhamento, com o mesmo em temperatura de operação, sem carga aplicada e alimentado com 8 NI/min de H<sub>2</sub> e 35 de ar. Na geração elétrica foram empregados 10 NI/min de H<sub>2</sub> e 25 NI/min de ar, como indicado no gráfico da Figura 62. Uma vez exaurido o transitório devido à variação com respeito ao estado inicial, essas vazões permitiram que as temperaturas do sistema se mantivessem aproximadamente constantes no período de geração elétrica, como indicado na Figura 63.

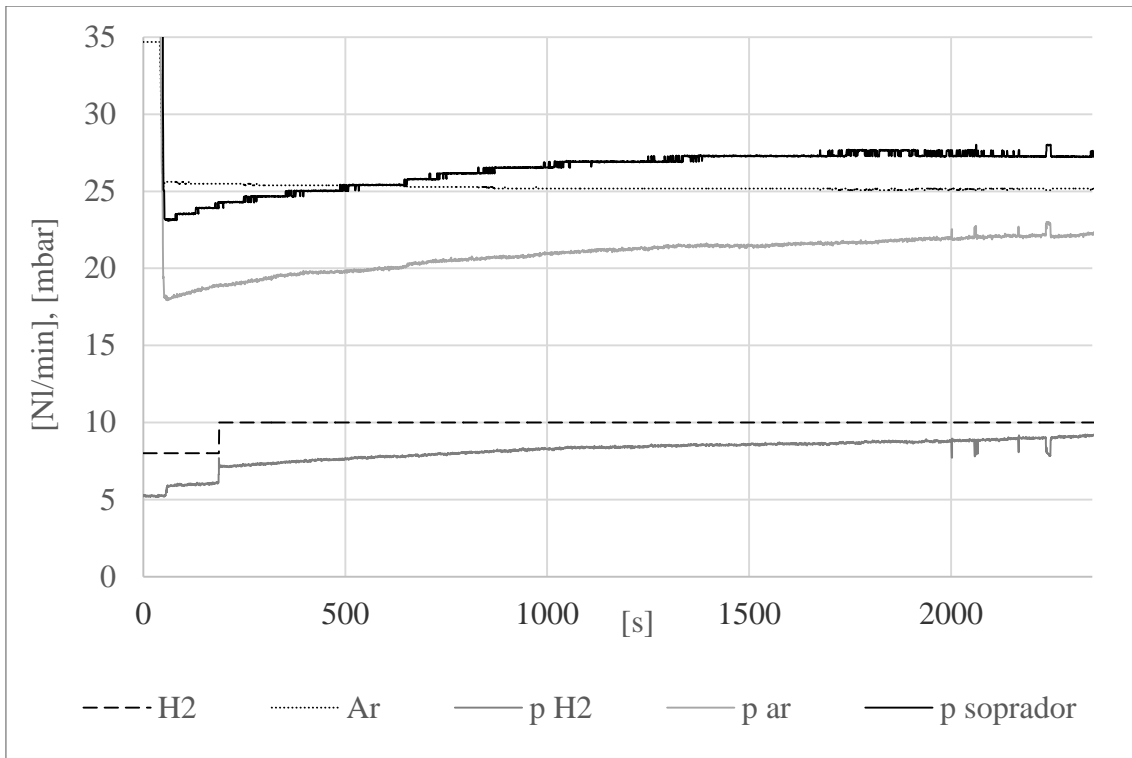


Figura 62 - Geração elétrica com H<sub>2</sub>: vazões e pressões.

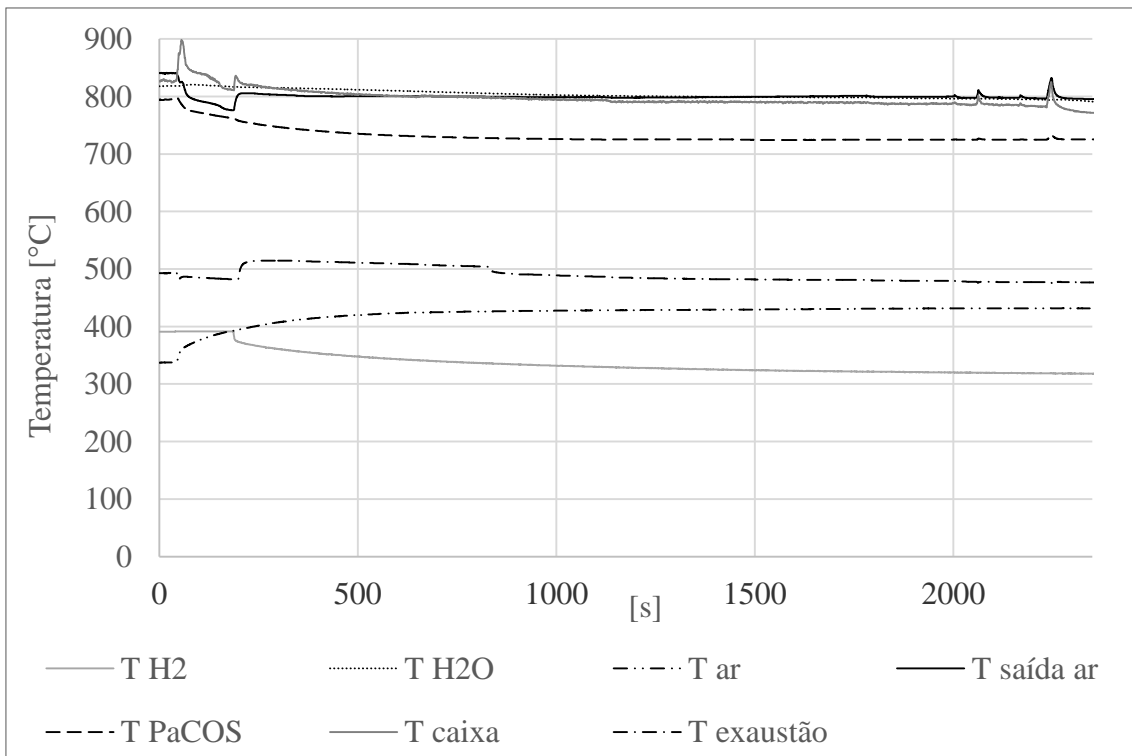


Figura 63 - Geração elétrica com H<sub>2</sub>: temperaturas.

É importante ressaltar como a temperatura do corpo metálico da PaCOS permaneceu para todo o teste dentro da faixa indicada pelo fabricante, entre 700 e 800 °C.

Do ponto de vista das variáveis elétricas, um ponto importante que é possível evidenciar no gráfico da Figura 64 é que o empilhamento *NIMTE-A-STACK-301* necessita de um período de estabilização para passar do estado de *stand-by*, com tensão de circuito aberto, à produção de potência máxima nas condições aplicadas. De fato, é possível ver como o desempenho do empilhamento em termos de potência produzida imediatamente após a aplicação da carga é muito menor do que é alcançado depois de alguns minutos de operação. Na Figura 64, entre a aplicação da carga (ponto A) e a produção elétrica estável com a mesma carga (ponto B) passaram aproximadamente 25 minutos. Nesse intervalo, tanto a tensão quanto a corrente aumentaram consideravelmente. Uma vez estabilizada a potência máxima com a carga aplicada, essa última foi variada para aumentar ainda a potência produzida pelo empilhamento, alcançando uma potência máxima de aproximadamente 635 W. Utilizando as medições de corrente e tensão para cada valor de carga (correspondentes aos patamares de tensão, corrente e potência entre o ponto B e o final do gráfico) foram obtidos os pontos das curvas de polarização e potência mostradas na Figura 65.

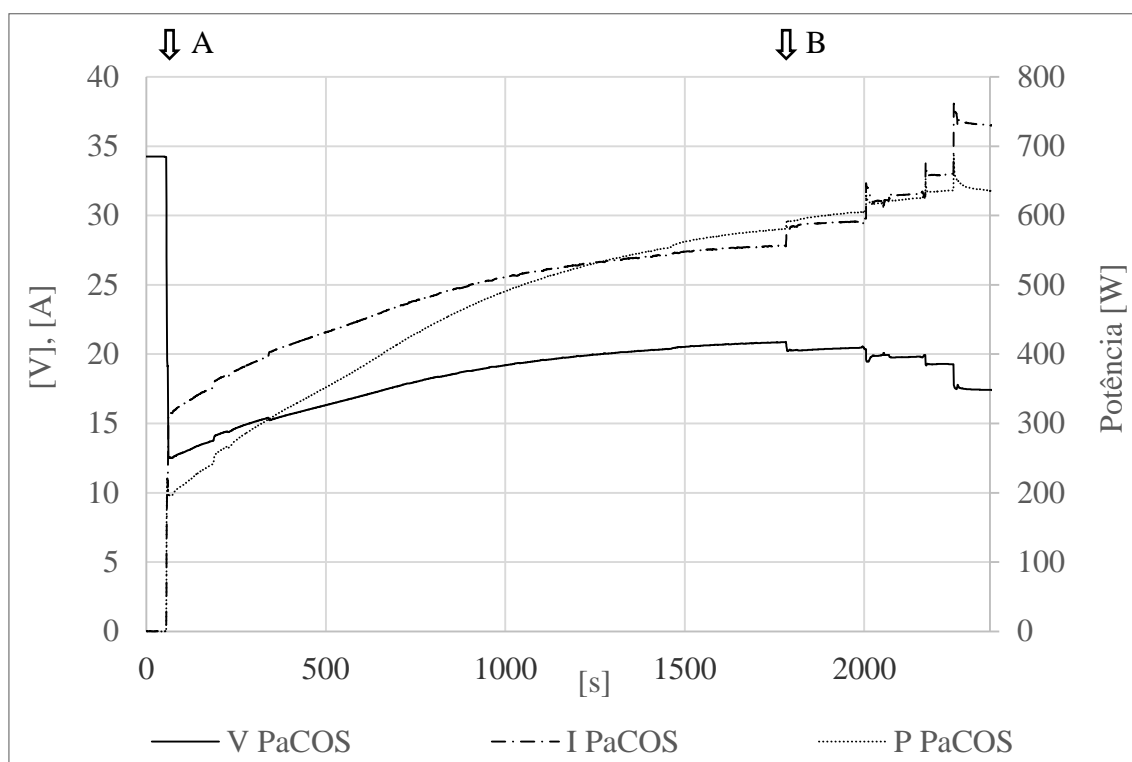


Figura 64 - Geração elétrica com H<sub>2</sub>: variáveis elétricas.

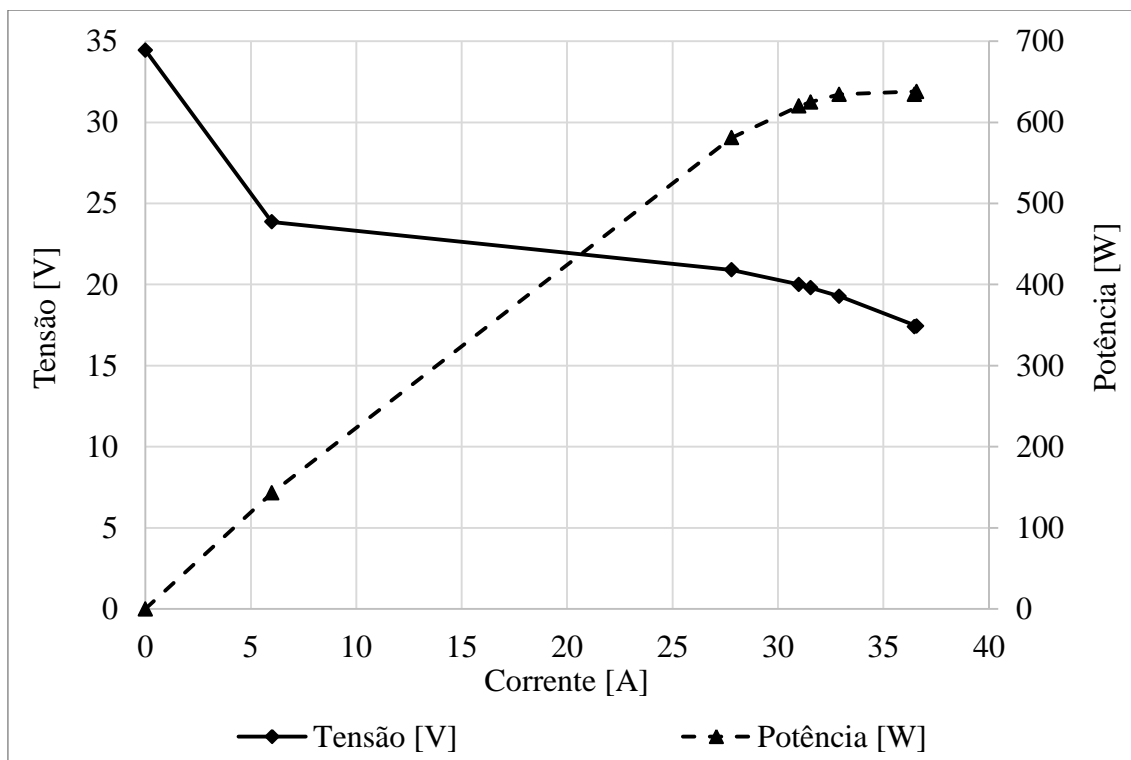


Figura 65 - Geração elétrica com H<sub>2</sub>: curvas de polarização e de potência.

#### → Geração elétrica com etanol

Para escolher a vazão de etanol a utilizar, foi calculado o valor que pode combinar-se com a mesma quantidade de íons oxigênio que podem reagir com a vazão de combustível empregada nos testes com hidrogênio. De acordo com a reação (1), cada molécula de H<sub>2</sub> pode reagir com um único íon oxigênio. Através da reação de reforma a vapor de etanol (75), uma molécula de etanol gera duas moléculas de CO e 4 de H<sub>2</sub>:



Cada uma das moléculas produzidas pode-se ligar com um íon oxigênio (reações (1) e (2)). Consequentemente, cada molécula de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O tem o potencial para reagir com 6 íons oxigênio. Isso significa que a vazão molar de etanol será relacionada com a vazão de hidrogênio  $\dot{n}_{H_2}$  através da equação (76):

$$\dot{n}_{C_2H_6O} = \dot{n}_{H_2}/6 \quad (76)$$

Dessa forma, manteve-se o mesmo valor de excesso de combustível  $\lambda$  entre os testes com H<sub>2</sub> e com etanol ( $\lambda_{C_2H_6O} = \lambda_{H_2}$ ). O resultado do cálculo fornece uma vazão em volume de 4,34 ml/min de etanol líquido, valor que nos testes foi aproximado a 4,5 ml/min. A vazão de água alimentada foi definida escolhendo o valor da razão  $V/E$ ,

definida na seção 3.1. Nos testes com etanol efetuados com o primeiro empilhamento *NIMTE-A-STACK-301*, o valor de  $V/E$  empregado foi de 4. Todavia, nessa condição de operação o sistema apresentou uma rápida degradação, como relatado no item 4.3.1, possivelmente relacionada à formação de carbono. Para desfavorecer essa possibilidade e evitar danificar o empilhamento montado no protótipo, nos testes relatados nesse item foi então utilizada uma vazão de água de 10 ml/min, à qual corresponde um valor de  $V/E$  igual a 7,12. O ar foi alimentado com o mesmo fluxo empregado nos testes de geração elétrica com hidrogênio. No gráfico da Figura 66 são apresentados os valores de vazão, que foram variados ao longo do teste para investigar o efeito da vazão dos reagentes sobre o desempenho do empilhamento, cuidando de manter o valor de  $V/E$  aplicado aproximadamente constante. A pressão da linha catódica demonstrou um comportamento oposto ao caso da alimentação com hidrogênio, caindo ao longo do teste, mas o valor absoluto da variação permaneceu muito baixo. A perda de pressão da linha anódica foi maior que no caso da alimentação com hidrogênio e caracterizada por evidentes oscilações, que afetaram também alguns dos perfis de temperatura mostrados na Figura 67 (em particular as temperaturas de entrada de etanol e água, mas também a temperatura do empilhamento, da área de combustão e da saída do ar da PaCOS).

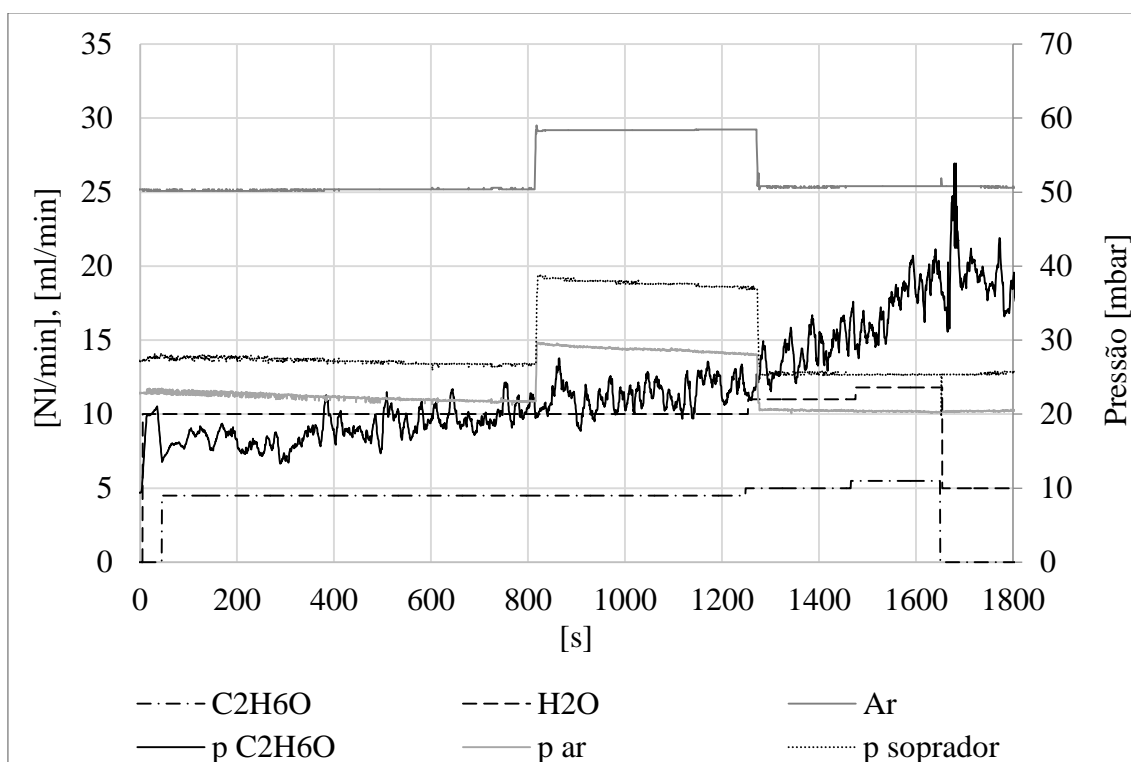


Figura 66 - Geração elétrica com  $C_2H_6O$ : pressões e vazões.

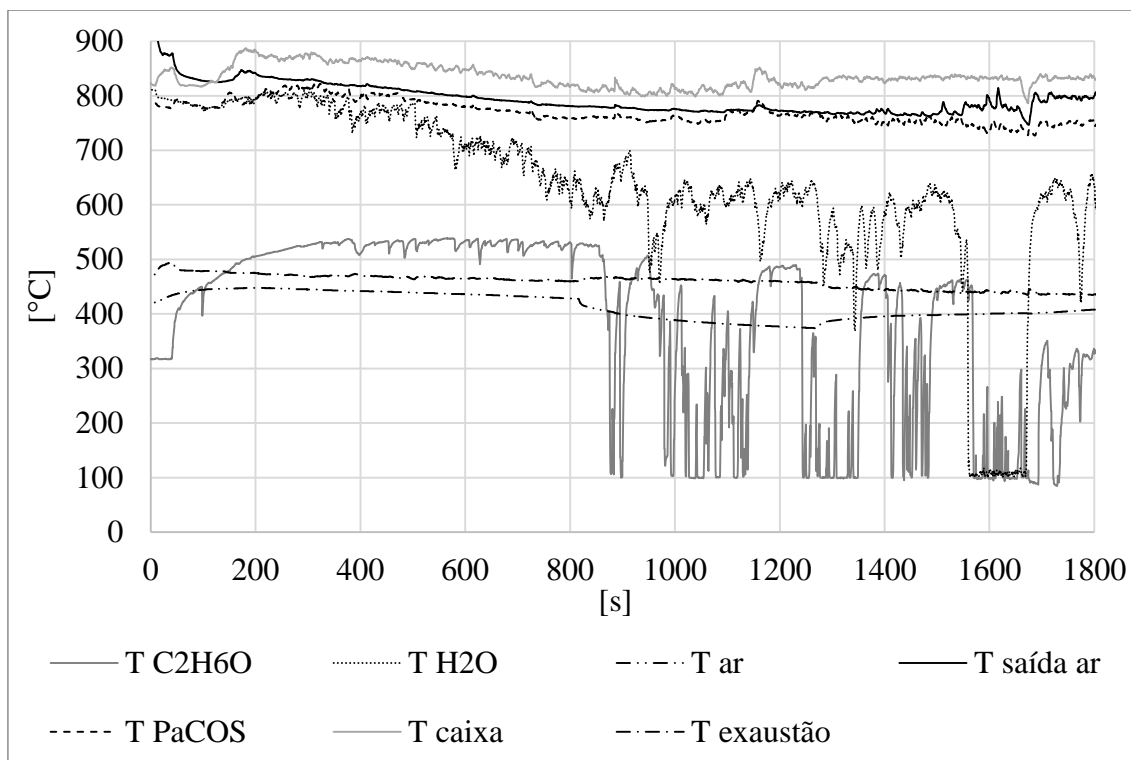


Figura 67 - Geração elétrica com  $C_2H_6O$ : temperaturas.

As instabilidades fluidodinâmicas refletiram-se sobre o sistema como um todo, provocando oscilações de todas as variáveis medidas, incluindo as variáveis elétricas mostradas na Figura 68, sendo provavelmente relacionadas com o menor desempenho elétrico com respeito ao caso da alimentação com  $H_2$ . Apesar disso, foi possível recolher os dados necessários à construção das curvas de polarização e potência mostradas na Figura 69, ou seja, as medições de tensão e corrente em cada patamar de potência entre os pontos A e B.

Os resultados relatados foram obtidos logo em seguida a um teste com alimentação com hidrogênio. Conseqüentemente, no começo do teste com etanol a tensão do empilhamento baixou, a partir do valor de circuito aberto associado ao funcionamento com  $H_2$  até um valor de aproximadamente 28 V. Uma vez estabilizado o potencial de circuito aberto (ponto A), foi aplicada uma carga elétrica crescente. A potência máxima gerada pelo empilhamento alimentado com etanol foi em torno de 250 W (ponto B). Foi feita uma tentativa de aumentar o desempenho alimentando mais ar ao catodo, mas não foi possível superar o máximo mencionado. Além disso, essa potência não pode ser mantida por muito tempo: foi rapidamente detectada uma rápida queda da potência gerada, que não foi possível reverter nem aumentando a vazão de etanol. O desempenho elétrico do empilhamento foi decaindo até a suspensão do teste.



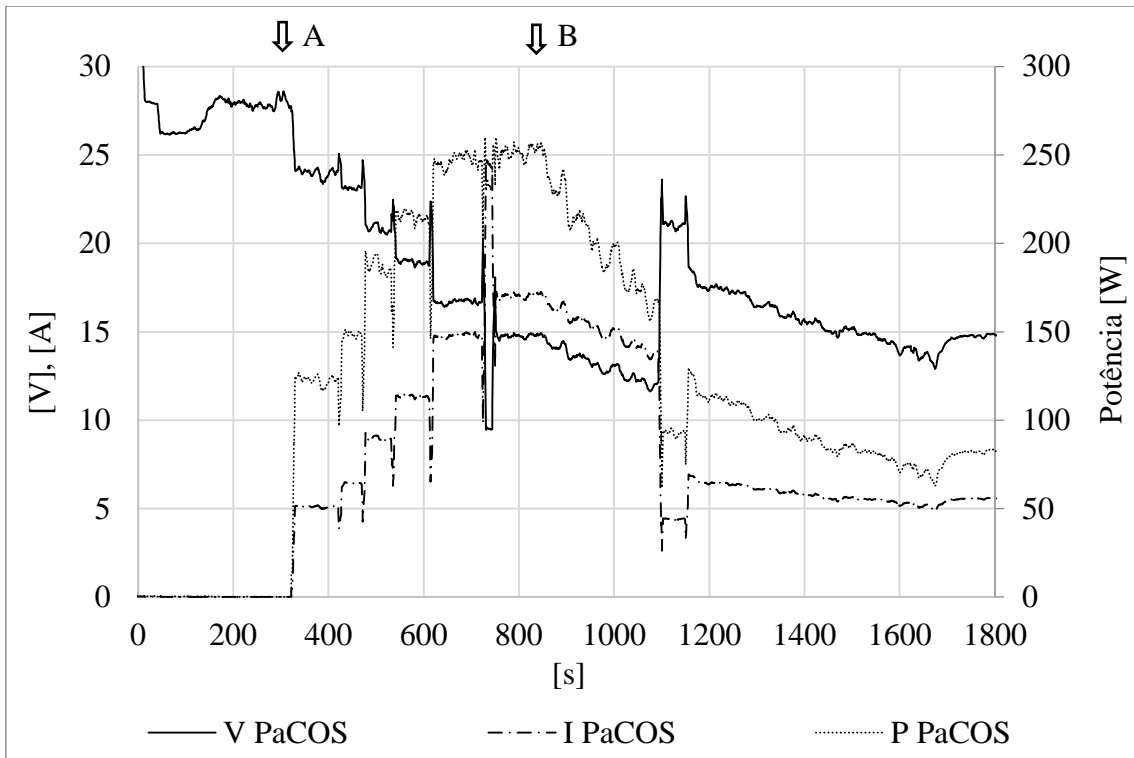


Figura 68 - Geração elétrica com  $C_2H_6O$ : variáveis elétricas.

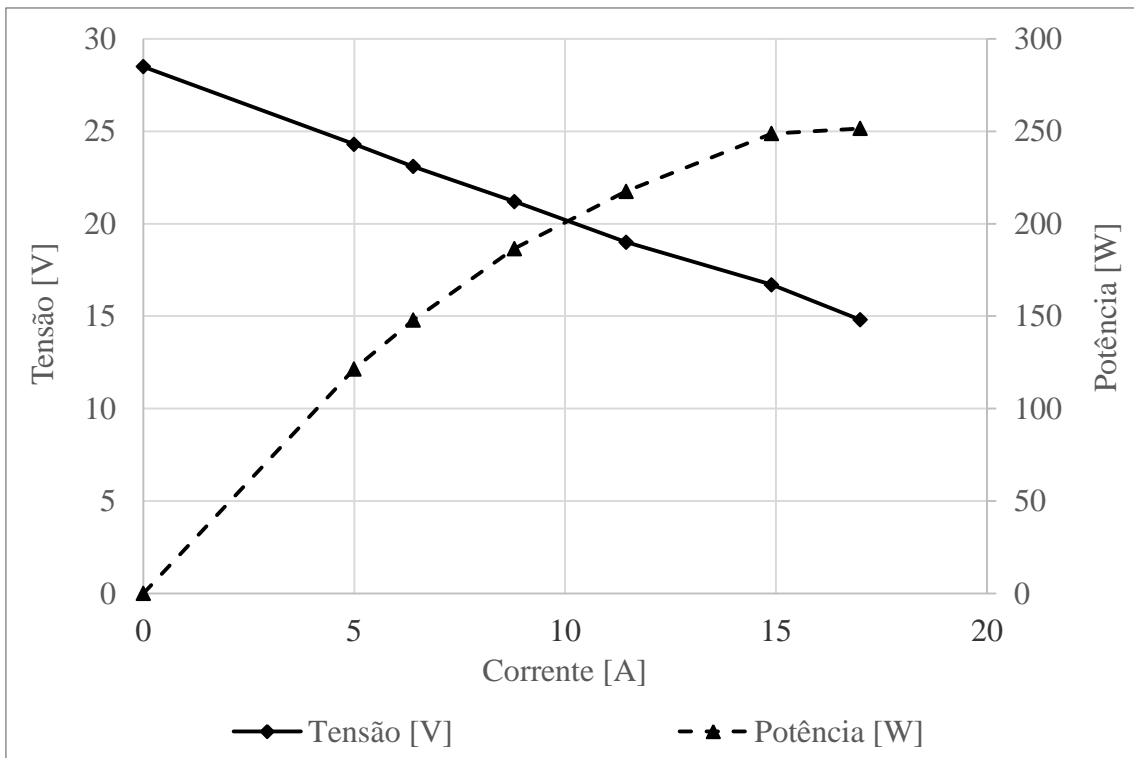


Figura 69 - Geração elétrica com  $C_2H_6O$ : curvas de polarização e de potência.

#### 4.4.4. Eficiência energética do balanço de planta

Para caracterizar o desempenho do sistema em termos de eficiência energética, foram coletados dados de consumo elétrico dos vários equipamentos no decorrer dos testes de geração elétrica relatados no item 4.4.3. Devido ao baixo nível de potência obtido com etanol, o nível de potência útil desejado (500 W) foi alcançado apenas no funcionamento com hidrogênio, com uma vazão bastante elevada de 14 NI/min. Todavia, os níveis de consumo elétrico dos equipamentos auxiliares (com a exceção das bombas e da eletroválvula de entrada do etanol, não ativas no caso do hidrogênio) resultariam iguais se o sistema estivesse sendo alimentado com etanol. De fato, a vazão de ar seria a mesma, e a potência consumida pelo controle, pelas eletroválvulas e pela eletrônica de potência independe do combustível usado. Foi então possível estimar como seria o consumo elétrico do balanço de planta se fosse possível gerar com etanol uma potência útil de 500 W. A eficiência elétrica do empilhamento foi considerada igual à obtida com hidrogênio, não sendo um fator crítico na determinação da eficiência do balanço de planta. A eficiência do conversor CC/CC foi calculada por extrapolação linear tomando em conta o maior nível de potência transferido, enquanto a do inversor foi mantida igual ao caso do H<sub>2</sub>. Na prática, a eficiência do inversor poderia ser um pouco maior, sendo a eficiência decrescente com o aumento da potência de saída, como relatado no item 4.3.7, mas a diferença não foi considerada substancial e foi preferido escolher o valor medido no funcionamento real. Para não correr o risco de subestimar o consumo elétrico das bombas, o mesmo foi colocado ao valor máximo medido nos testes de bancada, ou seja 7 W por bomba, como indicado no item 4.3.2. O consumo das eletroválvulas não depende das condições de operação do sistema em termos de vazão dos combustíveis e potência gerada pelo empilhamento: foi então possível considerar no cálculo o valor medido no funcionamento real com etanol.

Na Tabela 15 são reportados dados de potência e eficiência das várias partes do sistema, relativos ao ponto de funcionamento com hidrogênio no qual foi obtida a potência útil desejada e ao ponto de funcionamento de máxima potência alcançado com etanol, além dos resultados do cálculo que permitiu estimar o desempenho energético do sistema no funcionamento com etanol. As potências com sinal negativo são potências consumidas. O consumo energético do conversor CC/CC inclui as perdas nos cabos de conexão entre PaCOS e bateria e entre bateria e inversor, resultando então maior de quanto relatado no item 4.3.6. A eficiência total indicada é a eficiência do balanço de planta  $\eta_{BDP}$ , razão entre a potência elétrica útil injetada na rede e a potência gerada pela PaCOS:

$$\eta_{BdP} = P/P_{PaC} = 1 - (P_{BdP}/P_{PaC}) \quad (77)$$

Nesse cálculo não foi considerada a eficiência da PaCOS, mas apenas a potência total consumida pelo balanço de planta,  $P_{BdP}$ . Isso foi feito para ressaltar o desempenho do objeto principal dessa tese, ou seja, o sistema auxiliário para o funcionamento do empilhamento.

Tabela 15 - Produção e consumo de potência elétrica dos componentes do protótipo.

	<b>H<sub>2</sub></b>		<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O (real)</b>		<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O (calculado)</b>	
	<b>Potência</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Potência</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Potência</b>	<b>Eficiência</b>
	[W]	[%]	[W]	[%]	[W]	[%]
PaCOS	669,24	26,6	251,6	14,7	680,7	26,6
CC/CC	-56,25	91,6	-5,79	97,7	-58,54	91,4
Soprador	-20,02	90,6	-11,41	67,1	-20,02	85,3
Controle	-17,51		-15,97		-17,51	
Válvulas	-20,02		-39,71		-39,71	
Bombas	0		-13,69		-14	
Inversor	-32,35	94,2	-5,77	96,5	-30,92	94,2
<b>Total</b>	<b>523,1</b>	<b>78,2</b>	<b>161,79</b>	<b>63,3</b>	<b>500</b>	<b>73,5</b>

#### 4.4.5. Resfriamento do sistema

Uma vez concluída a geração de eletricidade, o sistema precisa reduzir a temperatura operação de forma segura e mais rápida possível. Na primeira parte do resfriamento dos testes efetuados, o empilhamento foi sempre alimentado com uma vazão de 2 NI/min de H<sub>2</sub> como gás de proteção contra a reoxidação do material anódico, como indicado pelo fabricante. O fato de alimentar combustível ao sistema também durante o resfriamento reduz a taxa de redução da temperatura, mas é essencial para evitar danos ao empilhamento. Todavia, quando a temperatura do empilhamento chegou em torno de 400 °C, o hidrogênio foi substituído por nitrogênio, para reduzir o impacto na duração do resfriamento. O fluxo de gás foi interrompido totalmente quando a temperatura da PaCOS desceu abaixo de 150 °C. Os gráficos da Figura 70 e da Figura 71 mostram os andamentos da vazão e pressão do ar e das temperaturas do sistema durante um resfriamento típico.

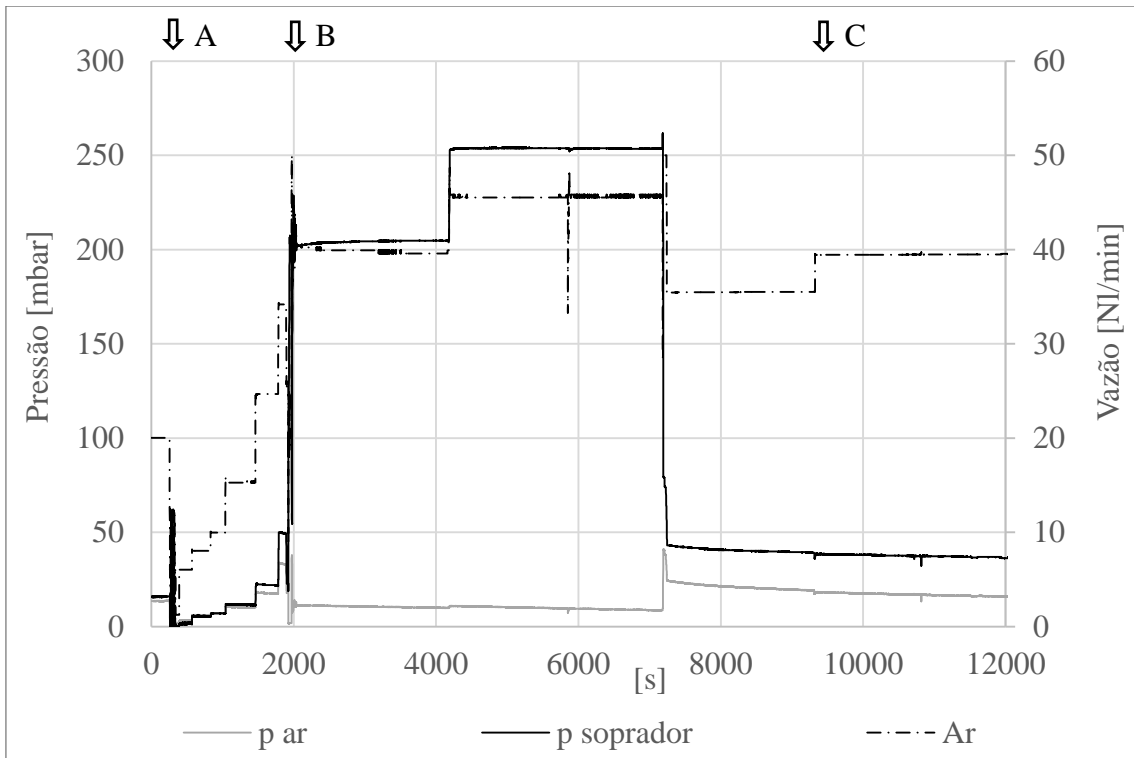


Figura 70 - Resfriamento do sistema: pressão e vazão do ar.

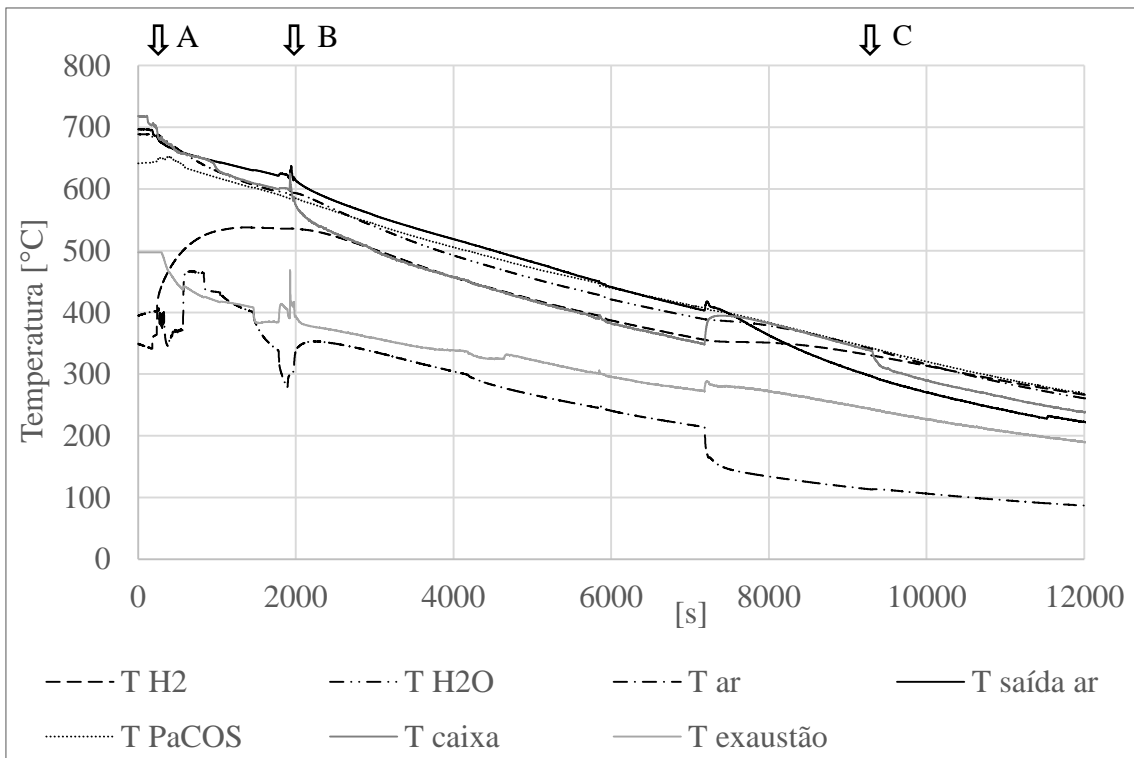


Figura 71 - Resfriamento do sistema: temperaturas.

No começo do transitório (ponto A), a vazão de ar é alimentada apenas através da PaCOS, sendo aumentada gradativamente para regular a taxa de resfriamento do sistema, que é mantida abaixo de 3 °C/min como indicado nas especificações do empilhamento. Uma vez alcançado o valor máximo admitido de 35 NI/min, a válvula de ar do injetor é aberta, dividindo a vazão entre empilhamento e combustor (ponto B). Isso permite aumentar a vazão de ar sem exceder o limite da PaCOS, garantindo uma taxa de resfriamento satisfatória. Quando o N<sub>2</sub> substitui o H<sub>2</sub> como gás de proteção (ponto C), regula-se novamente o ar para manter a mesma taxa de diminuição da temperatura. Na parte final do resfriamento, não reportada nos gráficos, a taxa assume valores menores, devido à menor diferença de temperatura entre o ambiente externo e o interno da caixa da PaCOS. A duração total do transitório foi de aproximadamente 4,5 horas, com uma taxa de resfriamento média de 2,2 °C/min.

Analogamente a quanto feito para o aquecimento foi estimado o consumo energético do sistema durante o transitório de resfriamento, como mostrado na Tabela 16. Considerações parecidas às expostas no item 4.4.2 foram aplicadas para calcular as potências médias e as energias consumidas pelos componentes do BdP. Diferentemente do caso do aquecimento, a potência absorvida pelas bombas não foi considerada igual à potência máxima, sendo a vazão dos fluidos menor. Apesar da potência média total do BdP ser levemente menor que no caso do aquecimento do sistema, o consumo energético total no resfriamento foi bem acima do valor calculado para o aquecimento, devido à maior duração do transitório.

Tabela 16 - Consumo elétrico dos dispositivos auxiliares durante o resfriamento.

<b>Variável</b>	<b>Soprador</b>	<b>Bombas</b>	<b>Válvulas</b>	<b>Controle</b>	<b>Total</b>	<b>Unidade</b>
Potência média	23,33	10,5	39,71	17,51	91,05	[W]
Energia	104,67	47,11	178,14	78,57	408,49	[Wh]

# 5. DISCUSSÃO

Nesse capítulo é desenvolvida uma análise dos resultados apresentados no capítulo 4, começando pelo modelo matemático, passando para o projeto e teste dos componentes, até o funcionamento do sistema completo. O desempenho dos componentes e do conjunto foi discutido, verificando a aderência do mesmo aos requisitos de projeto e identificando os principais fatores que influenciam o funcionamento do protótipo.

## 5.1. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Na Tabela 17 são resumidos os valores das variáveis analisadas nas diferentes condições de operação estudadas na simulação computacional do sistema. Os casos incluídos na Tabela 17, na Figura 72 e na Figura 73 são os que possuem a maior eficiência elétrica para cada configuração, exceto no caso da recirculação catódica, onde foi reportada a situação de máxima eficiência total, soma das eficiências térmica e elétrica. Na Figura 72 pode-se ver que a eficiência elétrica global apresenta um máximo no caso da recirculação anódica, e que a variação relativa entre as várias situações é bastante reduzida. É possível também notar que a eficiência térmica é maior quanto menor é a eficiência elétrica. Os casos com maior eficiência térmica são também os que apresentam um valor de potência térmica recuperada maior, como é evidenciado na Figura 73. Na mesma Figura é possível avaliar as variações da potência consumida pelo soprador, que é aproximadamente constante entre as diferentes situações, exceto no caso da recirculação catódica, onde a diferença é mais apreciável, resultando em um valor menor. A potência elétrica da PaCOS também muda pouco entre os casos reportados.

A análise do comportamento do sistema em resposta à mudança dos parâmetros fornece informações sobre os valores desejados dos mesmos. Para maximizar  $\eta_{el}$ , é preciso de maneira geral reduzir o valor de  $\lambda_{C_2H_6O}$  e  $\lambda_{ar}$ , colocando  $f_{rec,C}$  igual a 0, ou seja, não utilizando a recirculação catódica. Se as características do sistema impõem a alimentação de água para impedir o depósito de carbono sólido ( $V/E$  maior do que zero) é desejável utilizar valores de  $V/E$  e  $f_{H_2O,ext}$  menores possível. Comparando os valores médios da sensibilidade de  $\eta_{el}$  às variações dos diferentes parâmetros, é

possível concluir que o mais influente é  $\lambda_{C_2H_6O}$ , seguido por  $V/E$  e  $f_{H_2O,ext}$ , esse último especialmente no caso de valores elevados de  $V/E$ .  $\lambda_{ar}$  e  $f_{rec,C}$  são, por sua vez, caracterizados por um efeito muito limitado, quase nulo no caso de  $f_{rec,C}$ .

Tabela 17 - Comparação entre as condições de operação com melhor desempenho para as diferentes topologias analisadas.

Variável	Etanol puro	Etanol e água externa	Etanol puro com recirculação anódica	Etanol puro com recirculação catódica	Unidade
$\lambda_{C_2H_6O}$	1,2	1,2	1,2	1,2	-
$\lambda_{ar}$	1,6	1,6	1,6	1,6	-
$V/E$	0	2	2	0	-
$f_{rec,C}$	0	0	0	0,3	-
$f_{H_2O,ext}$	1	1	0	1	-
$\eta_{PaC}$	48,7	45,8	49,4	48,3	[%]
$\eta_{BaP}$	90,1	89,8	89,7	90,5	[%]
$\eta_{el}$	43,9	41,1	44,3	43,7	[%]
$\eta_t$	13	17,1	12	13,7	[%]
$\dot{n}_{C_2H_6O}$	2,9	3,1	2,87	2,92	[ml/min]
$PQ$	1140	1215	1128	1144	[W]
$P_{PaC}$	555	557	558	553	[W]
$Q_{REC}$	149	208	135	156	[W]
$P_B$	4	7	4	4	[mW]
$P_S$	23,2	24,7	25,7	20,6	[W]
$P_{EP}$	31,9	31,9	31,9	31,9	[W]
$V_p$	694	653	651	688	[mV]
$V$	20,8	19,6	19,5	20,7	[V]
$I$	26,7	28,4	28,5	26,8	[A]
$T_6$	1026	1027	984	1067	[°C]

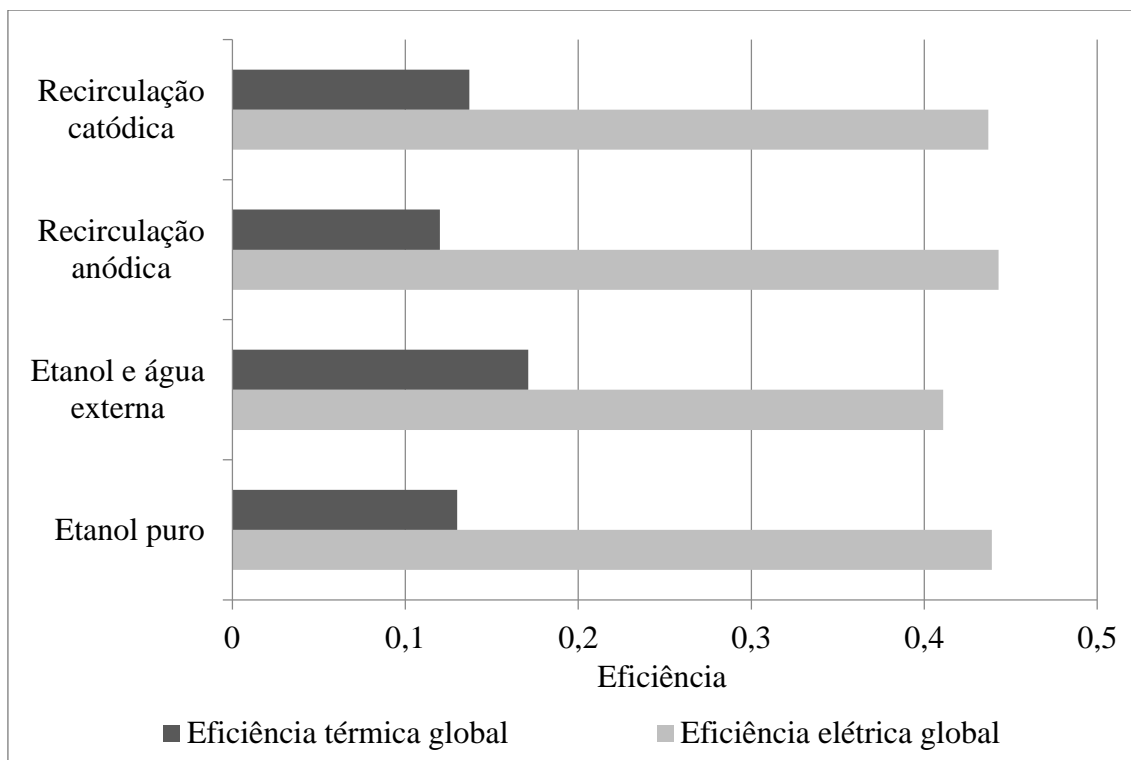


Figura 72 - Eficiências globais simuladas do sistema, comparação.

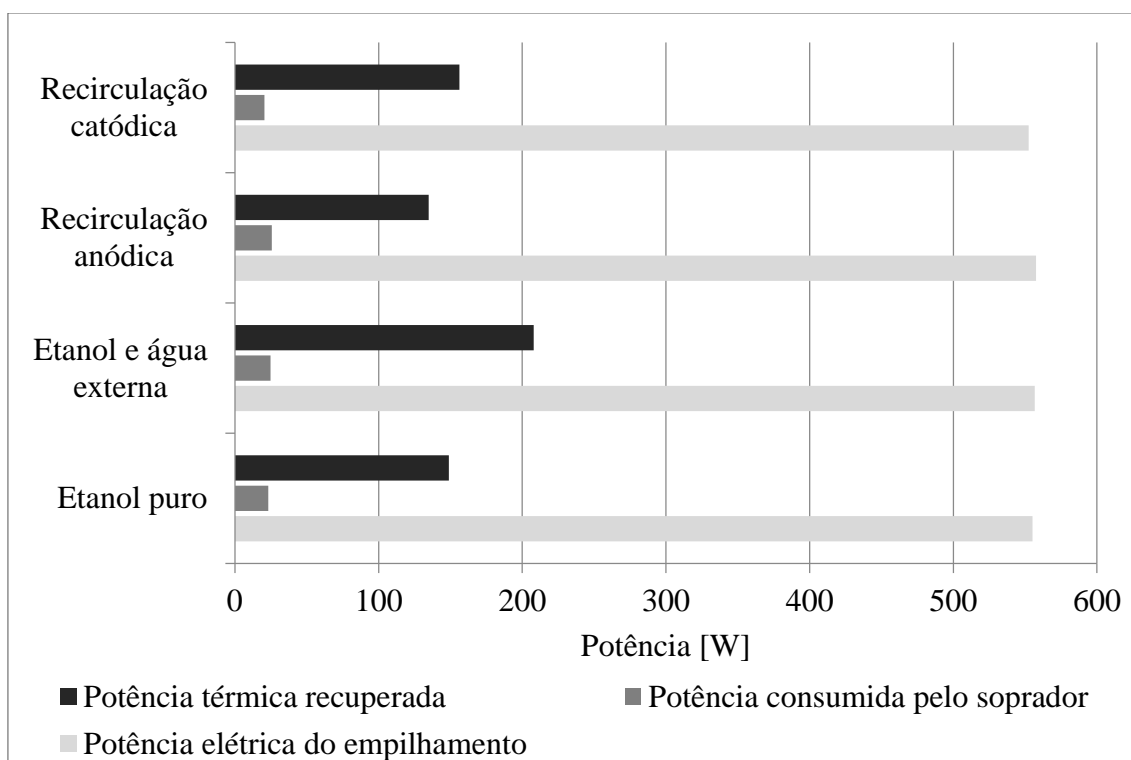


Figura 73 - Potências simuladas do sistema, comparação.

Os resultados da simulação do sistema alimentado com etanol puro, conforme mostrado na Figura 18, na Figura 19 e na Figura 20, bem como nos dados da Tabela 17, permitem



concluir que o aumento do excesso de combustível, ou seja, um valor de  $\lambda_{C_2H_6O}$  maior provoca uma queda considerável da eficiência elétrica e um aumento da eficiência térmica. Na Figura 21 vê-se claramente que a diluição do etanol com água, no caso em que a água seja alimentada utilizando uma bomba dedicada, ocasiona uma queda relevante da eficiência do sistema. O efeito sobre a eficiência do sistema é menos negativo, ou até positivo, no caso em que a presença de água no anodo seja incrementada utilizando a recirculação parcial dos gases do rejeito anódico. A recirculação dos gases de saída catódica tem um efeito muito limitado, não relevante para a aplicação estudada.

A Tabela 17 resume os valores das variáveis obtidas em todas as simulações. Todos os valores de eficiência reportados na Tabela são relativos ao poder calorífico superior do combustível. Os resultados evidenciam duas opções convenientes para o sistema:

- **Operação com etanol puro, sem recirculação.** Nesse caso o sistema é muito simples, não requerendo a utilização de ejetores e da bomba d'água. Ao mesmo tempo, a eficiência elétrica é elevada (43,9 %). Porém, para prevenir o depósito de carbono o funcionamento nessa modalidade requer a utilização de materiais apropriados, além do projeto e do gerenciamento adequados do balanço de planta.
- **Operação com recirculação anódica.** Nessa configuração o sistema apresenta uma complexidade maior, apesar de não requerer o uso da bomba d'água, mas a probabilidade de depósito de carbono é menor. Além disso, a eficiência elétrica é um pouco maior do que no caso da operação com etanol puro sem recirculação (44,3 %).

Esses resultados sugerem que no caso do presente projeto a topologia mais conveniente seria operação com etanol puro sem recirculação, viabilizada pelo uso de anodos proprietários desenvolvidos com o objetivo de evitar a formação de carbono sólido [19, 20]. Todavia, o desenvolvimento de um empilhamento com o uso desse material ainda está em andamento. Como já mencionado, essa tese foi então continuada empregando um empilhamento comercial, funcionando em regime de reforma interna, para permitir desenvolver técnicas de projeto do balanço de planta que poderão ser aplicadas quando o empilhamento para uso direto do etanol puro estiver disponível. Além disso, na literatura não existem dados sobre o funcionamento de empilhamentos comerciais com etanol como combustível. No futuro, os dados recolhidos serão comparados com os obtidos com o empilhamento construído com o material do Laboratório de Hidrogênio.

## 5.2. TESTES DOS COMPONENTES

### 5.2.1. Empilhamento PaCOS

Durante a medição das primeiras três curvas de polarização com o empilhamento da *Almus AG*, o aumento da temperatura de teste resultou em um aumento do desempenho do módulo. O ponto melhor foi obtido durante a terceira medição, com um pico de potência de 607 W e uma eficiência elétrica do módulo de 28,1 %. Nos ensaios subsequentes não foi possível obter de novo resultados parecidos. Na medição da curva 4, Figura 36, o aumento adicional da temperatura não provocou um melhoramento do desempenho, que ao contrário piorou, devido provavelmente à diminuição dos fluxos de combustível e oxidante. Quando o fluxo foi elevado novamente ao nível inicial (curva 5 da Figura 36) permaneceu, todavia, impossível alcançar resultados no mesmo nível daqueles obtidos nos primeiros três ensaios. De fato, nessa última medição a potência máxima não superou 328 W, amplamente abaixo do valor obtido na primeira curva (503 W), que foi registrada em condições de temperatura parecidas. A potência produzida pelo empilhamento diminuiu constantemente nos ensaios seguintes, em alguns casos de forma dramática, não alcançando novamente esse desempenho. Isso sugeriu a possibilidade de um problema interno dos empilhamentos e inviabilizou a possibilidade de testar o sistema com etanol como combustível. Danos resultantes da ciclagem térmica do sistema parecem ser a causa mais provável para a degradação do desempenho do sistema. Essa explicação é também coerente com a diferença observada entre o estado das pilhas desmontadas de posições diferentes do empilhamento, como mostrado na Figura 37. As pilhas posicionadas na parte superior do empilhamento, mais quente, foram provavelmente submetidas a estresses térmicos de maior magnitude, resultando de fato mais danificadas.

Um aspecto interessante evidenciado nos testes do primeiro empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* foi que, apesar do potencial de circuito aberto ter alcançado um valor consistente com os resultados da literatura para PaCOS unitárias em regime de reforma interna [37, 62 - 64], a potência máxima do empilhamento se mostrou muito menor no funcionamento com etanol do que com hidrogênio. Esse efeito era esperado, dado que o etanol não pode participar diretamente das reações eletroquímicas no anodo comercial, que envolvem principalmente hidrogênio e monóxido de carbono. O desempenho eletroquímico das pilhas depende então essencialmente da disponibilidade de H<sub>2</sub> e CO, como evidenciado na literatura [62]. Esses gases são produzidos a partir da

combinação do etanol com o vapor d'água, na reação de reforma a vapor do etanol (75). Essa reação ocorre com boa velocidade nos níveis de temperatura dos empilhamentos PaCOS e os anodos comerciais baseados em níquel são bons catalisadores para a reforma a vapor. Todavia, o fato que parte da área útil das pilhas seja empregada para catalisar a reação (75) leva a uma redução da área ativa disponível para a produção de corrente, com conseqüente queda da densidade de potência do empilhamento no funcionamento com etanol. Além disso, a conversão do etanol resulta provavelmente incompleta nos níveis de temperatura aplicados, levando a uma diminuição do combustível disponível para produção de corrente elétrica. Foram também observadas instabilidades no nível de potência produzida, possivelmente relacionadas com dificuldades na passagem do combustível nos compartimentos anódicos (projetados para fluxo de hidrogênio), com conseqüentes oscilações de vazão. Outro ponto importante é que o nível de potência máxima decaiu rapidamente no decorrer dos testes. Um fator de degradação pode ter sido a operação com etanol: a reação (75) é endotérmica e quando acontece no empilhamento pode criar estresses térmicos e danificar as pilhas. Além disso, é possível que o fluxo de água empregado possa não ter sido suficiente para prevenir completamente a formação de carbono a partir do etanol, o que pode acontecer na alta temperatura do anodo das PaCOS. Essa eventualidade é amplamente relatada na literatura [27 - 30] e resulta um dos problemas principais que dificulta o uso de etanol em PaCOS. Por outro lado, a queda da potência máxima manifestou-se também na operação com H<sub>2</sub> e não foi possível observar uma clara relação entre esse efeito e o tempo de operação com etanol. Um aspecto positivo da operação com etanol foi o nível de eficiência elétrica, que se mostrou um pouco mais alta que nos testes efetuados imediatamente antes ou depois com hidrogênio. Os dados obtidos evidenciaram então que a operação do empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* com etanol como combustível em regime de reforma interna é viável, mas leva a uma marcada queda de potência, a instabilidades no funcionamento e provavelmente a uma mais rápida degradação do sistema.

Os dados mais relevantes dos testes do segundo empilhamento *SOFCMan NIMTE-A-Stack-301* foram relativos à investigação da influência das vazões de reagentes sobre a produção elétrica. O efeito do aumento das vazões sobre a potência máxima produzida foi positivo, tanto no caso de combustível quanto do oxidante. Todavia, o aumento da vazão de ar não comportou um efeito positivo tão marcado como no caso do hidrogênio. Isso é provavelmente devido ao fato que a vazão mínima de ar

sugerida pelo fabricante (20 NI/min) já fornece suficiente oxidante para as reações eletroquímicas em todo o intervalo de operação da PaCOS. Provavelmente, o pequeno aumento da potência máxima deve-se ao aumento da eficiência das pilhas devido à maior pressão parcial do ar relacionada às vazões elevadas. De fato, a literatura sobre pilhas a combustível relaciona claramente o aumento da pressão parcial dos reagentes com o aumento da eficiência das pilhas a combustível [1]. Esse efeito é, porém, limitado, como pode ser visto nos dados reais mostrados na Figura 42. No caso do hidrogênio, o aumento da vazão resultou em vez em um incremento marcado da potência máxima produzida pelo empilhamento, sinalizando que os pontos de funcionamento praticados para cada vazão se situam na proximidade do ponto de potência máxima que o empilhamento pode sustentar para cada vazão. Ao aumentar a potência, todavia, é necessário um excesso de combustível cada vez maior para alcançar esse máximo. Isso é sinalizado pelo andamento da eficiência elétrica do empilhamento, calculada como razão entre a energia elétrica produzida e a energia química introduzida com o combustível. Ao aumentar da potência, a eficiência cai, significando uma maior quantidade de hidrogênio que não reage no empilhamento (Figura 43). De acordo com as informações recolhidas, o ponto de operação mais apropriado para o empilhamento no sistema seria então caracterizado pela mínima vazão de hidrogênio que permite de alcançar a potência requerida (aproximadamente 650 W), ou seja, 10 NI/min. Do ponto de vista da vazão de ar, valores menores são associados a um consumo energético do soprador menor, fazendo com que seja vantajoso tentar minimizar a vazão empregada.

### **5.2.2. Bomba peristáltica**

Do ponto de vista da alimentação de etanol ao sistema, a bomba peristáltica testada demonstrou um desempenho suficiente, sendo capaz de gerar uma vazão de etanol superior à requerida, que de acordo com a simulação do sistema e com os dados obtidos sobre o funcionamento dos empilhamentos comerciais em nenhum caso supera os 6,5 ml/min. No caso da água, vazões maiores do que 15 ml/min poderiam resultar necessárias empregando  $\lambda_{C_2H_6O}$  e  $V/E$  elevados. Isso é evidente analisando a Figura 74: não resulta possível manter valores de  $V/E$  acima de 7,5 em tudo o intervalo dos valores possíveis de vazão de etanol, porque isso requereria uma vazão de água acima do limite máximo da bomba testada. Todavia, esse limite não foi considerado crítico, sendo que nos testes práticos do sistema a vazão de etanol não superou os 5 ml/min, e o valor de  $V/E$  aplicado não foi superior a 7,5. Inclusive, para vazões de água superiores

a 15 ml/min seriam excedidos também os limites de operação de outras partes do sistema, em particular o evaporador de água (ver item 4.3.4).

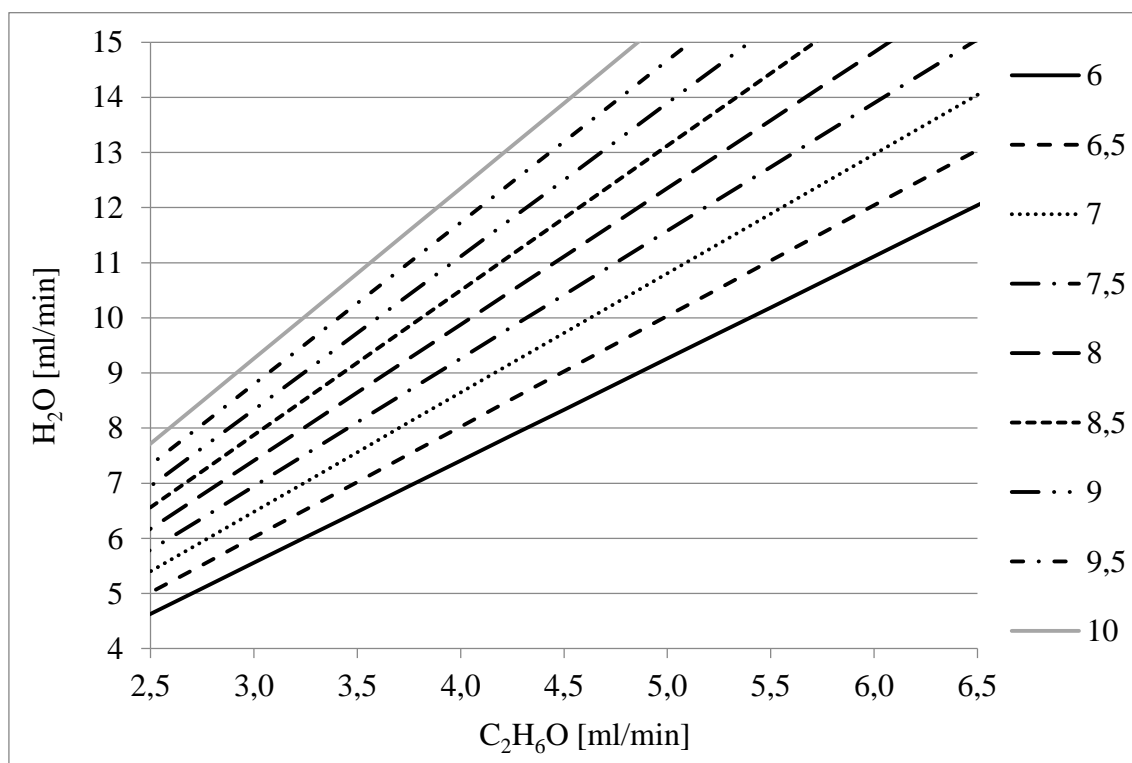


Figura 74 - Vazão de água correspondente à vazão de etanol alimentada, para diferentes valores de  $V/E$ .

A potência consumida pelas bombas foi muito baixa e a precisão do controle adequada. Os testes efetuados permitiram construir uma relação quase linear entre sinal de controle e vazão gerada, como mostrado na Figura 44. Essa relação foi empregada no controle do sistema para permitir ao *software* de calcular o sinal de controle necessário em cada momento.

### 5.2.3. Sopradores

Os gráficos do item 4.3.3 demonstram como ambos os sopradores se mostraram adequados para a aplicação, sendo capazes de gerar a vazão requerida com um consumo de potência razoável. Na Figura 46 e na Figura 48 é possível ver que, no intervalo de vazão de projeto do sistema (20 - 35 NI/min), o consumo do modelo *Hi-Blow* é menor do que o consumo do modelo *Vairex* em todos os pontos de funcionamento. Isso é condizente com o fato de que a queda da vazão com o aumento da diferença de pressão é menos marcada no caso do modelo *Hi-Blow*, como é possível verificar comparando as

características pressão/vazão dos dois dispositivos (Figura 45 e Figura 47). Outro aspecto que favorece o modelo *FC-8040* é o baixo nível de ruído durante a operação, muito menor que no caso do *VBR2 2 48VCC*. Por outro lado, o modelo da *Vairex* é capaz de enfrentar perdas de pressão mais elevadas que o *Hi-Blow*. Sendo em muitos casos o soprador de ar o dispositivo individual do balanço de planta que consome a maior potência, a escolha entre os dois modelos deve ser feita baseando-se principalmente no valor da potência elétrica absorvida. De fato, limitar o consumo de potência dos auxiliares é extremamente importante para obter uma boa eficiência elétrica do sistema. Conseqüentemente, o soprador *VBR2 2 48VCC* seria escolhido só no caso em que a perda de pressão da linha catódica, para o intervalo de vazão de ar requerida pelo empilhamento, resultasse alta demais para o *Hi-Blow*. No momento da escolha do soprador para a montagem final do sistema, os dados recolhidos nos testes do empilhamento e dos outros componentes sugeria que isso não fosse verificado. No protótipo foi então utilizado o modelo *FC-8040*. A adequação da escolha feita foi confirmada nos testes da seção 4.4, durante os quais o soprador *FC-8040* demonstrou-se sempre capaz de satisfazer as condições de operação desejadas.

Do ponto de vista do soprador, nos testes do sistema completo foram identificadas duas condições de operação principais, como é possível ver no gráfico de Figura 61:

- **Ar ao combustor.** Na inicialização, o fluxo de ar é enviado exclusivamente ao combustor. A vazão inicial é 20 NI/min, gerando uma perda de pressão de cerca 140 mbar. O aquecimento do combustor é associado ao aumento da perda de pressão no mesmo, até alcançar um nível de aproximadamente 180 mbar. Uma vez estabelecida a combustão e aquecido o corpo do combustor, a vazão de ar é aumentada até 25 NI/min, valor ao qual corresponde uma perda de pressão de cerca de 335 mbar.
- **Ar ao empilhamento.** Uma vez que a temperatura da área de pós-combustão supera os 500 °C, a combustão do etanol para aquecer o sistema é transferida do combustor externo à área interna à caixa do empilhamento. Nessa situação, o ar necessário à combustão é alimentado diretamente através do empilhamento, para manter a combustão confinada na caixa e garantir um aquecimento gradual e uniforme do empilhamento. A vazão de ar no começo dessa fase é de 35 NI/min, o máximo sugerido pelo fabricante do empilhamento, valor mantido até o começo da produção elétrica. Com essa vazão, a perda de pressão enfrentada pelo soprador é inicialmente pouco mais de 30 mbar, mas também nesse caso o aquecimento do sistema é

associado a um aumento do  $\Delta p$ , até chegar a um valor de aproximadamente 50 mbar. A perda de pressão durante a produção elétrica é ainda menor, em torno de 25 mbar, sendo a vazão de ar de regime situada em torno de 25 NI/min.

O consumo energético do soprador resultou baixo tanto no funcionamento de regime (aproximadamente 20 W, como indicado na Tabela 15) quanto nos transitórios de aquecimento e resfriamento, alcançando um máximo de cerca 35 W na alimentação do injetor do combustor.

De forma parecida a quanto feito no caso das bombas, os dados recolhidos nos testes do soprador foram empregados para construir um mapa de funcionamento do mesmo, que relaciona o sinal de controle e a pressão de saída com a vazão gerada. Esse mapa foi utilizado no *software* de controle para calcular o sinal de controle necessário para produzir a vazão de ar desejada.

#### **5.2.4. Trocadores de calor**

Analisando os resultados experimentais do item 4.3.4 é possível verificar que o desempenho real dos trocadores de calor projetados excedeu o esperado. De fato, a temperatura de saída dos fluídos foi acima do valor de projeto para todos os valores de vazão experimentados. Nos testes dos três trocadores foi verificado que um incremento da vazão do fluido frio provocou um aumento da potência térmica trocada  $Q_f$ , mas uma diminuição da temperatura de saída do fluido e da eficiência de troca térmica. No caso do evaporador do etanol o incremento da vazão provocou até uma diminuição de  $Q_f$ . Isso significa que, do ponto de vista da troca térmica, é conveniente utilizar as menores vazões de fluidos possíveis. Os dados recolhidos indicam que o evaporador da água foi o trocador mais eficiente, com um valor de  $\varepsilon_{TR}$  entre 70 e 100 %. O evaporador do etanol e o pré-aquecedor do ar demonstraram uma eficiência parecida, entre 40 e 60 % dependendo do ponto de funcionamento. Vários fatores podem explicar essa diferença:

- o coeficiente de troca térmica relativo ao ar é duas ordens de magnitude menor do que o calculado para o etanol e a água. De fato, o valor de  $h$  associado a fluidos em mudança de estado é normalmente consideravelmente maior que no caso de fluxos monofásicos;
- o pré-aquecedor do ar é colocado em série ao evaporador do etanol, recebendo um fluxo de gases de exaustão a uma temperatura menor que os outros trocadores. A

redução da diferença entre as temperaturas dos fluidos frio e quente comporta uma redução da troca térmica;

- foi necessário aplicar isolamento térmico à porção do evaporador do etanol localizada dentro da caixa de contenção do empilhamento, como é possível ver na parte (D) da Figura 58. Isso foi feito para reduzir o tempo de permanência do combustível na área mais quente do sistema, reduzindo a probabilidade de formação de carbono por pirolise nas tubulações de alimentação do etanol. De fato, nos primeiros testes do protótipo, efetuados sem o isolamento térmico de proteção, foi constatada uma relevante formação de carbono nessa parte do sistema. Todavia, a presença do isolante piora sensivelmente a troca térmica, prejudicando o valor de  $\varepsilon_{TR}$  relativo ao evaporador do etanol.

Apesar da temperatura de saída média dos trocadores ser maior do que o valor de projeto e adequada à aplicação, os evaporadores demonstraram alguma dificuldade em produzir uma evaporação estável dos fluxos líquidos para as vazões de água e etanol mais altas. De fato, analisando as temperaturas de etanol e água na Figura 67, pode-se ver como variam amplamente no tempo, entre a temperatura de vaporização e um valor máximo bem mais próximo da temperatura da caixa do empilhamento. Isso parece sugerir que a evaporação dos fluidos não está acontecendo de forma contínua e que em alguns momentos chega a entrar em contato com o termopar um fluxo ainda não completamente vaporizado. Claramente, esse problema parece agravar-se com o aumento da vazão dos líquidos. É possível que esse problema operacional seja um dos responsáveis do baixo desempenho do empilhamento com etanol como combustível.

A perda de pressão introduzida pelos trocadores nos circuitos anódico e catódico resultou baixa, assumindo valores sempre menores de 30 mbar para o evaporador do etanol e de 20 mbar para o pré-aquecedor do ar. No caso da água o valor foi tão reduzido que se situou abaixo do limite de precisão do manômetro utilizado. Conseqüentemente, o gasto energético provocado pela inserção dos trocadores no sistema é também baixo.

### **5.2.5. Combustor**

O combustor projetado funcionou como esperado, produzindo uma queima estável do etanol. A temperatura de saída mínima desejada foi alcançada e superada. Apesar de requerer na inicialização uma mistura combustível/comburente rica, no funcionamento de regime foi possível incrementar o fluxo de ar, passando rapidamente à operação com



uma mistura pobre ( $\lambda_{comb} > 1$ ), condição que garante a minimização de hidrocarbonetos não reagidos e monóxido de carbono nos gases resultantes da queima. O incremento da vazão de ar resulta também em um aumento mais rápido da temperatura na saída do combustor (na Figura 53 é possível verificar um rápido aumento da temperatura de saída do combustor no momento do aumento do fluxo de ar), provavelmente relacionado com a melhoria da eficiência da queima. Tanto o fluxo de ar quanto o de etanol empregados resultaram, como projetado, próximos aos valores de regime utilizados pelo empilhamento. Considerando o valor de queda de pressão provocada pelo injetor do etanol que foi registrado durante o desenvolvimento do mesmo (200 mbar, como mencionado no item 4.2.3), e o  $\Delta p$  total do conjunto injetor/câmara de combustão medido nos testes práticos do combustor (em torno de 335 mbar, como indicado na Figura 53), pode-se concluir que a perda de pressão introduzida exclusivamente pela câmara de combustão foi de aproximadamente 145 mbar. Esse patamar se compara favoravelmente com o valor de projeto de 200 mbar indicado na Tabela 5, confirmando a validade das técnicas de projeto e fabricação da câmara de combustão. O valor total de 335 mbar, apesar de muito maior que a diferença de pressão do compartimento catódico do empilhamento, não resulta, todavia, excessivo, consentindo de utilizar o mesmo soprador escolhido para o funcionamento de regime do protótipo. A temperatura mínima dos gases na saída da câmara de combustão foi alcançada e superada, chegando a um valor máximo de pouco menos de 1000 °C. O combustor confirmou o funcionamento adequado também uma vez integrado no protótipo completo, permitindo estabelecer uma rotina de inicialização do componente segura e eficaz. A duração da porção do transitório de aquecimento do sistema onde o combustor permaneceu ligado foi de aproximadamente 45 minutos.

#### **5.2.6. Conversor CC/CC**

Os testes do conversor CC/CC projetado deram resultados satisfatórios: a eficiência demonstrada pelo conversor decresceu ao crescer da potência de saída, mas manteve-se acima de 94 %. A eficiência no ponto de funcionamento de regime alcançado na prática, caracterizado por uma produção de potência útil de pouco mais de 500 W, atestou-se aproximadamente em 94,6 %, valor considerado adequado à aplicação. Nos testes práticos não foi possível alcançar a potência máxima de projeto de 750 W, devido às limitações do empilhamento utilizado como fonte de corrente; conseqüentemente, não foi possível comparar a eficiência real com o resultado das simulações exposto no item

4.2.4. Todavia, extrapolando de forma linear o andamento da potência de saída e da eficiência do conversor em função da potência de entrada, é possível estimar o valor que a eficiência do conversor poderia assumir com uma potência de saída igual ao valor de projeto. Como mostrado no gráfico da Figura 75, uma potência de saída de 750 W deveria corresponder a uma potência de entrada de pouco mais de 800 W, e a eficiência do conversor nesse caso assumiria um valor de aproximadamente 93,4 %, bem próximo aos valores resultantes das simulações do dispositivo relatados na Tabela 7. Isso confirma que o projeto e a realização prática do conversor foram adequados.

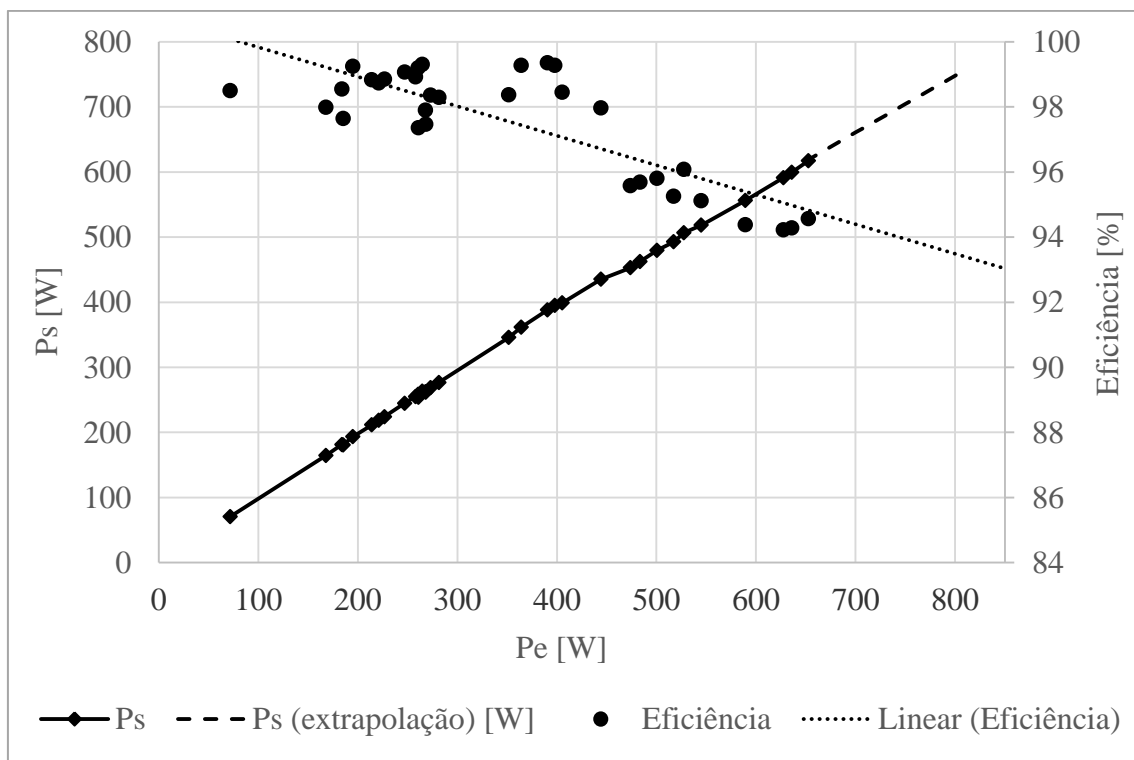


Figura 75 - Extrapolação linear da tendência da eficiência do conversor CC/CC.

### 5.2.7. Inversor

O inversor *Victron MultiPlus Compact* demonstrou uma ótima eficiência de conversão na injeção de energia na rede, situada entre 94 e 98 %. As perdas associadas com a conversão parecem aumentar com o aumento da potência transferida, reduzindo a eficiência para os valores mais altos de potência. Na alimentação de cargas através da saída CA monodirecional, o inversor não demonstrou um bom desempenho em carga parcial: o valor de eficiência medida com carga alta resultou em torno de 92 %, enquanto para baixos valores de carga elétrica o rendimento do inversor não superou o 90 %. De maneira geral, o modelo escolhido demonstrou ser adequado ao uso no

protótipo e de ter um desempenho real alinhado com as especificações fornecidas pela empresa produtora.

A lógica de funcionamento implementada no dispositivo pelo fabricante resulta bastante compatível com a que foi desenvolvida nessa tese, tendo como objetivo a manutenção do nível de tensão das baterias a um valor fixo, que pode ser identificado com o  $E_{bat,obj}$  definido no item 4.2.6. Todavia, para obter uma perfeita aderência com a lógica projetada, deveria ser possível para o sistema de controle do protótipo alterar o estado de funcionamento do inversor, atualmente fixado pelo controle interno do dispositivo de forma independente. Uma característica ausente no modelo testado que poderia então resultar interessante para desenvolvimentos futuros é a possibilidade de integrar o sistema de controle do inversor com o do microgerador como um todo, permitindo ao *software* do protótipo de influenciar também o funcionamento do inversor.

### **5.3. TESTES DO SISTEMA COMPLETO**

O protótipo foi testado exaustivamente, demonstrando a possibilidade de inicializar, manter em operação e desligar o sistema em segurança, respeitando as condições de funcionamento indicadas pelo fabricante do empilhamento. Como já mencionado, o obstáculo principal que impediu de conseguir uma geração elétrica estável e eficiente utilizando etanol foi a PaCOS, projetada exclusivamente para o funcionamento com hidrogênio. Ainda assim, os testes evidenciaram vários pontos importantes para pesquisas futuras, tanto para a melhoria do balanço de planta realizado quanto para o desenvolvimento de um empilhamento dedicado ao funcionamento com etanol. Nessa seção é analisada cada fase da operação do sistema, com o intuito de apontar os aspectos mais interessantes desse ponto de vista.

#### **5.3.1. Aquecimento do sistema**

O aquecimento do sistema empregando etanol foi realizado com sucesso em um intervalo de tempo condizente com o estado da arte da tecnologia. Rotinas eficazes de inicialização da combustão, tanto no combustor externo quanto na área de combustão interna à caixa do empilhamento, foram desenvolvidas. As interdependências entre as diferentes variáveis de temperatura, pressão e vazão foram identificadas, permitindo a otimização do funcionamento do sistema.

O consumo energético total registrado para essa fase foi de pouco mais de 240 Wh, valor considerado aceitável. De fato, esse dado implica que o transitório de aquecimento do sistema, durante o qual o sistema absorve energia das baterias sem produzir potência elétrica, pode ser completado consumindo pouco mais de 10 Ah de carga das baterias. Dado que a capacidade mínima que o banco de baterias deve possuir para ser adequado à aplicação, calculada no item 4.2.5, é de 85 Ah, o inteiro transitório de aquecimento do sistema consumiria somente o 11,8 % desse mínimo. Se o estado de carga das baterias está acima dessa porcentagem, o transitório poderá ser finalizado empregando a energia das baterias até na ausência da rede. Na operação real do sistema, seria então aconselhável evitar de inicializar o sistema com estado de carga das baterias abaixo de 12 % do total, para não ter problemas de interrupção do transitório em caso de falha da rede. O consumo de energia no aquecimento não impacta substancialmente a eficiência de geração do sistema: de fato, os microgeradores PaCOS não são normalmente projetados para ser ligados e desligados frequentemente, mas sim para funcionar constantemente à potência de projeto, devido à lentidão dos transitórios e ao efeito negativo que as ciclagens térmicas provocam sobre a vida útil das PaCOS.

Um objetivo que não foi possível alcançar foi utilizar como gás de proteção do anodo do empilhamento o mesmo etanol, no lugar do nitrogênio empregado nos testes. De fato, no projeto de um sistema que possa ser comercializado seria importante evitar a necessidade do uso de um gás técnico caro e de logística complicada, como nitrogênio ou hidrogênio. A possibilidade de empregar combustível como proteção do material anódico está relatada na literatura [76]. Todavia, no caso dessa tese isso não foi tentado, devido ao risco de danos permanentes ao empilhamento associados à alimentação de uma mistura de água e etanol. De fato, os curtos períodos de alimentação de etanol nos testes de geração elétrica já foram suficientes a provocar uma queda marcada do desempenho do empilhamento, como evidenciado no item 4.4.3. Uma alimentação mais prolongada, com tempos maiores de residência do combustível no empilhamento e não associada à produção elétrica iria possivelmente prejudicar completamente a capacidade da PaCOS de gerar corrente, devido à deposição de carbono sólido no interior dos anodos. O projeto de um empilhamento específico para etanol poderá resolver essa dificuldade, viabilizando o desenvolvimento de uma rotina de aquecimento do sistema que não necessite de um gás de proteção adicional.

### 5.3.2. Geração elétrica

O regime de produção elétrica é o estado de funcionamento principal do protótipo, onde o sistema passaria a grande maioria do tempo em aplicações reais. O desempenho obtido no caso de alimentação com hidrogênio e com etanol foi bastante diferente, como era de se esperar devido às limitações do empilhamento no funcionamento com etanol. Os resultados dos dois casos foram então analisados separadamente.

#### → Geração elétrica com hidrogênio

O funcionamento do sistema alimentado com hidrogênio resultou bem estável e alinhado com o desempenho nos testes de bancada do empilhamento. De fato, comparando as curvas de polarização e potência obtidas com o sistema completo (Figura 65) com as medidas efetuadas nos testes de bancada do segundo empilhamento *NIMTE-A-Stack-301* (o mesmo que foi instalado no protótipo), apenas em um dos casos (a IV curva dos gráficos da Figura 40 e da Figura 41) o empilhamento demonstrou um desempenho melhor na bancada. Na Figura 76 o melhor resultado em bancada é comparado com o resultado relatado para o protótipo. As condições de operação empregadas na medição das curvas foram parecidas, como mostrado na Tabela 18.

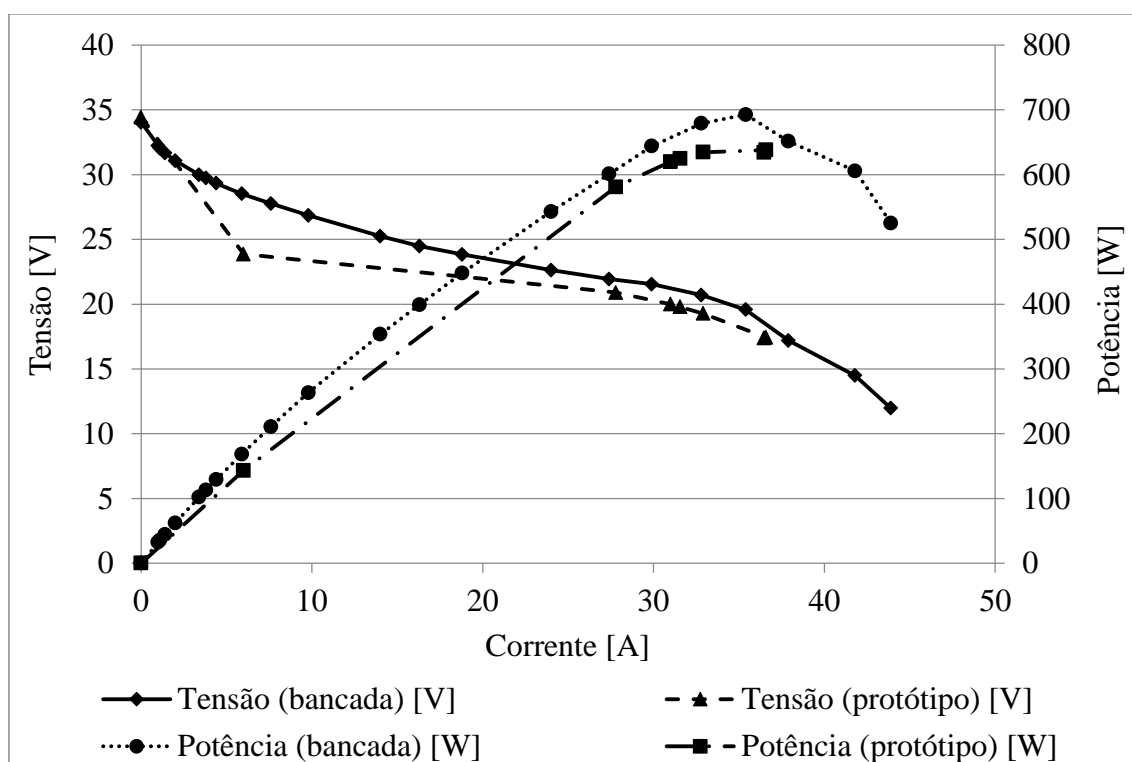


Figura 76 - Comparação entre curvas de polarização e potência obtidas com H<sub>2</sub> nos testes de bancada do *NIMTE-A-Stack-301* e na operação do protótipo.

Tabela 18 - Comparação entre testes de bancada do *NIMTE-A-Stack-301* e a operação do protótipo, funcionamento com H<sub>2</sub>.

Variável	Bancada	Protótipo	Unidade
Temperatura PaCOS	743	725	[°C]
Vazão de hidrogênio	10	10	[NI/min]
Vazão de ar	19,8	25,5	[NI/min]
Eficiência máxima	38,53	35,48	[%]
Potência máxima	692,78	637,96	[W]
Tensão (potência máxima)	19,57	17,44	[V]
Corrente (potência máxima)	35,4	36,58	[A]
$\lambda_{H_2}$	1,35	1,31	-
$\lambda_{ar}$	1,12	1,38	-
Vazão de H <sub>2</sub> em excesso	2,6	2,35	[NI/min]
Vazão de ar em excesso	2,18	6,97	[NI/min]
$\lambda_{comb}$	0,35	1,24	-

A maior vazão de ar no segundo caso foi necessária para manter um valor de  $\lambda_{comb}$  superior à unidade na área de combustão interna. De fato, os valores reportados demonstram que a vazão de ar empregada nos testes de bancada não seria suficiente, no caso do protótipo, a gerar um excesso de ar na área de combustão suficiente a queimar completamente a vazão de hidrogênio alimentada, mantendo o balanço térmico do sistema. Esse é um exemplo de como a regulagem dos parâmetros de funcionamento do protótipo resulta mais complexa que nos testes de bancada de cada dispositivo individual: no sistema integrado, cada variável de processo influencia contemporaneamente vários aspectos do processo. Em consequência de quanto exposto até agora, pode-se concluir que existe uma vazão ótima de ar que maximiza a produção elétrica da PaCOS e acima da qual a potência gerada decai. É possível supor que o valor dessa vazão esteja localizado pouco acima de 24 NI/min. De fato, na Figura 42 a potência produzida cresce continuamente ao crescer da vazão do ar, mas não foram testados valores de vazão acima de 24 NI/min: o fato que a vazão aplicada nos testes do protótipo tenha resultado em uma potência menor do que foi obtido na bancada pode indicar que acima de 24 NI/min o efeito positivo da vazão se inverte, levando a uma queda da potência gerada. Todavia, é difícil afirmar isso com segurança, dado que a pequena queda de desempenho do empilhamento entre os testes de bancada e o

funcionamento no protótipo poderia ser também motivada por uma parcial degradação do dispositivo ao longo da campanha de testes.

Como já mencionado no item 4.4.3, o desempenho dinâmico do empilhamento resultou bastante limitado, especialmente na passagem do potencial de circuito aberto para valores elevados de potência. Foi possível observar esse efeito também no decorrer dos ensaios de bancada do empilhamento, relatados no item 4.3.1. A motivação dessa lentidão na resposta a transitórios de potência não é clara, mas parece relacionada às características intrínsecas do empilhamento e da forma com o qual acontecem as reações eletroquímicas no interior do mesmo. De fato, as outras variáveis medidas permaneceram aproximadamente constantes ao longo do transitório, não indicando possíveis relações entre o aumento gradual da potência e a vazão de reagentes ou as temperaturas do sistema. Todavia, esse aspecto não é crítico do ponto de vista da aplicação objeto dessa tese: de fato, o sistema foi projetado para manter fixa a potência gerada pelo empilhamento, deixando às baterias o papel de compensar as variações rápidas de carga elétrica.

Analisando a parte inicial da evolução das pressões mostrado na Figura 62 pode-se ver que a aplicação da carga elétrica provoca um leve aumento da pressão de entrada do H<sub>2</sub>. Isso é provavelmente devido à formação de água nos compartimentos anódicos, decorrente da reação (1), que dificulta a passagem do combustível. É também interessante observar o incremento da pressão das linhas anódicas e catódicas ao longo do teste. Em ambos os casos, isso parece devido a um aumento da perda de pressão no empilhamento. De fato, como no caso do aquecimento do sistema, a diferença de pressão entre entrada e saída do pré-aquecedor permanece aproximadamente constante, enquanto o evaporador do etanol não está sendo utilizado nessa configuração. Do lado anódico, o incremento do  $\Delta p$  pode possivelmente ser relacionado com o aumento gradual da corrente produzida, associada a uma maior geração de água. Para o catodo, o mecanismo que provoca o incremento não é claro, não sendo evidente a relação com nenhuma outra variável registrada. Todavia, a diferença medida é desprezível, sendo limitada a poucos millibar tanto para o anodo quanto para o catodo.

O gráfico de Figura 77 mostra no detalhe o transitório inicial de algumas das variáveis mostradas na Figura 62, na Figura 63 e na Figura 64, no decorrer do qual são variados em sequência vazão de ar, carga elétrica e vazão de hidrogênio.

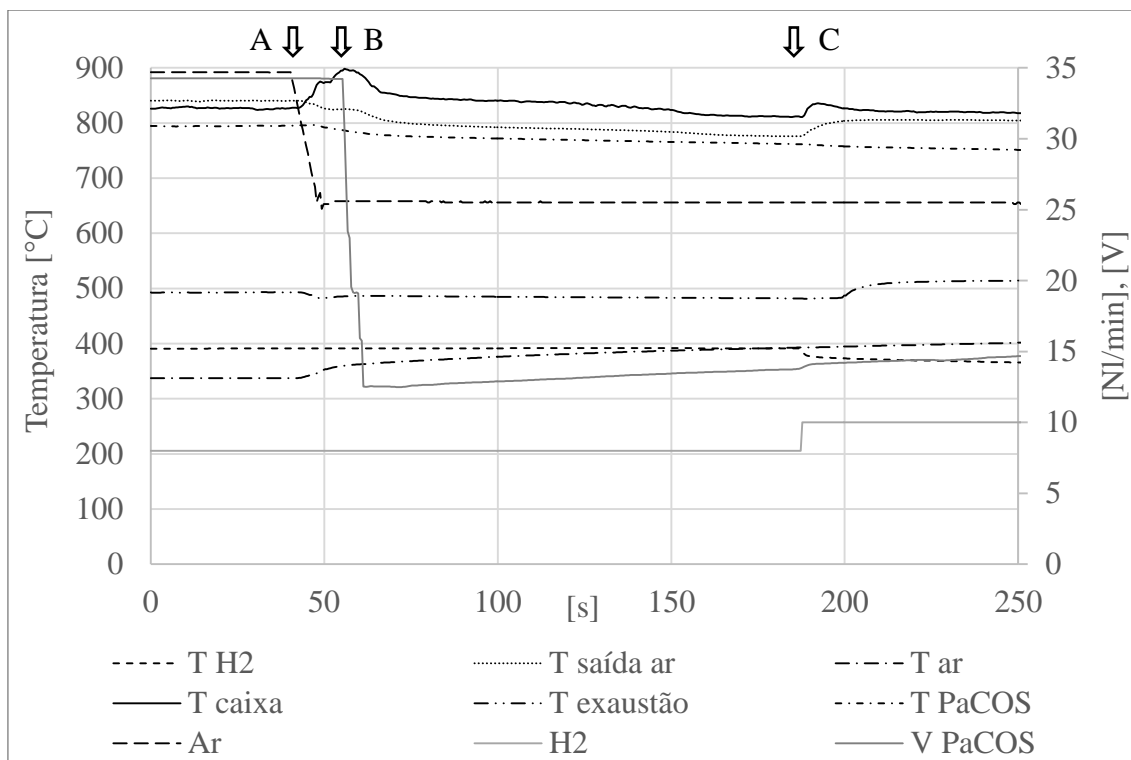


Figura 77 - Transitório das temperaturas do protótipo entre estado de sistema inativo e regime de produção elétrica com H<sub>2</sub>.

É interessante apontar o efeito dos diferentes parâmetros operacionais sobre as temperaturas do sistema, analisando o comportamento das mesmas em seguida de cada variação subsequente:

- **Redução da vazão de ar** (ponto A). Isso influi sobre a temperatura de entrada do ar no empilhamento, que aumenta (uma menor velocidade do fluxo de ar permite ao gás de absorver mais calor no pré-aquecedor do ar). As temperaturas do corpo e da saída do ar da PaCOS reduzem-se, provavelmente por conta da queda do calor transportado no empilhamento pelo fluxo de ar. A temperatura da área de combustão da caixa do empilhamento registra um pico, devido à diminuição do excesso de ar, diretamente relacionada com o aumento da temperatura dos gases resultantes da queima do H<sub>2</sub>. A redução da vazão de ar provoca também uma pequena diminuição da temperatura de exaustão: a menor velocidade do fluxo de gases de exaustão permite aos mesmos de perder mais calor através do isolamento da parte quente do sistema, reduzindo a temperatura de saída.
- **Aplicação da carga elétrica** (ponto B). Uma vez começada a produção de corrente, parte do fluxo de hidrogênio é consumido pelas reações eletroquímicas. Reduz-se



então a quantidade de combustível disponível na área de combustão, cuja temperatura diminui, junto com a temperatura nas proximidades da saída do ar do empilhamento. No caso dessa última temperatura, o efeito é parcialmente contrabalançado no tempo pelo aumento da corrente, que tende a aquecer o empilhamento por efeito Joule

- **Incremento da vazão de H<sub>2</sub>** (ponto C). Esse evento leva à diminuição da temperatura de entrada do hidrogênio na PaCOS (sendo o fluxo de H<sub>2</sub> à temperatura ambiente) e ao aumento das temperaturas da área de combustão, da saída do ar da PaCOS e da exaustão. O aumento das temperaturas é provavelmente devido ao incremento da potência térmica gerada pela combustão do maior excesso de hidrogênio disponível.

→ **Geração elétrica com etanol**

Os resultados do protótipo na geração elétrica utilizando C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O foram satisfatórios, comparando-se positivamente em termos de potência máxima com os melhores dados obtidos nos testes de bancada. Isso é mostrado na Figura 78, onde aparecem as curvas C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O(1) do item 4.3.1 (Figura 38 e Figura 39) e as curvas da Figura 69.

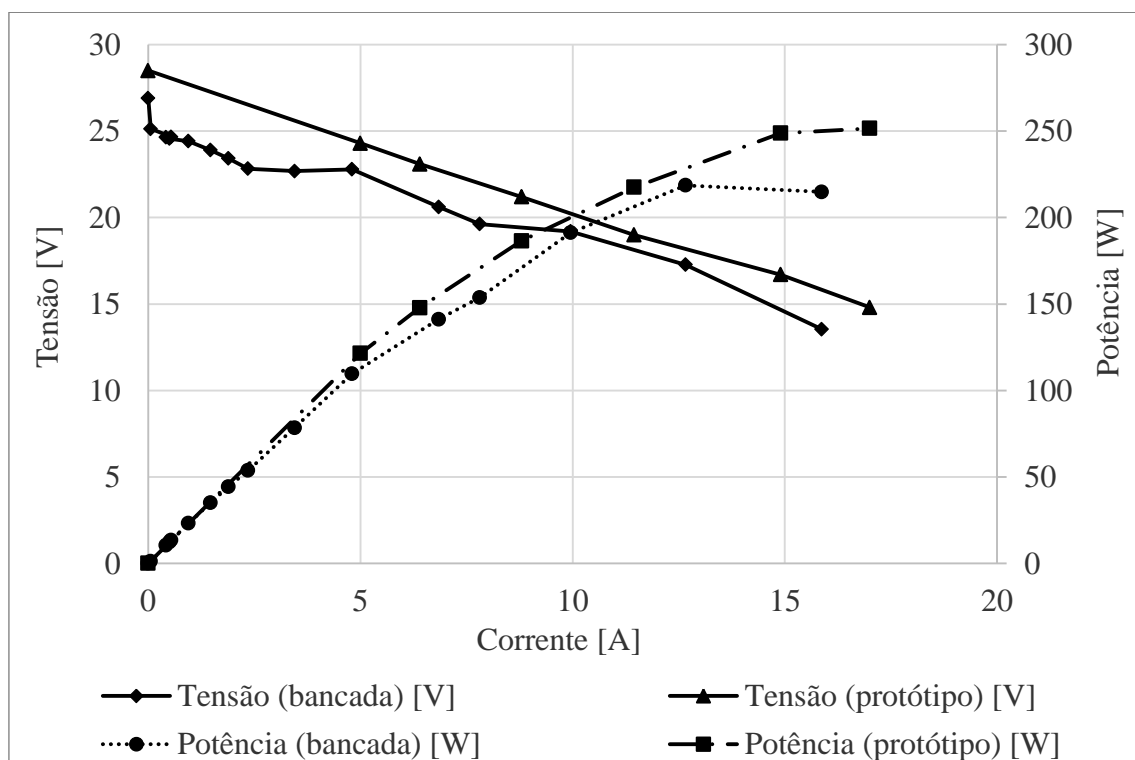


Figura 78 - Comparação entre curvas de polarização e potência obtidas com C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O na operação do protótipo e nos testes de bancada do *NIMTE-A-Stack-301*.

Na Tabela 19 são resumidos os dados principais nos dois casos.

Tabela 19 - Comparação entre testes de bancada do *NIMTE-A-Stack-301* e operação do protótipo, funcionamento com  $C_2H_6O$ .

Variável	Bancada	Protótipo	Unidade
Temperatura PaCOS	755	790	[°C]
Vazão de etanol	1,6	4,5	[ml/min]
Vazão de água	2	10	[ml/min]
Vazão de ar	21	25,175	[NI/min]
Eficiência máxima	36,02	14,73	[%]
Potência máxima	218,69	248,83	[W]
Tensão (potência máxima)	17,27	16,7	[V]
Corrente (potência máxima)	12,66	14,9	[A]
$\lambda_{C_2H_6O}$	1,4	2,92	-
$V/E$	4,05	7,2	-
$\lambda_{ar}$	3,34	2,96	-
Vazão de $C_2H_6O$ em excesso	0,45	2,96	[ml/min]
Vazão de ar em excesso	14,73	16,6	[NI/min]
$\lambda_{comb}$	5,93	1,02	-

A maior potência do empilhamento obtida no protótipo deve-se provavelmente ao fato que o valor de  $\dot{n}_{C_2H_6O}$  calculado através da equação (76) foi mais alto do valor utilizado em bancada, fazendo com que  $\lambda_{C_2H_6O}$  resultasse maior no funcionamento do protótipo. Um maior excesso de combustível implica uma maior pressão parcial do combustível no compartimento anódico, relacionada com o aumento do desempenho de cada pilha a combustível. Por outro lado, esse efeito é parcialmente contrabalançado pelo maior  $V/E$  empregado, associado a uma vazão de água proporcionalmente maior e consequentemente a uma maior diluição do combustível. No caso do protótipo, a soma dos dois efeitos resultou em um limitado incremento da potência máxima (cerca de 30 W), mas também em uma queda da eficiência elétrica do empilhamento. De fato, a diferença entre as potências geradas foi bastante pequena, enquanto a vazão empregada no sistema completo foi quase três vezes a que foi alimentada ao empilhamento testado no forno. É importante ressaltar que no protótipo não seria possível utilizar uma vazão

de etanol tão baixa como a que foi empregada nos testes de bancada, devido à necessidade de produzir suficiente calor para manter o sistema na temperatura de operação. De qualquer forma, o aumento da vazão dos reagentes não serviu a aproximar substancialmente a potência máxima do empilhamento ao nível alcançado com hidrogênio. De fato, a potência máxima foi muito próxima entre os dois casos, apesar do valor muito maior de vazão de reagentes empregado no protótipo. Isso sugere que o fator limitante da produção elétrica não seria a falta de reagentes no empilhamento, mas a velocidade com os quais eles alcançam os sítios de reação onde se combinam com o oxigênio proveniente do catodo. As razões podem ser uma insuficiente velocidade da reação de reforma a vapor (75) e uma dificuldade fluidodinâmica dos reagentes em penetrar a matriz porosa do anodo. Também a variação do valor de  $V/E$  não pareceu ter influenciado fortemente o nível geração elétrica. Isso indica que o efeito negativo da diluição do combustível com água tem um impacto parecido para os dois valores de  $V/E$  aplicados nos dois casos.

Como já mencionado, todas as variáveis medidas no decorrer do teste resultaram mais instáveis que no caso da alimentação com  $H_2$ . A inconstância dos valores registrados dificultou a determinação da influência dos vários parâmetros operacionais sobre as temperaturas do sistema, especialmente na parte final do teste. É, todavia, possível evidenciar os pontos seguintes relativos à primeira metade dos gráficos:

- a alimentação da água provoca a queda gradual da temperatura da saída do evaporador da água, que no começo do teste situava-se próxima da temperatura da área de combustão. A queda continua até a temperatura chegar em torno de 600 °C;
- a alimentação do combustível dá origem a um aumento da temperatura da saída do evaporador do etanol, devido ao calor absorvido pelo combustível no trocador de calor e transportado até a tubulação de entrada do anodo da PaCOS. No começo do teste, a saída do evaporador do etanol encontrava-se em temperatura relativamente baixa, sendo o fluxo de hidrogênio alimentado sem passar no trocador. Além disso, o fluxo de etanol provoca o aumento da temperatura da área de combustão e da saída do ar e do corpo da PaCOS. Essas temperaturas tinham temporariamente baixado em consequência à interrupção de fornecimento de  $H_2$  e foram elevadas novamente graças ao estabelecimento do fluxo de etanol;

- o aumento da vazão do ar provoca um aumento da temperatura de exaustão e uma diminuição da temperatura de entrada do ar no empilhamento, para as mesmas razões expostas no caso do funcionamento com hidrogênio.

Comparando os gráficos da Figura 67 e da Figura 68, é possível verificar como as oscilações mais marcadas das temperaturas de saída dos evaporadores começaram contextualmente à piora do desempenho elétrico do empilhamento, denotada pela rápida queda da potência produzida (com carga aplicada constante). Ambos os eventos aconteceram após de uma fase de teste inicial caracterizada por uma gradual diminuição das temperaturas do sistema (particularmente da temperatura de saída do evaporador da água), e logo depois do aumento da vazão de ar, que foi atuado para tentar de aumentar o valor de potência gerada acima do que tinha sido obtido até o momento. Para explicar esses fatos foram formuladas algumas hipóteses, detalhadas na seção 5.4

Independentemente de qual foi precisamente o mecanismo envolvido, o efeito negativo sobre o desempenho do empilhamento permaneceu também depois da cessação da alimentação do etanol e da água. De fato, testes de controle efetuados com hidrogênio imediatamente antes e depois da operação com etanol deram resultados extremamente diferentes: empregando as mesmas vazões de reagentes (10 NI/min de H<sub>2</sub> e 25 NI/min de ar), antes da alimentação de etanol e água a potência máxima superou os 500 W, enquanto depois foi possível retirar apenas pouco mais de 100 W. O baixo nível de desempenho elétrico parece sugerir algum tipo de dano persistente ao empilhamento. Algumas possibilidades são a obstrução do anodo com carbono e a danificação das pilhas por estresse mecânico, causado pela reoxidação do níquel ou pelo ocorrer de elevadas diferenças de temperatura entre as partes diferentes das pilhas. No primeiro caso, existe a possibilidade de tentar reverter pelo menos parcialmente a situação, operando o empilhamento em condições que favoreçam a oxidação do carbono depositado. Se o baixo desempenho está em vez relacionado com a ruptura de alguma pilha o dano será permanente. Nesse caso, poderá ser aplicada uma análise *post-mortem* do empilhamento para investigar com mais detalhe os efeitos da alimentação de etanol sobre as PaC que o compõem.

### **5.3.3. Eficiência energética do balanço de planta**

O balanço de planta projetado demonstrou um rendimento  $\eta_{BdP}$  razoável, tanto no teste real com hidrogênio (78,16 %), quanto nas estimativas feitas para o funcionamento com etanol (73,45 %). Todavia, esses valores comparam-se desfavoravelmente com os

resultados do modelo, indicados na Tabela 17, situados em torno de 90 %.. Existem vários fatores que podem explicar essa diferença. Em primeiro lugar, o modelo não incluiu no cálculo do consumo elétrico alguns equipamentos que resultaram importantes na prática, principalmente eletroválvulas e sistema de controle. Todavia, nesse aspecto pode-se considerar que os pressupostos do modelo foram razoáveis: de um lado, o sistema de controle empregado no protótipo tem um consumo bem acima do que teria em um produto industrial, devido ao elevado número de sensores de tipo laboratorial empregados para a caracterização completa do sistema; do outro, o modelo de válvula empregado foi escolhido pela facilidade de aquisição no mercado, sem atentar ao consumo energético do componente, que resultou muito acima do esperado. Um erro do modelo foi de subestimar fortemente a potência consumida pelas bombas (poucos mW em vez de aproximadamente 7 W por bomba). Do ponto de vista da eletrônica de potência, a eficiência  $\eta_{EP}$  aplicada no modelo foi aproximadamente de 94 %, enquanto o rendimento elétrico cumulado de inversor e conversor CC/CC obtido na prática superou de pouco o 86 %. Considera-se que um valor representativo do estado da arte da tecnologia possa ser colocado entre esses dois valores: se a estimativa do modelo foi provavelmente excessivamente otimista, o rendimento da eletrônica de potência no protótipo ainda não está no nível máximo, podendo ainda ser melhorado em desenvolvimentos futuros. Um aspecto onde o modelo resultou de ótimo acordo com os resultados experimentais é o consumo do soprador, calculado na faixa entre 20 e 26 W, exatamente a mesma obtida na prática.

A potência consumida pelo balanço de planta construído resultou também acima do patamar normalmente considerado o máximo aceitável na indústria, em torno de 20 % da energia em entrada no sistema (que nesse caso é a potência gerada pela PaCOS). Para alcançar esse objetivo é necessário reduzir o gasto energético dos componentes. É então interessante analisar a composição da potência total absorvida pelo BdP, de forma a entender sobre quais componentes concentrar os esforços de desenvolvimento. Na Figura 79 são comparadas as potências consumidas pelo balanço de planta e injetadas na rede nos três casos listados na Tabela 15. Para cada caso, a soma das duas potências resulta na potência produzida pela PaCOS. Na Figura 80 é possível ver graficamente a composição da potência consumida pelo balanço de planta. Excluindo o caso do funcionamento real com etanol (onde é maior o peso das eletroválvulas, que não depende da potência gerada pelo empilhamento), o componente responsável do maior consumo é o conversor CC/CC. Melhorar a eficiência desse dispositivo, que ainda se

encontra no estágio de primeiro protótipo, aparece então essencial para melhorar o desempenho energético do balanço de planta. Como mencionado acima, existe uma margem de melhoramento para a eficiência do conjunto da eletrônica de potência, que ainda está abaixo dos valores máximos alcançados no estado atual de desenvolvimento da tecnologia. Em segundo lugar, as eletroválvulas destacam-se como o componente com a maior margem de melhoria da eficiência. Como já evidenciado, não foi dedicada suficiente atenção à escolha das eletroválvulas, que poderiam então ser substituídas com um modelo de consumo menor, proporcionando facilmente um elevado ganho de eficiência. Isso é especialmente verdadeiro no caso do funcionamento com etanol, onde foi necessário energizar contemporaneamente duas eletroválvulas, dando origem a um gasto ainda mais acentuado. Um terceiro elemento que poderia contribuir a melhorar o rendimento do sistema é o desenvolvimento de um sistema de controle de tipo industrial, caracterizado por um número menor de sensores e atuadores e otimizado com o objetivo de minimizar o gasto de energia. Reduzir o consumo de potência dos outros componentes do sistema aparece em vez mais complexo: em todos os casos, trata-se de dispositivos comerciais, já otimizados e de bom desempenho energético, que resultaram bem adequados à aplicação no protótipo.

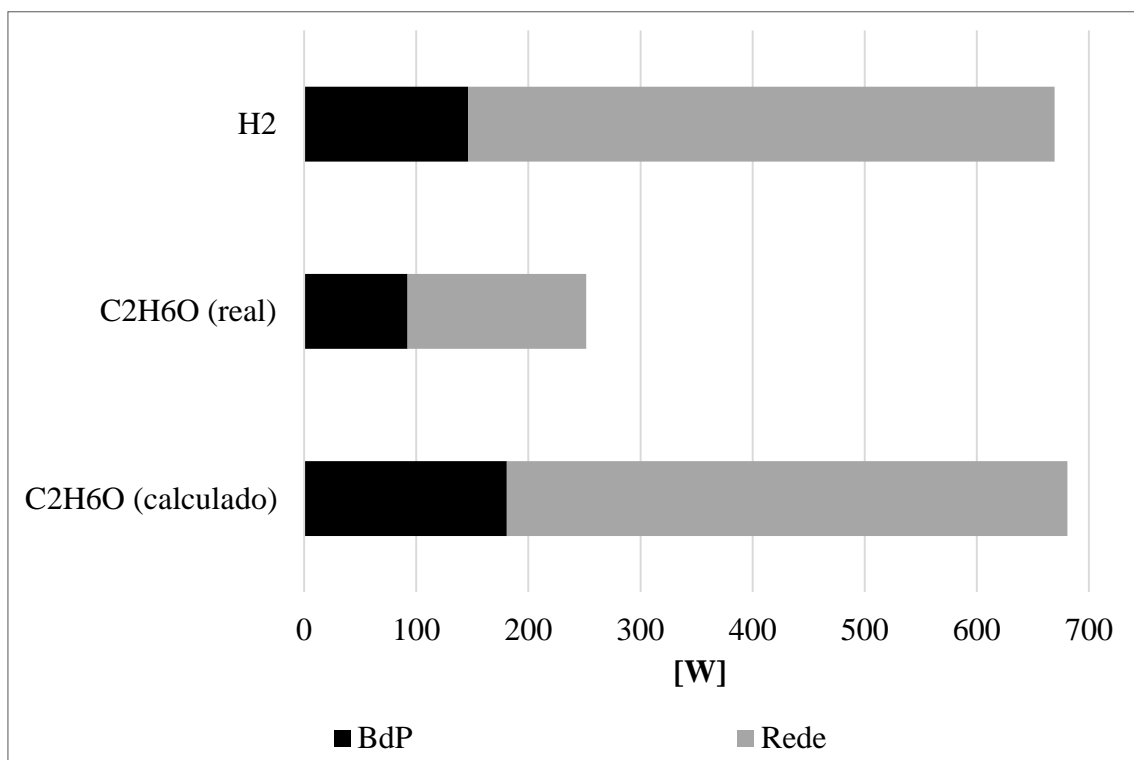


Figura 79 - Potência consumida pelo balanço de planta e injetada na rede.

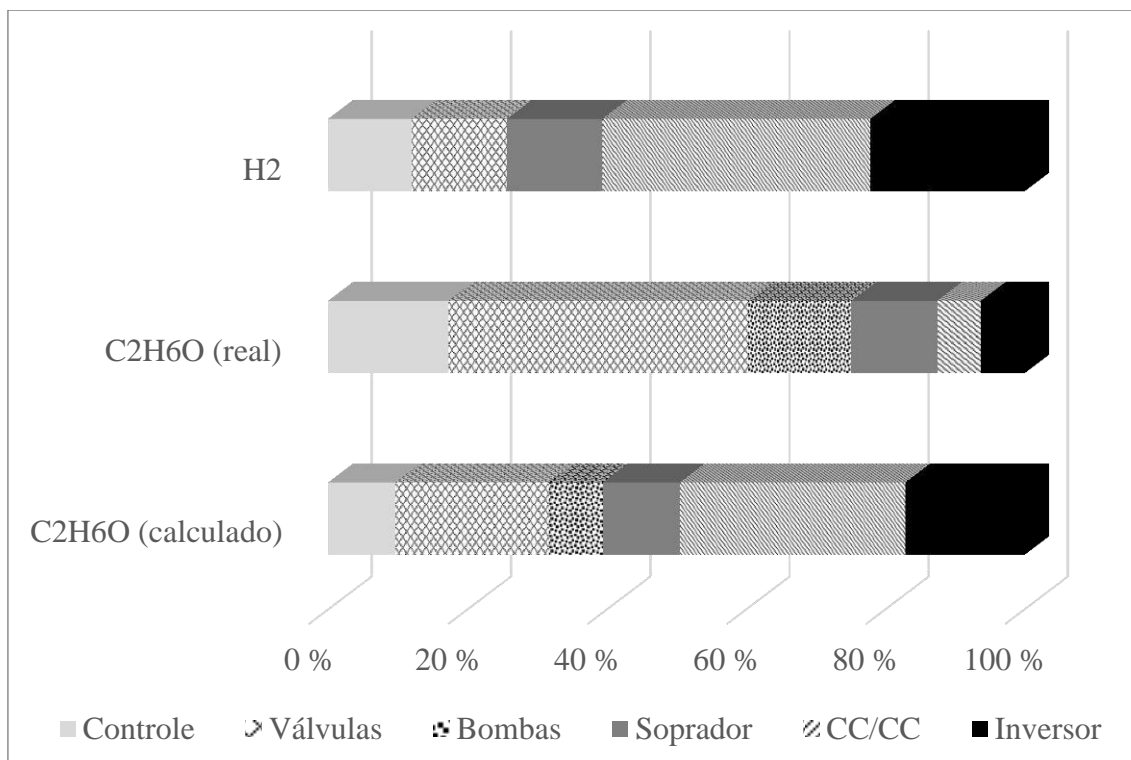


Figura 80 - Composição do consumo de potência do balanço de planta.

#### 5.3.4. Resfriamento do sistema

Durante os testes do sistema foi desenvolvida uma rotina de resfriamento adequada às especificações do empilhamento, utilizando sucessivamente H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> como gás de proteção dos anodos do empilhamento. Como já mencionado na discussão relativa ao aquecimento do sistema do item 5.3.1, seria conveniente poder empregar o mesmo combustível utilizado na produção elétrica de regime também como gás de proteção nos transitório de aquecimento e resfriamento do sistema. Isso não foi possível no atual estágio de desenvolvimento da tecnologia, mas pode ser colocado como objetivo para desenvolvimentos futuros.

A duração do transitório de resfriamento resultou bastante alta, devido também às taxas máximas de redução da temperatura impostas pelo fabricante do empilhamento. Nos gráficos da Figura 70 e da Figura 71 é possível reparar os mesmos efeitos das vazões sobre as temperaturas que foram apontadas nos outros itens desta seção. No começo do transitório, a vazão de H<sub>2</sub> é baixada do valor de regime da produção elétrica ao valor de 2 NI/min. Isso faz com que a temperatura de ingresso do hidrogênio aumente, devido à redução do efeito esfriante do fluxo de combustível. Ao mesmo tempo, as temperaturas do sistema começam a cair, não sendo mais satisfeito o balanço térmico do sistema. A vazão do ar é aumentada ao longo do transitório para manter uma velocidade de

resfriamento do sistema satisfatória. A cada aumento da vazão de ar corresponde uma diminuição da temperatura de entrada do ar no empilhamento. Depois de uma fase inicial de aumento gradual, para poder aumentar a vazão acima de 35 NI/min é aberta a válvula do injetor. A introdução de ar diretamente na área de combustão interna provoca um aumento da taxa de redução da temperatura da caixa. A temperatura de entrada do ar no empilhamento aumenta novamente, provavelmente sinalizando que a parcela de vazão que circula no empilhamento diminuiu abaixo do valor de 35 NI/min utilizado antes. Na prossecução do transitório, continua-se a regular a vazão de ar para obter a taxa de resfriamento desejada. No final do resfriamento, a vazão de hidrogênio é substituída com nitrogênio, provocando uma diminuição rápida da temperatura da caixa do empilhamento devido à falta de combustível. O fluxo de nitrogênio é parado só quando a temperatura do empilhamento desce abaixo de 100 °C, condição na qual a possibilidade de substancial reoxidação do níquel do anodo é mínima.

O consumo energético total calculado para o transitório de resfriamento foi de mais de 400 Wh, bem acima do valor calculado para o aquecimento. Isso é principalmente devido à maior duração do transitório. A carga das baterias necessárias para completar o transitório sem energia externa é de pouco mais de 17 Ah, cerca de 20 % da capacidade mínima do banco, 85 Ah. No funcionamento real do sistema, será então importante sempre manter as baterias pelo menos nesse nível de carga, para ter energia armazenada suficiente a desligar o sistema em segurança até na ausência de fontes de energia externas. Analogamente a quanto evidenciado no item 5.3.1, o consumo de energia no resfriamento não influencia substancialmente o rendimento do sistema, projetado para funcionar continuamente e com potência constante.

#### **5.4. ANÁLISE DA GERAÇÃO COM ETANOL**

O objetivo dessa seção é comparar os resultados obtidos para o empilhamento com a literatura existente e fornecer alguns elementos adicionais para melhorar o entendimento do comportamento do sistema durante a geração elétrica com etanol como combustível.



### 5.4.1. Comparação com a literatura

Para contextualizar os resultados dos testes do empilhamento *NIMTE-A-Stack-301* no estado da arte da tecnologia, a densidade de potência máxima obtida tanto em bancada quanto no protótipo foi comparada com dados da literatura. O gráfico de Figura 81 representa graficamente essa comparação. Os artigos considerados relatam testes de pilhas unitárias suportadas pelo anodo em regime de reforma interna, com diferentes composições do anodo (indicadas na legenda) [62, 77, 78]. O  $V/E$  adotado nos artigos está entre 2 e 3, sendo menor do valor aplicado nos testes de bancada e bem abaixo do valor empregado no protótipo.

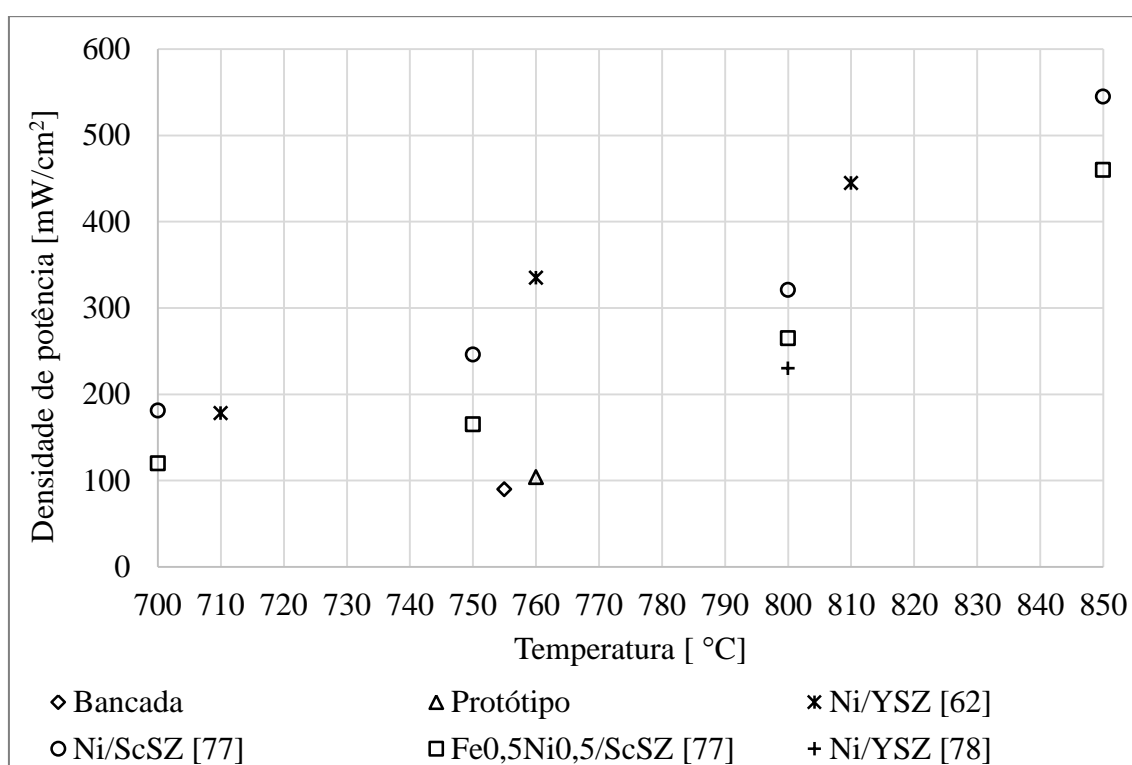


Figura 81 - Geração com etanol: comparação com a literatura.

Na literatura considerada são evidenciados alguns pontos importantes para o prosseguimento da discussão. Em primeiro lugar, a conversão do etanol através da reação de reforma a vapor (75) aumenta com a temperatura, sendo em torno de 80 % para temperaturas de operação de cerca 800 °C. Em temperaturas abaixo de 750 °C, o CO presente no anodo reage muito limitadamente, comportando-se aproximadamente como um gás inerte. A presença de vapor d'água diminui a tensão de circuito aberto, mas o efeito negativo é menor quanto maior a corrente produzida pelo empilhamento, sendo quase nulo em torno da potência máxima. Em todos os casos teve deposição de

carbono sólido ao longo dos testes, especialmente próximo da entrada do combustível no anodo. Isso significa que os valores de  $V/E$  não permitiram evitar a formação de carbono, apesar de ser teoricamente suficientes para isso.

A Figura 81 demonstra claramente que o desempenho em termos de densidade de potência obtido nos testes do empilhamento foi pior que os relatados na literatura para pilhas unitárias. Existem vários fatores que podem explicar essa diferença:

- as condições de teste das pilhas unitárias são normalmente mais estáveis que as de um empilhamento completo, sendo mais facilmente controláveis;
- a fluidodinâmica dos compartimentos anódicos do empilhamento é notavelmente mais desfavorável do que a dos sistemas de teste de pilhas unitárias, devido ao tamanho reduzido dos canais onde passa o gás no empilhamento;
- o desempenho total de um empilhamento é fortemente condicionado do desempenho de cada pilha unitária que o compõe, sendo todas as pilhas conectadas em série. Isso significa que até uma única pilha unitária de baixo desempenho pode condicionar negativamente o empilhamento inteiro;
- o maior valor de  $V/E$  empregado nos testes do empilhamento induz um efeito negativo sobre o potencial das PaCOS;
- é provável que a temperatura no interior dos anodos das pilhas a combustível tenha assumido valores baixos demais para permitir uma boa taxa de conversão do combustível através da reação (75), como discutido no item 5.4.2.

Com os dados disponíveis não foi possível determinar se a diferença de desempenho pode ser explicada por um ou mais desses fatores ou se existem outros efeitos relevantes. Futuros testes de um empilhamento projetado especificadamente para o funcionamento com etanol poderão ajudar a esclarecer o assunto.

#### **5.4.2. Balanço energético de uma PaCOS unitária**

Algumas explicações mencionadas nesse texto para o baixo desempenho do empilhamento são relacionadas com a redução da área ativa disponível para as reações eletroquímicas, provocada pela reação de reforma a vapor, e o nível de temperatura de operação, insuficiente a garantir uma taxa de conversão do etanol suficientemente elevada a sustentar as reações eletroquímicas. Para tentar entender os mecanismos envolvidos com mais precisão foi analisado o balanço de matéria e energia de uma pilha a combustível de óxido sólido. De acordo com quanto mencionado ao longo do texto, as

reações envolvidas no funcionamento da PaCOS com etanol em regime de reforma interna são as semi-reações eletroquímicas de oxidação e redução, a reação de reforma a vapor do etanol e a reação de deslocamento do vapor d'água. Nessa análise foram desprezadas outras reações, possíveis nas condições de trabalho, mas que envolvem uma fração menor dos reagentes. A cada reação é associado um fluxo de energia, elétrica ou térmica. Os fluxos de matéria e energia são representados na Figura 82.

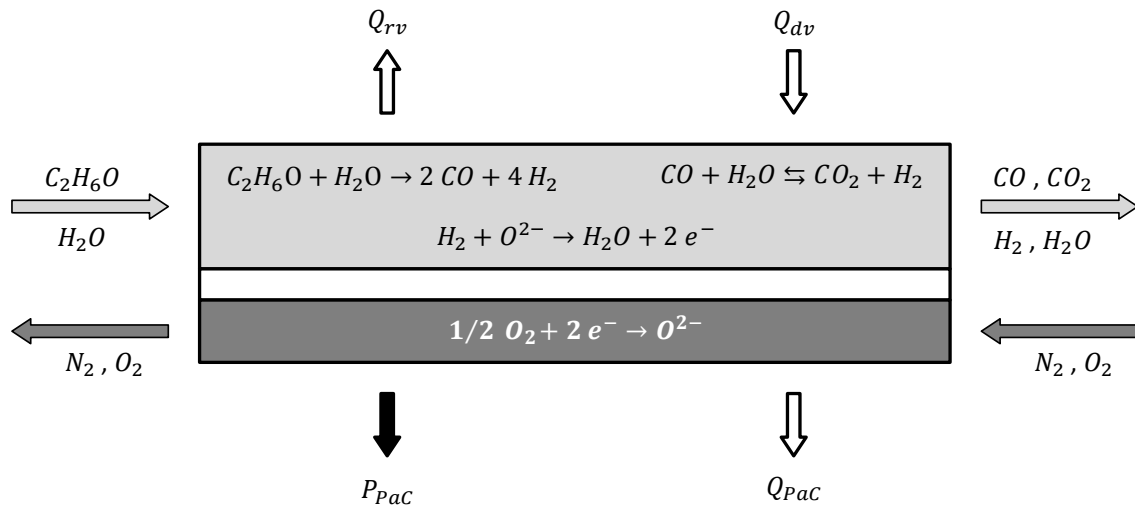


Figura 82 - Representação dos fluxos de matéria e energia na operação de uma PaCOS unitária.

A energia elétrica gerada pela PaCOS pode ser calculada utilizando a equação (19). O calor subtraído pela reação de reforma a vapor, endotérmica, depende da quantidade de combustível convertido em H<sub>2</sub> e CO. Sendo que o etanol não participa diretamente das reações eletroquímicas, a quantidade mínima de etanol convertida é a quantidade necessária a gerar um fluxo de hidrogênio e monóxido de carbono suficiente a sustentar a corrente elétrica produzida. O valor máximo de calor absorvido pela reação é obtido na situação de conversão completa da vazão de etanol. Os limites do calor  $Q_{rv}$ , associado à reação (75) podem então ser expressados pela inequação (78):

$$\Delta h_{rv} \cdot [I \cdot N_p / (8 \cdot F)] < Q_{rv} < \Delta h_{rv} \cdot \dot{n}_{C_2H_6O} \quad (78)$$

Também o calor associado à reação de deslocamento do vapor d'água  $Q_{dv}$  depende da quantidade de gases que reagem. Os valores mínimo e máximo do calor produzido pela reação, exotérmica, são relacionados respectivamente com a situação de conversão nula ou conversão total do CO a H<sub>2</sub>, de acordo com a inequação (79):

$$0 < Q_{dv} < -\Delta h_{dv} \cdot 2 \cdot \dot{n}_{C_2H_6O} \quad (79)$$

No balanço energético é também necessário considerar o calor absorvido por convecção pelos gases que entram e saem da PaCOS. Aplicando a equação (28) à pilha unitária, é possível calcular  $Q_{conv}$  conhecendo a composição e a temperatura dos fluxos de entrada e saída de anodo e catodo. Pode-se então calcular a potência térmica produzida pela PaCOS com a equação de balanço energético (80), onde as potências associadas com as reações eletroquímicas e de deslocamento do vapor d'água são contribuições positivas, enquanto a potência elétrica produzida, o calor subtraído pela reação de reforma a vapor do etanol e a potência térmica absorvida pelos gases são negativas:

$$Q_{PaC} = -\Delta h_{H_2} \cdot [I \cdot N_p / (2 \cdot F)] + Q_{dv} - P_{PaC} - Q_{rv} - Q_{conv} \quad (80)$$

Dependendo da quantidade de reagente que participa à reforma a vapor e ao deslocamento de vapor d'água,  $Q_{PaC}$  pode assumir valor positivo ou negativo. Se  $Q_{PaC}$  é negativo, a PaC unitária precisa de absorver calor dos arredores para manter a temperatura de operação constante. Todavia, devido à inércia térmica dos materiais do empilhamento, a condução de calor não é instantânea e pode ocorrer uma diminuição da temperatura das pilhas. Por sua vez, uma queda da temperatura diminui a condutibilidade iônica do eletrólito [1] e a velocidade da reação de reforma a vapor do etanol [62], baixando conseqüentemente a concentração de  $H_2$  e  $CO$  no anodo. Esses efeitos provocam uma redução da velocidade das reações eletroquímicas, levando a uma queda adicional da potência térmica produzida e criando um mecanismo de retroalimentação negativa sobre a temperatura.

No caso dessa tese, os dados coletados nos testes foram insuficientes para estimar a quantidade de reagentes convertidos através das reações de reforma e de deslocamento do vapor d'água. De fato, para avaliar esse aspecto seria necessário analisar a composição do gás na saída anódica do empilhamento, o que não foi possível fazer devido à necessidade de queimar esse gás para manter o sistema na temperatura de funcionamento. Além disso, não foi possível medir a temperatura no interior do empilhamento, mas apenas na saída do ar e na superfície metálica externa. Conseqüentemente, não foi possível obter uma conclusão definitiva sobre o balanço energético do empilhamento durante os testes efetuados. Todavia, a análise teórica evidencia que em algumas condições é possível que aconteça um desequilíbrio energético das pilhas unitárias, levando à instabilidade do funcionamento com etanol.

### 5.4.3. Fatores limitantes do desempenho em regime de reforma interna

De acordo com a discussão exposta até agora, foi possível formular algumas hipóteses para explicar o desempenho limitado do empilhamento, que podem ser verificadas contemporaneamente e reforçar-se mutuamente:

- **Produção de carbono.** Analisando o gráfico de Figura 66 pode-se observar que o valor médio da pressão de entrada do etanol no empilhamento cresce constantemente ao longo do teste, também quando as vazões de água e etanol são mantidas constantes. Esse fato poderia sugerir que esteja acontecendo uma gradual deposição de carbono sólido nos anodos da PaCOS e/ou na tubulação de alimentação do etanol, que obstruiria parcialmente a passagem dos gases, provocando as instabilidades registradas ao longo do teste. Isso não pode ser afirmado com certeza, sendo que um aumento do  $\Delta p$  análogo (se bem mais limitado) foi observado também no funcionamento com  $H_2$ . Além disso, de acordo com a literatura o elevado valor de  $V/E$  escolhido deveria ter sido suficiente a evitar a formação de carbono. Todavia, essa eventualidade não pode ser completamente excluída sem analisar o interior do empilhamento. De um lado, a deposição de carbono piora a fluidodinâmica do empilhamento, reduzindo a área de passagem dos gases; do outro lado, dificulta as reações eletroquímicas, tampando os poros do anodo e impedindo a difusão do combustível até os sítios onde acontecem as reações eletroquímicas.
- **Temperatura interna insuficiente.** Como já mencionado várias vezes ao longo do texto, o empilhamento *NIMTE-A-Stack-301* não foi projetado para o funcionamento com etanol como combustível. A tentativa feita nessa tese foi de aproveitar da capacidade do material anódico comercial de promover a reação de reforma a vapor do etanol para operar o empilhamento com uma mistura de etanol e água. Todavia, como exposto no item 5.2.1, existem vários fatores que podem impedir o sucesso dessa operação. Além de quanto já exposto, a literatura sobre a operação de PaCOS unitárias com etanol em regime de reforma interna [37, 62-63] relaciona a temperatura de operação da pilha com a eficiência da reação de reforma, que aumenta ao aumentar da temperatura. É então possível que durante os testes a temperatura interna do empilhamento tenha chegado abaixo do patamar que garante uma conversão de etanol para CO e  $H_2$  suficientemente rápida para sustentar a produção de corrente. Isso pode ser devido ao aumento da vazão de ar, ou à queda gradual da temperatura interna das pilhas (como discutido no item 5.4.2), associada à insuficiente geração de calor através da combustão do etanol no sistema, ou ainda a

problemas no funcionamento dos trocadores como exposto em seguida. Nessa situação, larga parte do etanol e da água atravessariam o empilhamento sem reagir, piorando as condições fluidodinâmicas do mesmo, já inadequadas desde o começo ao funcionamento com a mistura de etanol e água, sendo o empilhamento projetado e otimizado para hidrogênio. Isso provocaria as oscilações de pressão e temperatura observadas. A baixa conversão através da reação de reforma a vapor pode também favorecer outras reações que envolvem o etanol, levando a um aumento da probabilidade de deposição de carbono sólido.

- **Evaporação descontínua dos fluidos.** Apesar do valor médio das temperaturas de saída dos evaporadores ter permanecido sempre acima da temperatura de vaporização dos fluidos alimentados, o valor instantâneo medido pelos termopares alcançou em vários momentos esse patamar. Isso poderia indicar que a evaporação nos trocadores de calor acontece de forma não constante, gerando um fluxo descontínuo de vapor. Nessa situação, fluxos não completamente evaporados estariam chegando nos termopares, baixando a temperatura dos mesmos. Essa explicação é consistente com o fato que as oscilações parecem piorar com o aumento da vazão dos líquidos, associado a um aumento do calor necessário para a vaporização. Também, o lado do etanol pareceu mais afetado que o da água, possivelmente devido ao fato que o evaporador do etanol foi parcialmente recoberto com isolamento térmico, como explicado no item 5.2.4, piorando a eficiência de troca térmica e permitindo que fluido não vaporizado pudesse alcançar a saída do trocador com mais facilidade. De fato, a temperatura de saída da água do trocador desceu até o nível de vaporização apenas para o valor maior de vazão utilizado, igual a 11,8 ml/min, enquanto para o etanol isso aconteceu já com o primeiro valor de vazão empregado, 4,5 ml/min. A chegada de fluxos fluidos na entrada do empilhamento em temperatura muito menor da temperatura do corpo da PaCOS pode contribuir a diminuir a temperatura interna dos anodos, o que provocaria os problemas expostos acima. Também, a inconstância do processo de evaporação poderia dar origem a falta de água em alguns pontos do empilhamento, favorecendo a formação de carbono sólido. As considerações expostas evidenciam como os componentes dedicados a vaporizar o etanol e alimentá-lo ao empilhamento sejam uma parte crítica do sistema, que deve satisfazer requisitos contrastantes, precisando garantir a mudança de fase do combustível de forma contínua e estável, mantendo ao

mesmo tempo a temperatura do etanol mais baixa possível até chegar no interior do empilhamento.

As relações entre as três possíveis causas do funcionamento instável do empilhamento são representadas no diagrama de Figura 83.

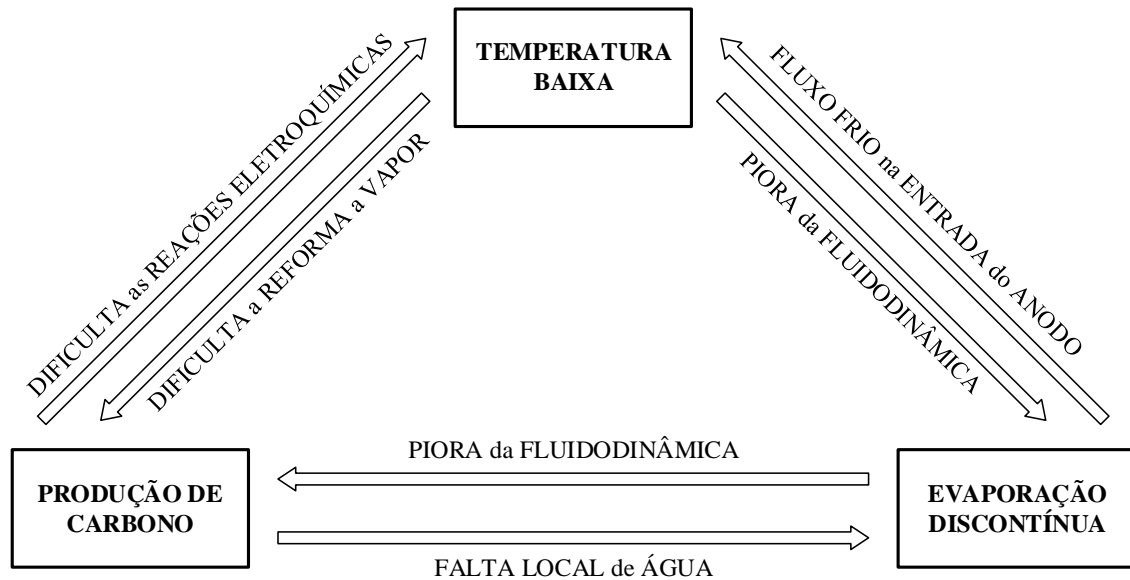


Figura 83 - Fatores limitantes do desempenho do empilhamento no funcionamento com etanol em regime de reforma interna.

Considerando quanto exposto acima, para melhorar o funcionamento do sistema com etanol em regime de reforma interna do combustível interna ao empilhamento, é possível aplicar as seguintes providências:

- maximizar o valor de  $V/E$ , de acordo com os limites operacionais do evaporador da água. De fato, quando mais alto  $V/E$ , quanto mais desfavorecida a formação e deposição de carbono no empilhamento e na tubulação de entrada anódica. Todavia, aumentar ainda mais o valor de  $V/E$  na configuração do sistema utilizada seria complexo, sendo que tanto o evaporador da água quanto a bomba d'água já estão trabalhando próximos dos limites superiores de operação;
- manter a temperatura do corpo metálico da PaCOS quanto mais próxima do limite operacional máximo de 800 °C. O começo do teste com etanol, onde o funcionamento do sistema resultou mais estável, foi caracterizado por uma temperatura da PaCOS acima desse limite, em torno de 820 °C. Essa temperatura baixou gradualmente, até a insurgência dos problemas de instabilidade das temperaturas e de queda da potência produzida, a um nível de temperatura da PaCOS

de aproximadamente 760 °C. A queda da temperatura do sistema foi provavelmente devida ao calor absorvido na vaporização dos reagentes líquidos e pela reação de reforma a vapor no interior do empilhamento. No decorrer do teste não foram aplicadas medidas para contrastar a queda de temperatura porque o valor de T PaCOS se situava ainda bem acima do limite mínimo de 700 °C. Manter a temperatura do empilhamento entre 770 e 800 °C, uma faixa bastante estreita, pode ser difícil, requerendo um controle muito preciso das vazões dos reagentes durante a operação do sistema. Não é garantido que a configuração atual do protótipo permita de trabalhar nessa condição;

- otimização do projeto dos trocadores de calor e da tubulação de alimentação do combustível ao empilhamento, com o objetivo de melhorar a eficiência de troca térmica dos evaporadores e de reduzir o tempo de permanência do etanol em temperaturas superiores a 200 °C, antes de entrar no empilhamento. Esse último requisito depende da necessidade de evitar a pirólise do etanol e a consequente formação de carbono sólido nas partes quentes do sistema.

É importante ressaltar que, até no caso em que todos os problemas expostos acima sejam resolvidos com sucesso e seja obtida a operação contínua e estável da PaCOS em regime de reforma interna, o empilhamento *NIMTE-A-Stack-301* não pode ser considerado a solução definitiva para o sistema de microcogeração objeto dessa tese. De fato, a potência máxima obtida com etanol resultou muito abaixo do nível requerido para satisfazer as especificações fixadas para o protótipo. Os desenvolvimentos futuros dessa linha de pesquisa deverão então incluir o projeto e a construção de um empilhamento adequado ao funcionamento com etanol, capaz de alcançar uma potência máxima de pelo menos 650 W.



## 6. CONCLUSÕES

O objetivo dessa tese de doutorado foi o projeto, a realização e o teste de um balanço de planta para um sistema de microgeração PaCOS alimentado com etanol. Com esse intuito, foi concebida uma estrutura híbrida, que associa a PaCOS a um banco de baterias para compensar as variações da carga elétrica, permitindo ao empilhamento de trabalhar com potência constante. Para a construção prática do protótipo, o balanço de planta foi desenvolvido para funcionar acoplado a um empilhamento comercial projetado para hidrogênio, funcionando com etanol em regime de reforma interna do combustível. Seguindo os resultados de uma modelagem matemática preliminar e dos testes de bancada do empilhamento comercial, um modelo de bomba, um de inversor e dois de soprador de ar foram adquiridos e testados com êxito, mostrando-se adequados para a aplicação analisada. Os trocadores de calor, o combustor de inicialização, o conversor CC/CC e o sistema de controle e monitoramento do protótipo foram projetados, fabricados e testados com êxitos satisfatórios. Foi também executado o dimensionamento do banco de baterias e definida a lógica de funcionamento do sistema. Uma vez concluídos os testes dos componentes, todos os dispositivos foram montados em um protótipo interligado, que foi testado tanto com hidrogênio que com etanol. Foram definidas rotinas de aquecimento, resfriamento e funcionamento em regime permanente que permitiram a operação do sistema de forma segura e eficiente. As partes do balanço de planta adquiridas, projetadas e construídas demonstraram a capacidade de funcionar no regime de operação escolhido com um bom desempenho. Além disso, o funcionamento do empilhamento montado no protótipo resultou parecido ao que foi obtido nos testes de bancada, confirmando a validade dos projetos dos componentes e do sistema como um todo, alguns detalhes dos quais foram protegidos através de uma patente [79], atualmente em fase de aprovação. No funcionamento com hidrogênio, foi possível alcançar o ponto de funcionamento desejado do sistema, caracterizado por um nível de potência elétrica útil de 500 W. Dado que o empilhamento empregado não foi projetado especificadamente para o funcionamento com etanol, o desempenho nos testes com esse combustível foi limitado, provavelmente devido a problemas associados às reações de reforma interna que provocaram instabilidades fluidodinâmicas e elétricas. Esse comportamento resultou coerente com as informações presentes na literatura

relacionadas com a operação de PaCOS unitárias em regime de reforma interna. A análise dos dados obtidos durante os testes do protótipo permitiu conseguir numerosas informações sobre as modalidades de funcionamento e a interdependência dos diferentes parâmetros operacionais, evidenciando algumas relações críticas entre eles que é de extrema importância considerar no controle do sistema. Utilizando esses dados foi possível calcular a eficiência elétrica do balanço de planta, que alcançou um patamar razoável, e identificar os dispositivos responsáveis pela maior parte do consumo elétrico, além das ações necessárias para melhorar o desempenho energético do sistema. Os principais avanços conseguidos na pesquisa relatada com respeito ao estado da arte da tecnologia incluem: a obtenção de dados sobre o funcionamento real de um empilhamento PaCOS convencional, com anodo de níquel, alimentado com etanol e água, em regime de reforma interna; a construção do balanço de planta para um sistema de geração baseado em PaCOS alimentado com etanol; a elaboração de rotinas para ativação, funcionamento em regime permanente e desativação do protótipo. De fato, as informações possíveis de serem identificadas na literatura sobre PaCOS alimentadas com etanol eram limitadas a análises teóricas, simulações computacionais e dados experimentais relativos a pilhas unitárias. O fato de ter operado um empilhamento com etanol, junto com o BdP projetado, constitui uma contribuição original dessa tese.

## **6.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa confirmam a viabilidade da realização de um microgerador PaCOS alimentado com etanol que possa ser comercializado para várias aplicações no mercado brasileiro de geração elétrica. Todavia, para alcançar o nível de produto comercial serão necessárias importantes modificações com respeito ao protótipo construído. Em primeiro lugar, deverá ser desenvolvido um empilhamento apropriado para a utilização direta de etanol como combustível, com desempenho adequado e estável. Para isso poderá ser utilizado o anodo desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio. Além disso, o desempenho energético do balanço de planta poderá ser melhorado aumentando a eficiência do conversor CC/CC, substituindo as eletroválvulas com modelos de menor consumo e desenvolvendo um sistema de controle de tipo industrial. O projeto mecânico deverá também ser modificado, para reduzir o tamanho, melhorar o isolamento térmico e facilitar a montagem do sistema.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REVANKAR, S., MAJMUDAR, P., **Fuel Cells. Principles Design and Analysis**. 1 ed. Boca Raton, CRC Press, 2014.
- [2] ABNT, **Tecnologia de pilhas a combustível. Parte 1: Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.
- [3] AEA, HARWELL, **Combined heat and power background**. European Commission - DG Environment, Brussels, 2010.
- [4] THORNTON, A., RODRÍGUEZ MONROY, C. “Distributed power generation in the United States”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 15, pp. 4809-4817, 2011.
- [5] GÜLEN, S. C. “Étude on Gas Turbine Combined Cycle Power Plant - Next 20 Years”, **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power** v. 138, n. 5, 2015.
- [6] ELGOWAINY, A., GAINES, L., WANG, M. “Fuel-cycle analysis of early market applications of fuel cells: Forklift propulsion systems and distributed power generation”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 34, pp. 3557-3570, 2009.
- [7] “Callux residential demonstrations reach 1m hours of operation”, **Fuel Cells Bulletin** v. 2012, n. 6, pp. 5-6, 2012.
- [8] “ene.field residential fuel cell micro-CHP trial begins in Europe”, **Fuel Cells Bulletin** v. 2012, n. 10, p. 4, 2012.
- [9] HART, D., LEHNER, F., ROSE, R., *et al.* **The Fuel Cell Industry Review 2017**, E4tech, Lausanne, 2017.

- [10] BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Balço energético nacional 2017**. Ministério de Minas e Energia, EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2017.
- [11] BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2017.
- [12] MACEDO, I.C., SEABRA, J.E.A., SILVA, J.E.A.R. “Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020”, **Biomass and bioenergy** v. 32, pp. 582-595, 2008.
- [13] PEREIRA, C.L.F., ORTEGA, E. “Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane”, **Journal of cleaner production** v. 18, pp. 77-82, 2010.
- [14] CORALLI, A., D’AVIGNON, A., FREITAS, M.A.V., “Micro cogeração distribuída com emprego de pilhas a combustível de óxido sólido no Brasil”. **XV Congresso Brasileiro de Energia**, Rio de Janeiro, Outubro 2013.
- [15] NAKAJO, A., MUELLER, F., BROUWER, J., *et al.* “Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part II: Modelling of mechanical failures during ageing and cycling”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 37, pp. 9269-9286, 2012.
- [16] TORRES, S.O.A., 2012, **Estratégia de controle para balanço de planta em pilha a combustível de óxido sólido com sincronismo interno no conversor de potência**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [17] TORRES, S.O.A., DE MESQUITA FILHO, A.C., DE MIRANDA, P.E.V. “Control strategy for balance of plant in solid oxide fuel cell”, **IEEE Latin America Transactions** v. 11, n. 2, pp. 726-736, 2013.

- [18] DE MIRANDA, P.E.V., CARREIRA, E.S., **Sistemas inteligentes de gerenciamento de energia para veículos elétrico e elétrico-híbrido com conexão bidirecional, sistema inteligente de gerenciamento de energia para um gerador de energia, método para gerenciar energia em um sistema inteligente de gerenciamento de energia e método para controlar o funcionamento de um gerador de energia.** Registro INPI nº BR102012027618 6, Outubro 2012.
- [19] VENÂNCIO, S.A., 2011, **Desenvolvimento de anodo funcional para a utilização direta de etanol em pilha a combustível de óxido sólido.** Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [20] VENÂNCIO, S.A., DE MIRANDA, P.E.V. “Solid oxide fuel cell anode for the direct utilization of ethanol as a fuel”, **Scripta Materialia** v. 65, pp. 1065-1068, 2011.
- [21] Braun, R.J., 2002, **Optimal design and operation of solid oxide fuel cell systems for small scale stationary applications.** PhD. dissertation, University of Wisconsin at Madison, Madison, Wisconsin, USA.
- [22] SINGHAL, S.C. “Solid oxide fuel cells: past, present and future”. In: Irvine, J.T.S., Connor, P. (eds), **Solid oxide fuel cells: facts and figures**, 1 ed., chapter 1, London, UK, Springer-Verlag, 2013.
- [23] PETERS, R., DAHL, R., KLÜTTGEN, U., *et al.* “Internal reforming of methane in solid oxide fuel cell systems”, **Journal of Power Sources** v. 106, pp. 238-244, 2002.
- [24] KLEIN, J.-M., BULTEL, Y., GEORGES, S., *et al.* “Modeling of a SOFC fueled by methane: From direct internal reforming to gradual internal reforming”, **Chemical Engineering Science** v. 62, pp. 1636-1649, 2007.
- [25] DOKMAINGAM, P., IRVINE, J.T.S., ASSABUMRUNGRAT, S., *et al.* “Modeling of IT-SOFC with indirect internal reforming operation fueled by

- methane: Effect of oxygen adding as autothermal reforming”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 35, pp. 13271-13279, 2010.
- [26] ZHU, Y., CAI, W., WEN, C., *et al.* “Fuel ejector design and simulation model for anodic recirculation SOFC system”, **Journal of Power Sources** v. 173, pp. 437-449, 2007.
- [27] ZHU, Y., CAI, W., LI, Y., *et al.* “Anode gas recirculation behavior of a fuel ejector in hybrid solid oxide fuel cell systems: Performance evaluation in three operational modes”, **Journal of Power Sources** v. 185, pp. 1122-1130, 2008.
- [28] LISO, V., NIELSEN, M.P., KÆR, S.K. “Ejector design and performance evaluation for recirculation of anode gas in a micro combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell”, **Applied Thermal Engineering** v. 54, pp. 26-34, 2013.
- [29] LIU, M., LANZINI, A., HALLIOP, W., *et al.* “Anode recirculation behavior of a solid oxide fuel cell system: A safety analysis and a performance optimization”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 38, pp. 2868-2883, 2013.
- [30] **1st Periodic Activity Report - Publishable summary**. ASSENT 7FP FCH JU Project no. 244821, pp. 1-4, 2010.
- [31] JOHNSON, M.C., “Anode and Cathode Anode and Cathode Blower Systems for Blower Systems for SOFC”. **8th annual SECA workshop**, San Antonio, Texas, USA, 8<sup>th</sup> of September 2007.
- [32] RAJENDRAN, S., “High Temperature Cathode/Anode Recycle Blowers for Large Megawatt Size SOFC Power Plants”. **12th annual SECA workshop**, Pittsburg, Pennsylvania, 26-28 of July 2011.
- [33] **Publishable Final Activity Report**, LARGE-SOFC 6FP Project no. 019739, pp. 67-69, 2010.

- [34] NAGEL, F.P., SCHILDHAUER, T.J., SFEIR, J., *et al.* “The impact of sulfur on the performance of a solid oxide fuel cell (SOFC) system operated with hydrocarboneous fuel gas”, **Journal of Power Sources** v. 189, pp. 1127-1131, 2009.
- [35] HERNÁNDEZ, S., SOLARINO, L., ORSELLO, G., *et al.* “Desulfurization processes for fuel cells systems”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 33, pp. 3209-3214, 2008.
- [36] CORALLI, A., SARRUF, B., DE MIRANDA, P.E.V., *et al.*,” Fuel Cells”. In: de Miranda, P.E.V. (ed), **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies**, 1 ed., chapter 2, Academic Press, 2018.
- [37] LEONE, P., LANZINI, A., ORTIGOZA-VILLALBA, G.A., *et al.* “Operation of a solid oxide fuel cell under direct internal reforming of liquid fuels”, **Chemical Engineering Journal** v. 191, pp. 349 -355, 2012.
- [38] NOBREGA, S.D., GALESCO, M.V., GIRONA, K., *et al.* “Direct ethanol solid oxide fuel cell operating in gradual internal reforming”, **Journal of Power Sources** v. 213, pp. 156 159, 2012.
- [39] VENÂNCIO, S.A., DE MIRANDA, P.E.V. “Direct utilization of carbonaceous fuels in multifunctional SOFC anodes for the electrosynthesis of chemicals or the generation of electricity”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 42, pp. 3927-3938, 2017.
- [40] LISO, V., OLESEN, A.C., NIELSEN, M.P., *et al.* “Performance comparison between partial oxidation and methane steam reforming processes for solid oxide fuel cell (SOFC) micro combined heat and power (CHP) system”, **Energy** v. 36, pp. 4216-4226, 2011.
- [41] ENGER, B.C., LØDENG, R., HOLMEN, A. “A review of catalytic partial oxidation of methane to synthesis gas with emphasis on reaction mechanisms

- over transition metal catalysts”, **Applied Catalysis A: General** v. 346, pp. 1-27, 2008.
- [42] AL-HAMAMRE, Z., VOß, S., TRIMIS, D. “Hydrogen production by thermal partial oxidation of hydrocarbon fuels in porous media based reformer”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 34, pp. 827-832, 2009.
- [43] WEHINGER, G.D., EPPINGER, T., KRAUME, M. “Detailed numerical simulations of catalytic fixed-bed reactors: Heterogeneous dry reforming of methane”, **Chemical Engineering Science** v. 122 pp. 197–209, 2015.
- [44] TRIPHOB, N., WONGSAKULPHASATCH, S., KIATKITTIPONG, W., *et al.* “Integrated methane decomposition and solid oxide fuel cell for efficient electrical power generation and carbon capture”, **Chemical engineering research and design** v. 90, pp. 2223-2234, 2012.
- [45] SPECCHIA, S. “Fuel processing activities at European level: A panoramic overview”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 39, pp. 17953-17968, 2014.
- [46] CHEEKATAMARLA, P.K., FINNERTY, C.M. “Reforming catalysts for hydrogen generation in fuel cell applications”, **Journal of Power Sources** v. 160, pp. 490-499, 2006.
- [47] YOSHIDA, H., IWAI, H., “Thermal management in solid oxide fuel cell systems”. **Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology**, Whistler, Canada, 11-16 September 2005.
- [48] AGRAWAL, G., “Foil bearing supported high temperature cathode / anode recycle blower”. **11th annual SECA workshop**, Pittsburg, Pennsylvania, 29<sup>th</sup> of July 2010.



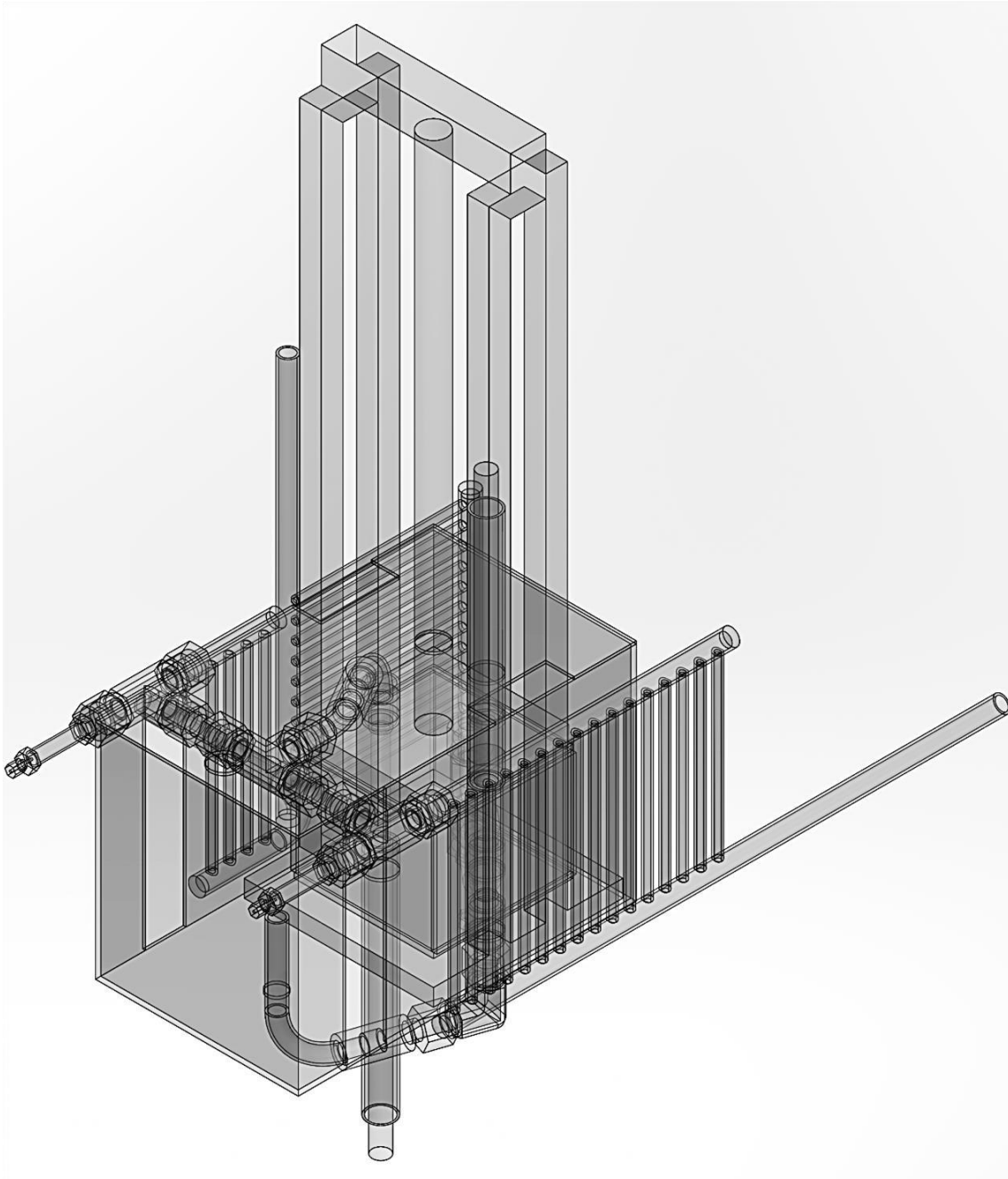
- [49] ZHANG, Z., PITTINI, R., ANDERSEN, M.A.E., *et al.* “A review and design of power electronics converters for fuel cell hybrid system applications”, **Energy Procedia** v. 20, pp. 301-310, 2012.
- [50] KIRUBAKARAN, A., SHAIENDRA JAIN, NEMA, R.K., “A review on fuel cell technologies and power electronic interface”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 13, pp. 2430-2440, 2009.
- [51] KOLLI, A., GAILLARD, A., BERNARDINIS, A., *et al.*, “A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications”, **Energy Conversion and Management** v. 105, pp. 716-730, 2015.
- [52] KAZIMIERCZUK, M.K., **Pulse-Width Modulated DC–DC Power Converters**. 2 ed., Chichester, Wiley, 2016.
- [53] CORALLI, A., DE MIRANDA, H.V., MONTEIRO, C.F.E., *et al.* “Mathematical model for the analysis of structure and optimal operational parameters of a solid oxide fuel cell generator”, **Journal of Power Sources** v. 269, pp. 632-644, 2014.
- [54] ARTEAGA-PEREZ, L.E., CASAS, Y., PERALTA, L.M., *et al.* “An auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol. Process simulation and heat exchanger network synthesis”, **Chemical Engineering Journal** v. 150, pp. 242-251, 2009.
- [55] HONG, W.-T., YEN, T.-H., CHUNG, T.-D., *et al.* “Efficiency analyses of ethanol-fueled solid oxide fuel cell power system”, **Applied Energy** v. 88, pp. 3990-3998, 2011.
- [56] SAEBEA, D., PATCHARAVORACHOT, Y., ARPORNWICHANOP, A. “Analysis of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation”, **Journal of Power Sources** v. 208, pp. 120-130, 2012.

- [57] CASAS LEDÓN, Y., ARTEAGA-PEREZ, L.E., TOLEDO, J., *et al.* “Exergoeconomic evaluation of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell power plant”, **Energy** v. 93, pp. 1287 1295, 2015.
- [58] TIPPAWAN, P., ARPORNWICHANOP, A., DINCER, I., “Energy and exergy analyses of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell for a trigeneration system. Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes”, **Energy** v. 87, pp. 228 239, 2015.
- [59] THANOMJIT, C., PATCHARAVORACHOT, Y., PONPESH, P., *et al.* “Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 40, pp. 6950 6958, 2015.
- [60] AUGUSTO, B.L., NORONHA, F.B., FONSECA, F.C., *et al.* “Nickel/gadolinium-doped ceria anode for direct ethanol solid oxide fuel cell”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 39, pp. 11196-11209, 2014.
- [61] STEIL, M.C., NOBREGA, S.D., GEORGES, S., *et al.* “Durable direct ethanol anode-supported solid oxide fuel cell”, **Applied Energy** v. 199, pp. 180 186, 2017.
- [62] DIETHELM, S., VAN HERLE, J. “Ethanol internal steam reforming in intermediate temperature solid oxide fuel cell”, **Journal of Power Sources** v. 196, pp. 7355 7362, 2011.
- [63] POMFRET, M.B., STEINHURST, D.A., OWRUTSKY, J.C. “Ni/YSZ solid oxide fuel cell anodes operating on humidified ethanol fuel feeds: An optical study”, **Journal of Power Sources** v. 233, pp. 331-340, 2013.
- [64] MORALES, M., ESPIELL, F., SEGARRA, M. “Improvement of performance in low temperature solid oxide fuel cells operated on ethanol and air mixtures using Cu ZnO Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst layer”, **Journal of Power Sources** v. 293, pp. 366 372, 2015.

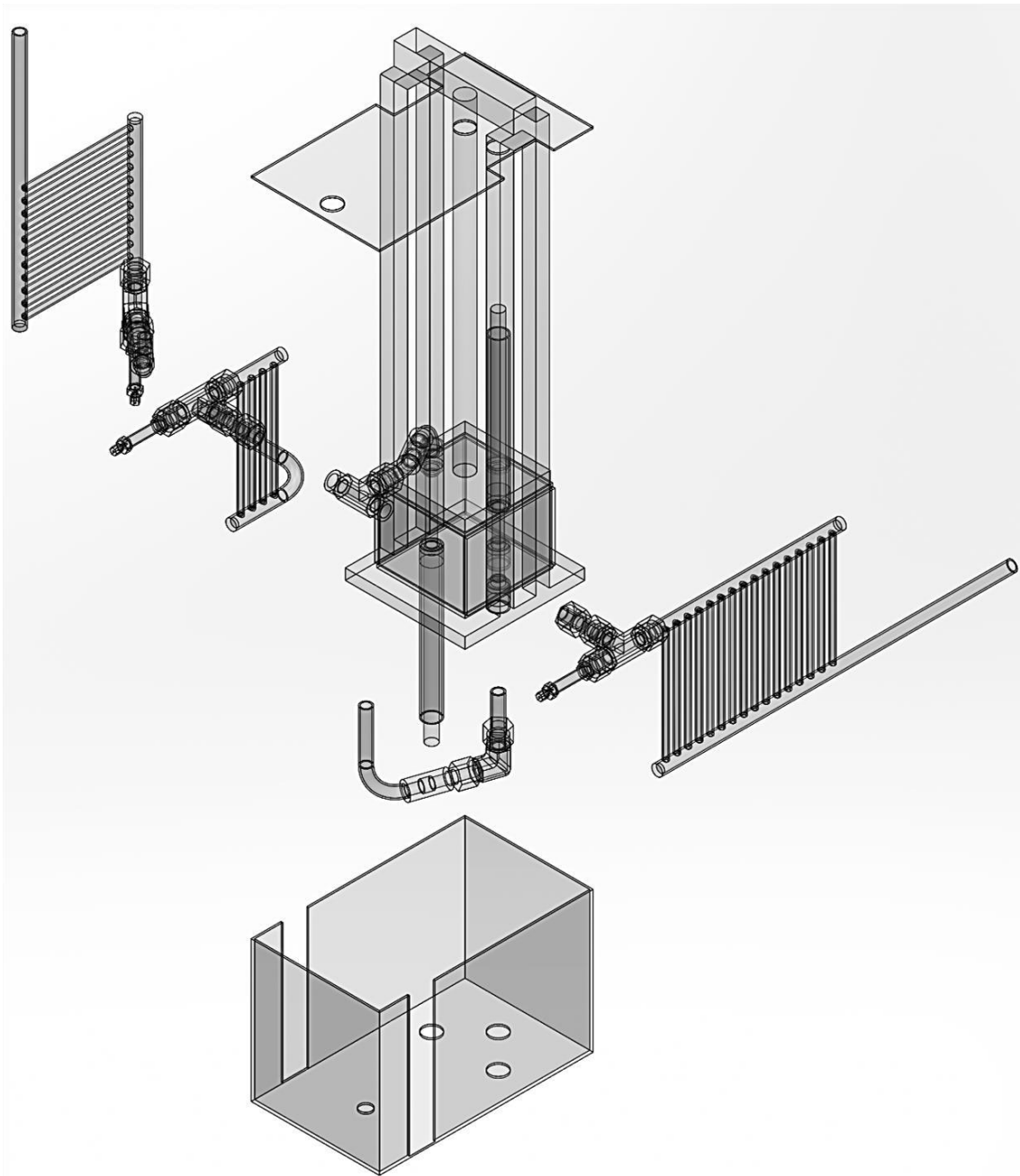
- [65] SILVA, A.A.A., BION, N., EPRON, F., *et al.* “Effect of the type of ceria dopant on the performance of Ni/CeO<sub>2</sub> SOFC anode for ethanol internal reforming”, **Applied Catalysis B: Environmental** v. 206, pp. 626-641, 2017.
- [66] DOUVARTZIDES, S.L., COUTELIERIS, F.A., TSIAKARAS, P.E. “On the systematic optimization of ethanol fed SOFC-based electricity generating systems in terms of energy and exergy”, **Journal of Power Sources** v. 114, pp. 203-212, 2003.
- [67] HAJIMOLANA, S.A., HUSSAIN, M.A., WAN DAUD, W.M.A., *et al.* “Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 15, pp. 1893-1917, 2011.
- [68] NITSCHKE, M., GBADAMOSI, R.O., **Heat exchanger design guide**. 1 ed., Oxford, Butterworth Heinemann - Elsevier, 2016.
- [69] COLLIER, J.G., THOME, J.R., **Convective boiling and condensation**. 3 ed., Oxford, Clarendon Press, 1994.
- [70] LEFEBVRE, A.H., **Gas turbine combustion**. 1 ed., New York, Hemisphere, 1983.
- [71] DE CASTRO ALMEIDA, G., 2016, **Metodologia para avaliação do desempenho de câmaras de combustão tubo-anulares de turbinas a gás flex com base no parâmetro de carregamento do combustor**. Monografia de graduação, UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil.
- [72] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., **Power Electronics - Converters, Applications, and Design**. 3 ed., Wiley, 2002.
- [73] ELETROBRÁS, PROCEL, **Classe residencial - Relatório Brasil**. In: Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - Ano base 2005, Eletrobrás, Procel, Brasília, 2005.

- [74] CORALLI, A., DE MIRANDA, P.E.V. “Balanco de planta para microgerador PaCOS alimentado com etanol”, **Matéria** v. 22, s. 1, e. 11944, 2017.
- [75] FAES, A., HESSLER-WYSER, A., ZRYD, A., *et al.* “A review of RedOx cycling of solid oxide fuel cells anode membranes”, **Membranes** v. 2, pp. 585-664, 2012.
- [76] HALINEN, O., KIVIAHO, J. “Experimental study of SOFC system heat-up without safety gases”, **International Journal of Hydrogen Energy** v. 39, pp. 552-561, 2014.
- [77] HUANG, B., WANG, S.R., LIU, R.Z., *et al.* “Preparation and performance characterization of the Fe-Ni/ScSZ *cermet* anode for oxidation of ethanol fuel in SOFCs”, **Journal of Power Sources** v. 167, pp. 288-294, 2007.
- [78] LO FARO, M., REIS, R.M., SAGLIETTI, G.G.A., *et al.* “Investigation of Ni-based alloy/CGO electro-catalysts as protective layer for a solid oxide fuel cell anode fed with ethanol”, **Journal of Applied Electrochemistry** v. 45, pp. 647-656, 2015.
- [79] DE MIRANDA, H.V., CORALLI, A., DE MIRANDA, P.E.V., *et al.*, **Sistema de pilha a combustível com alimentação direta de hidrocarboneto ou álcool, método de condicionamento de combustível para uma pilha a combustível com alimentação direta de hidrocarboneto ou álcool, e, sistema de condicionamento de energia elétrica.** Registro INPI nº BR1020140261907, Outubro, 2014.

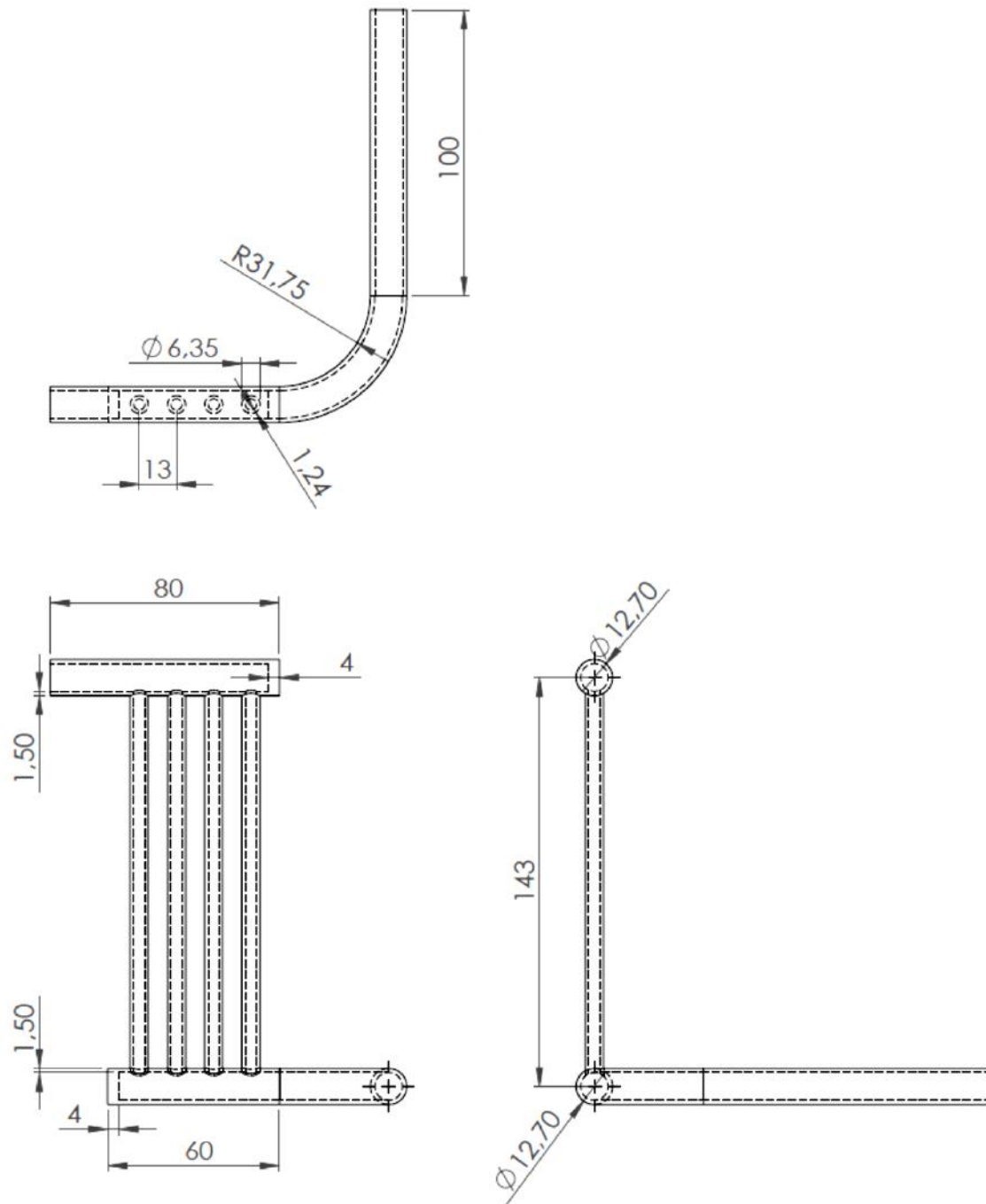
# ANEXOS



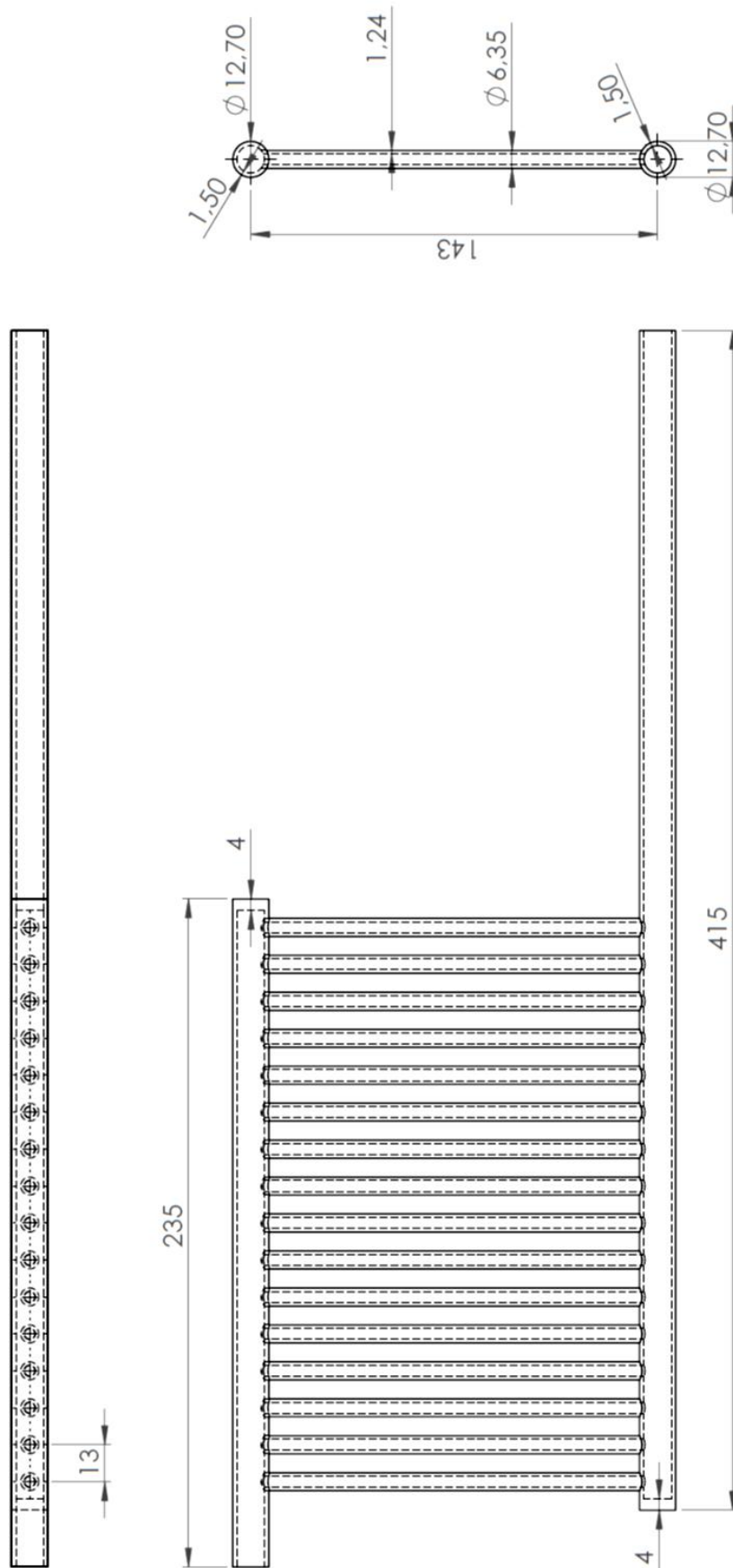
Anexo 1 - Vista tridimensional isométrica da área de alta temperatura do sistema.



Anexo 2 - Vista tridimensional explodida da área de alta temperatura do sistema.

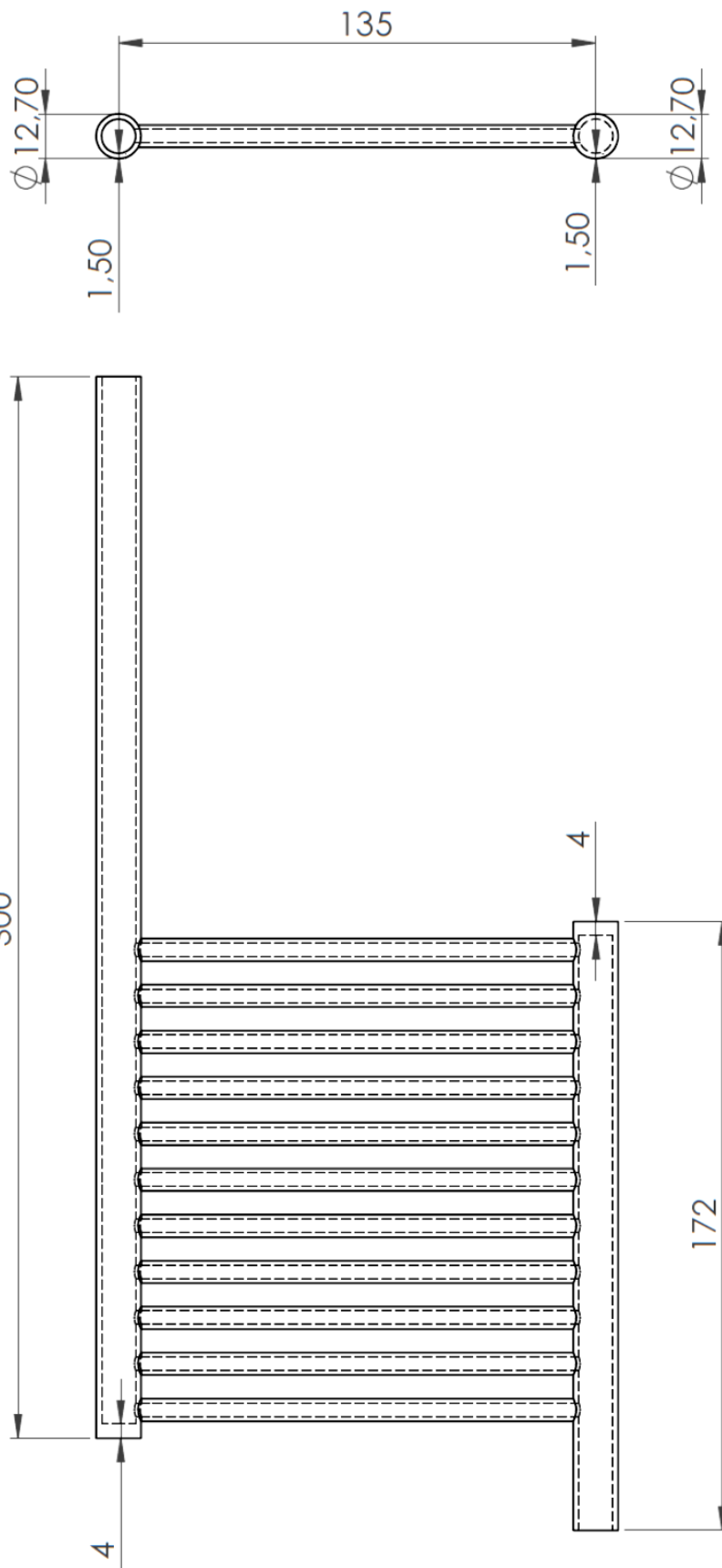


Anexo 3 - Desenho técnico do evaporador do etanol.

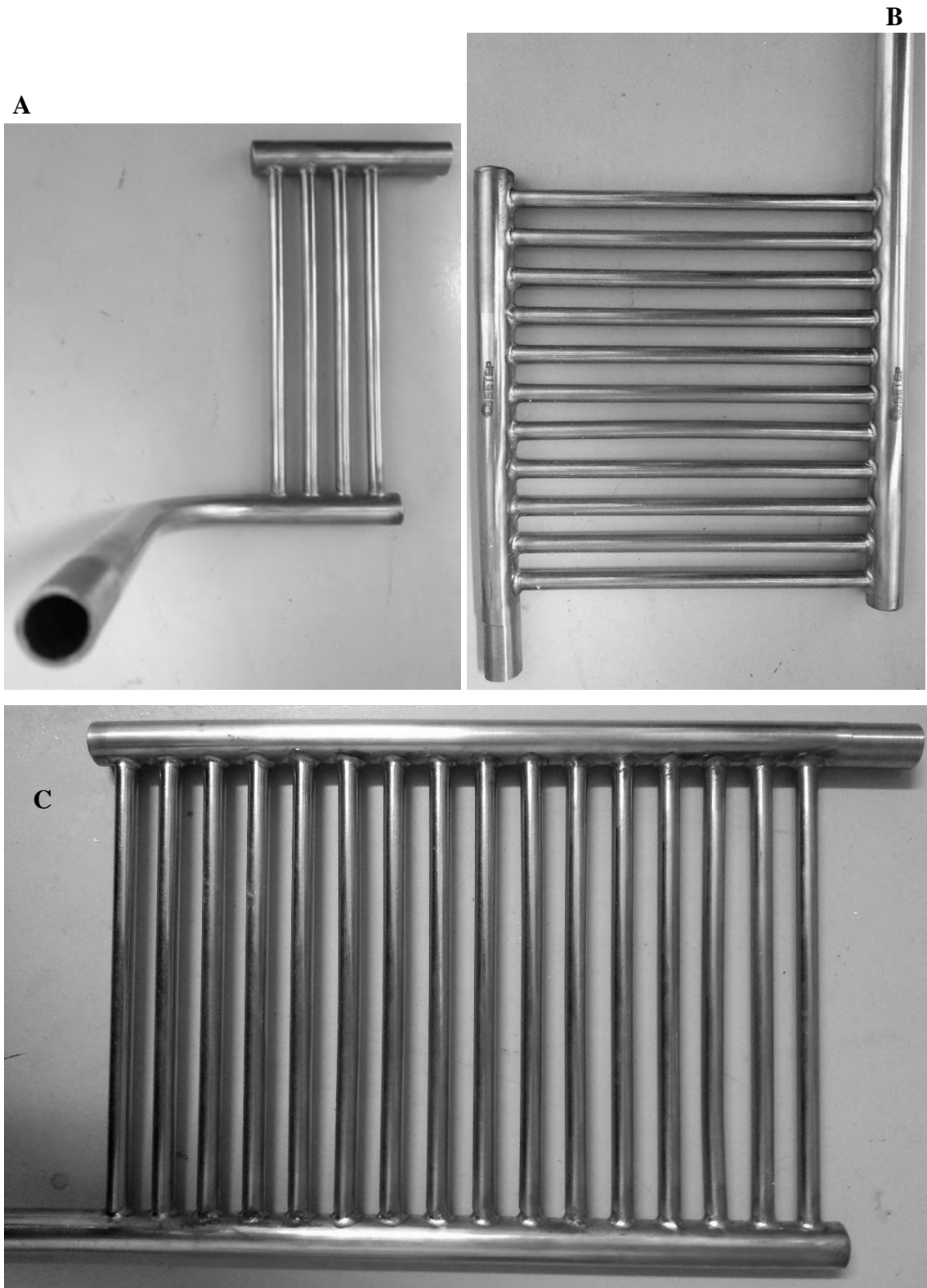


Anexo 4 - Desenho técnico do evaporador da água.

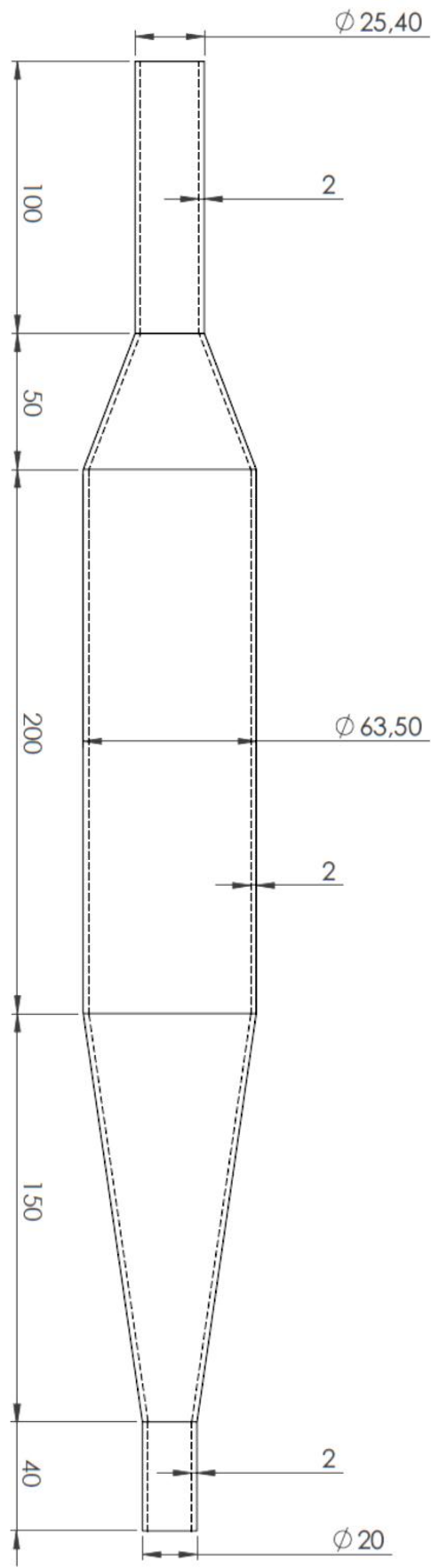




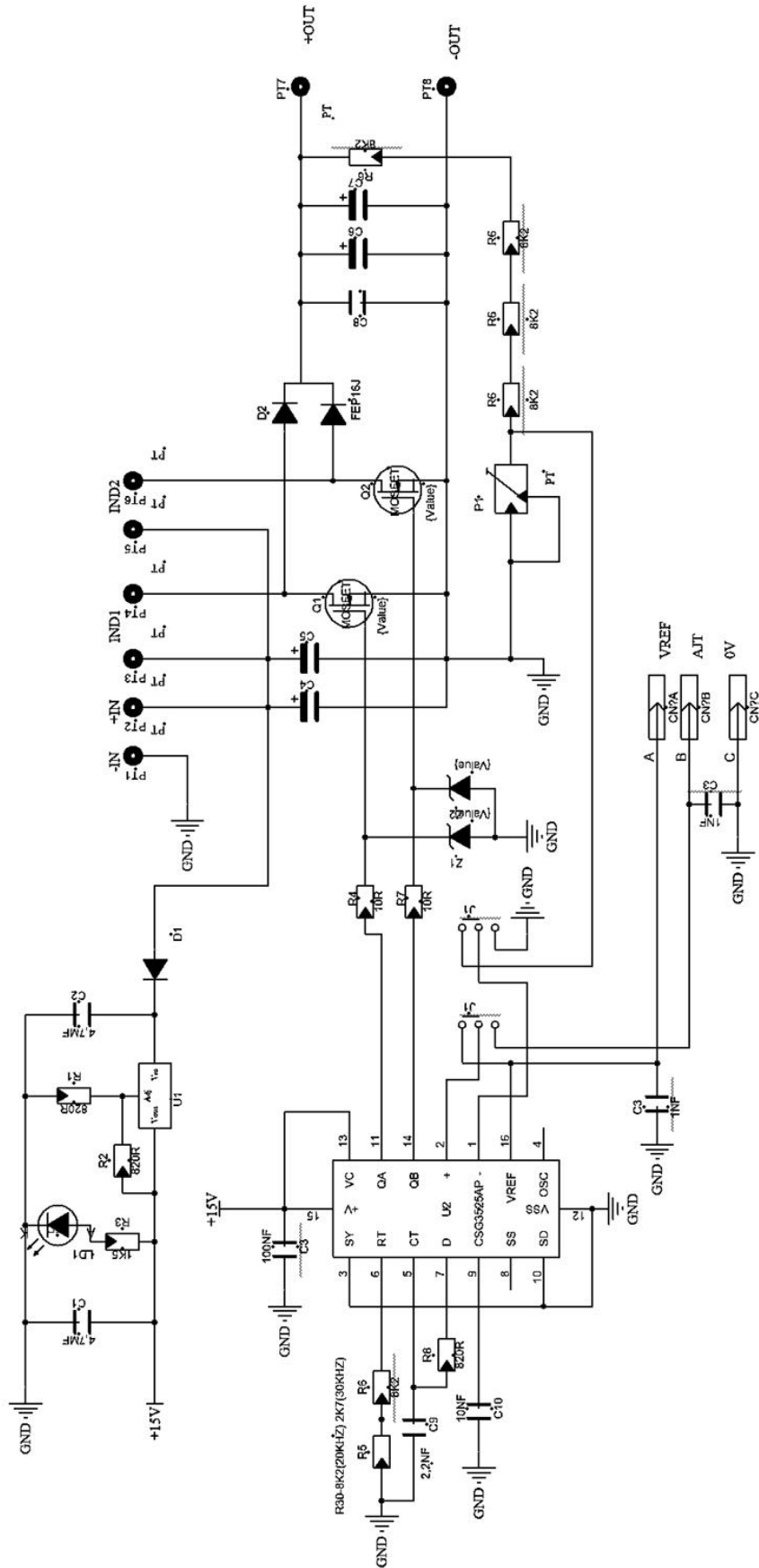
Anexo 5 - Desenho técnico do pré-aquecedor do ar.



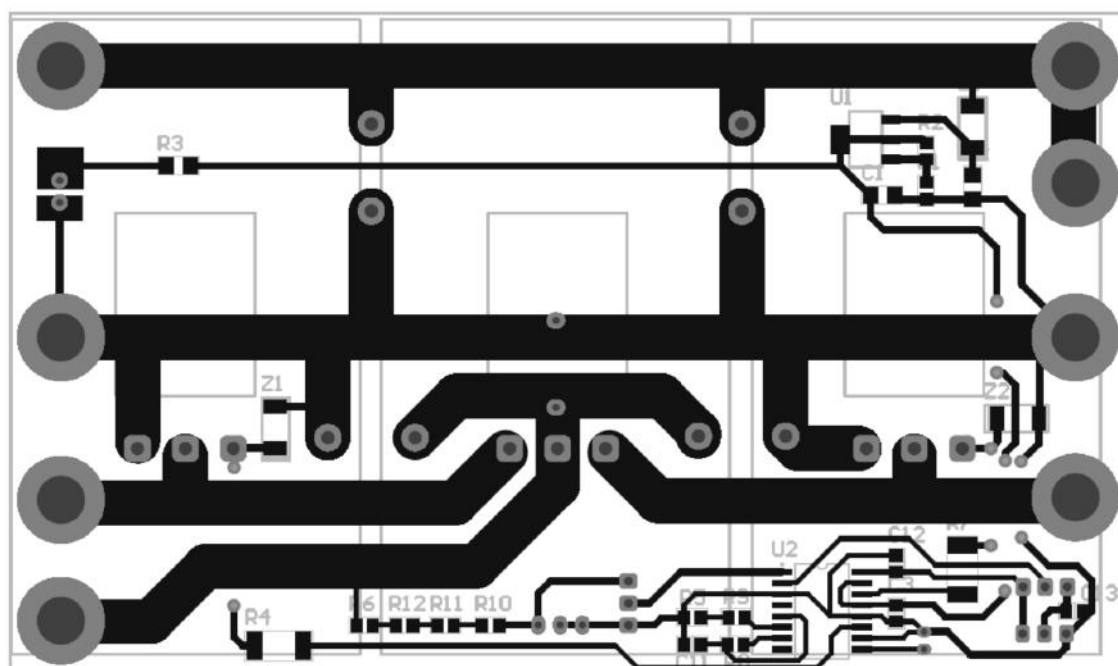
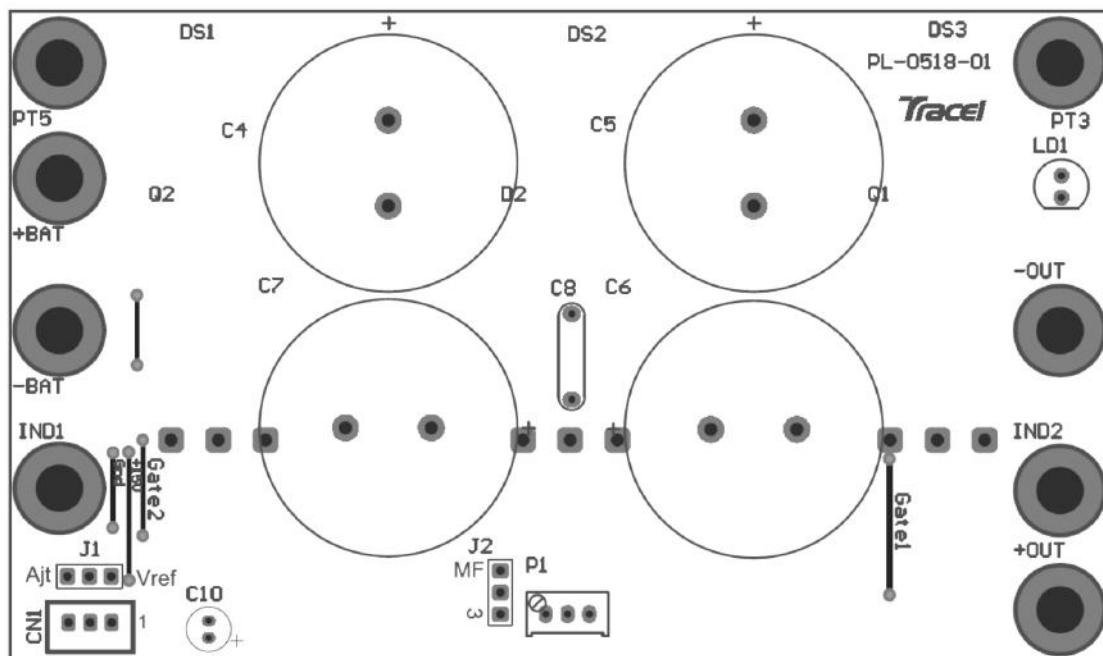
Anexo 6 - Trocadores de calor fabricados: evaporador do etanol (A), pré-aquecedor do ar (B) e evaporador da água (C).



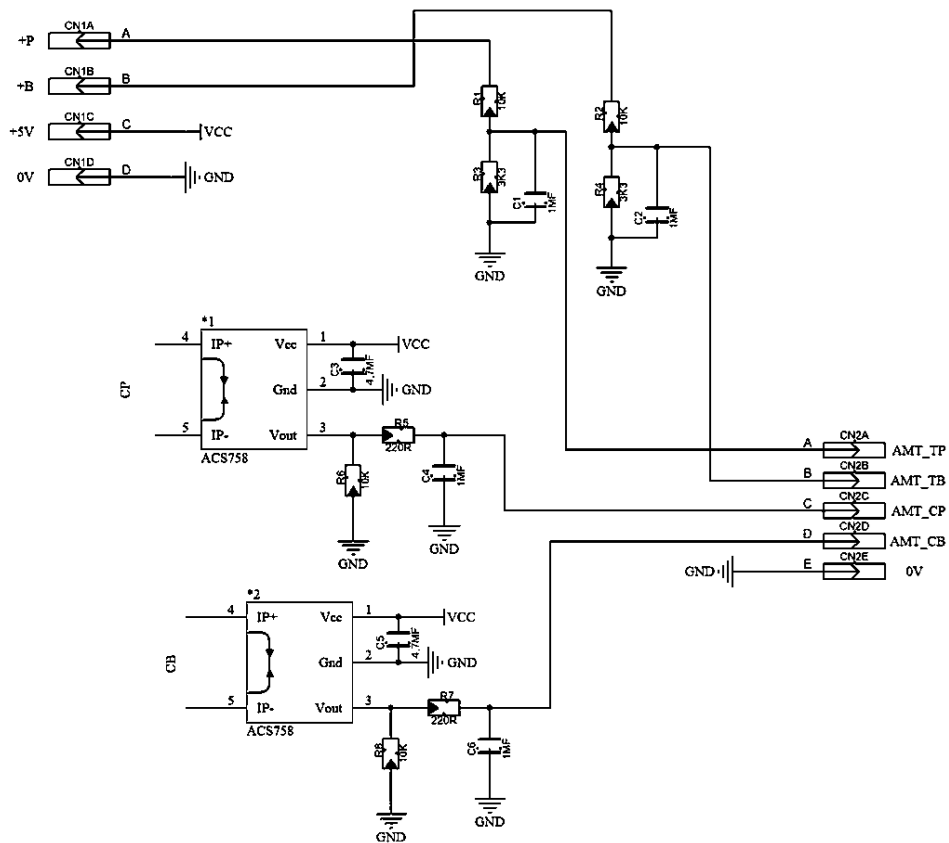
Anexo 7 - Desenho técnico do combustor de inicialização.



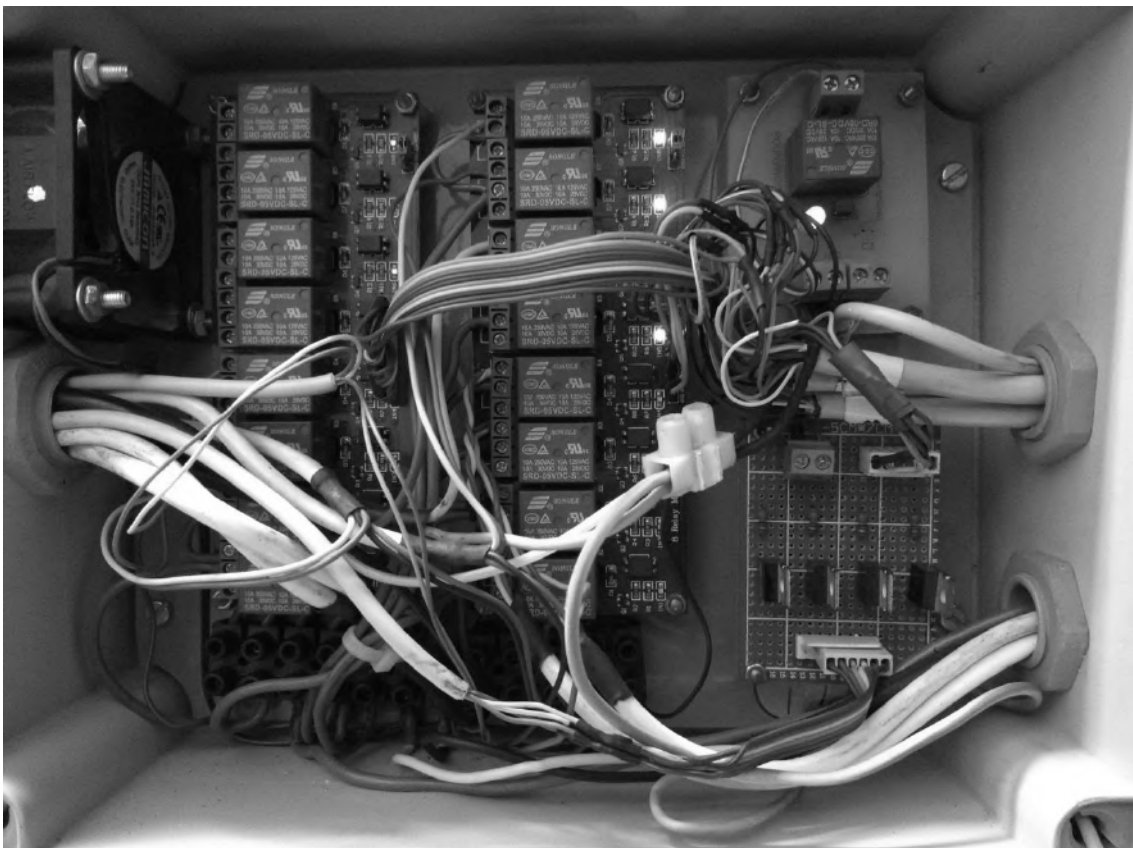
Anexo 8 - Esquema do conversor CC/CC.



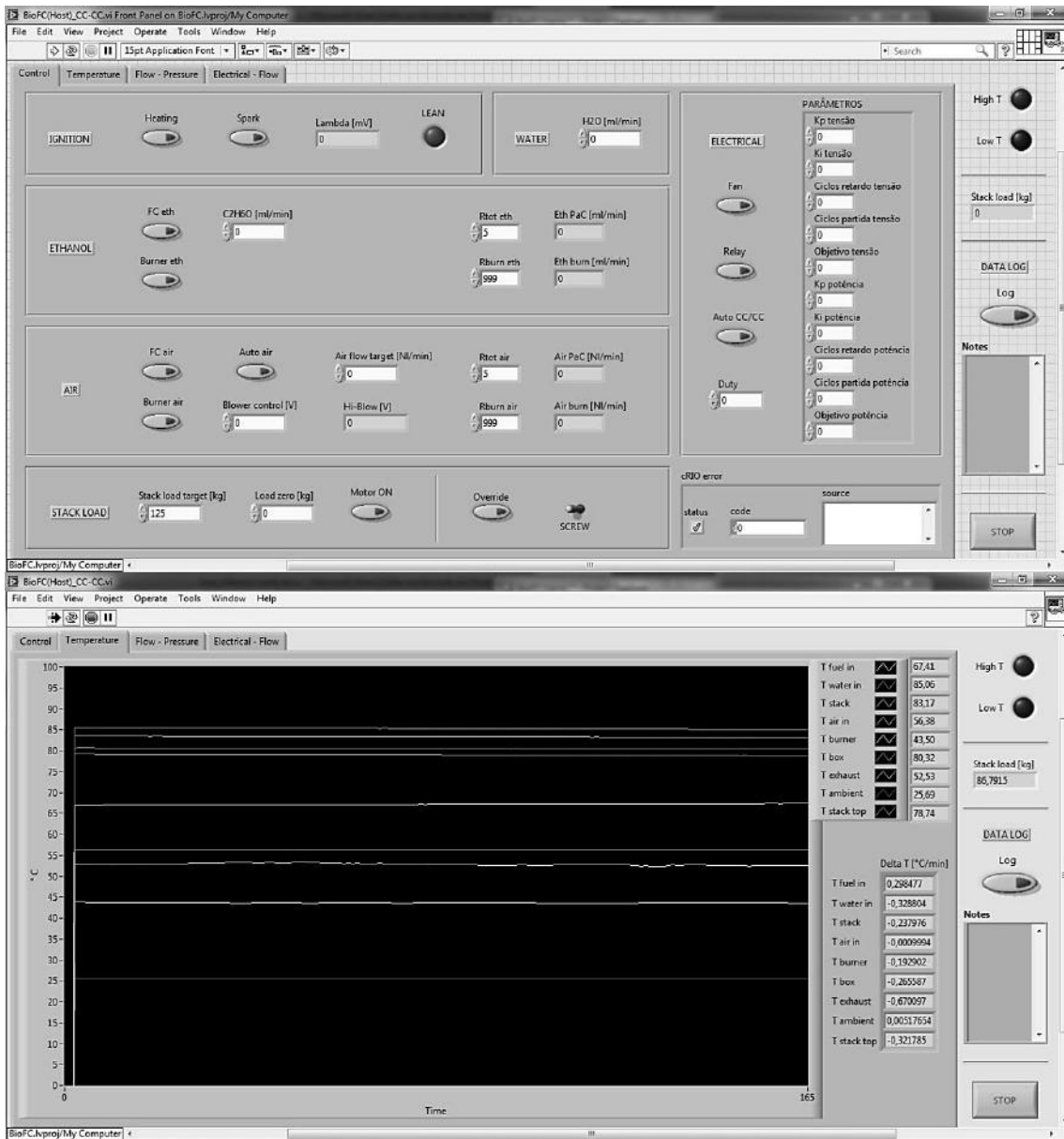
Anexo 9 - Frente e verso da placa do conversor CC/CC.



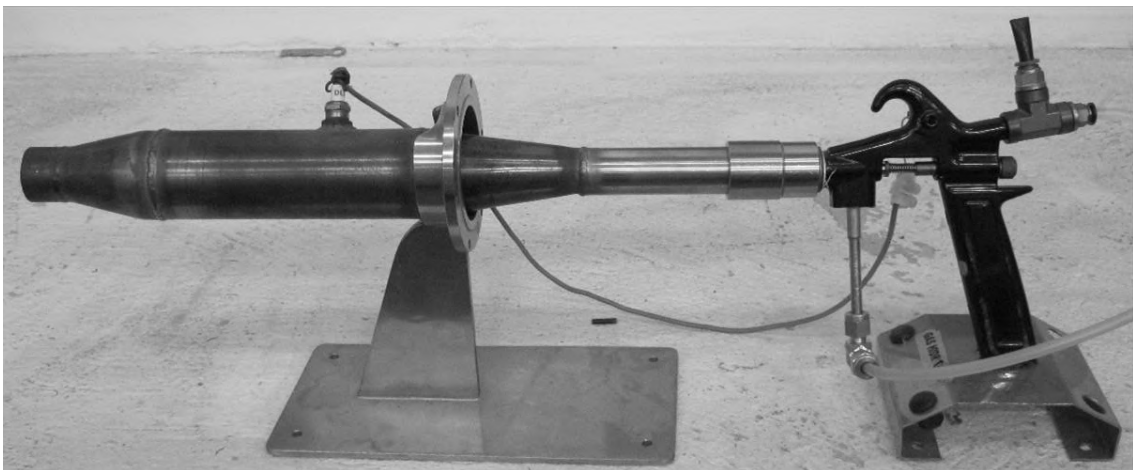
Anexo 10 - Esquema da placa de amostragem de tensão e corrente.



Anexo 11 - Eletrônica de interface entre o controlador NI9082 e os atuadores.



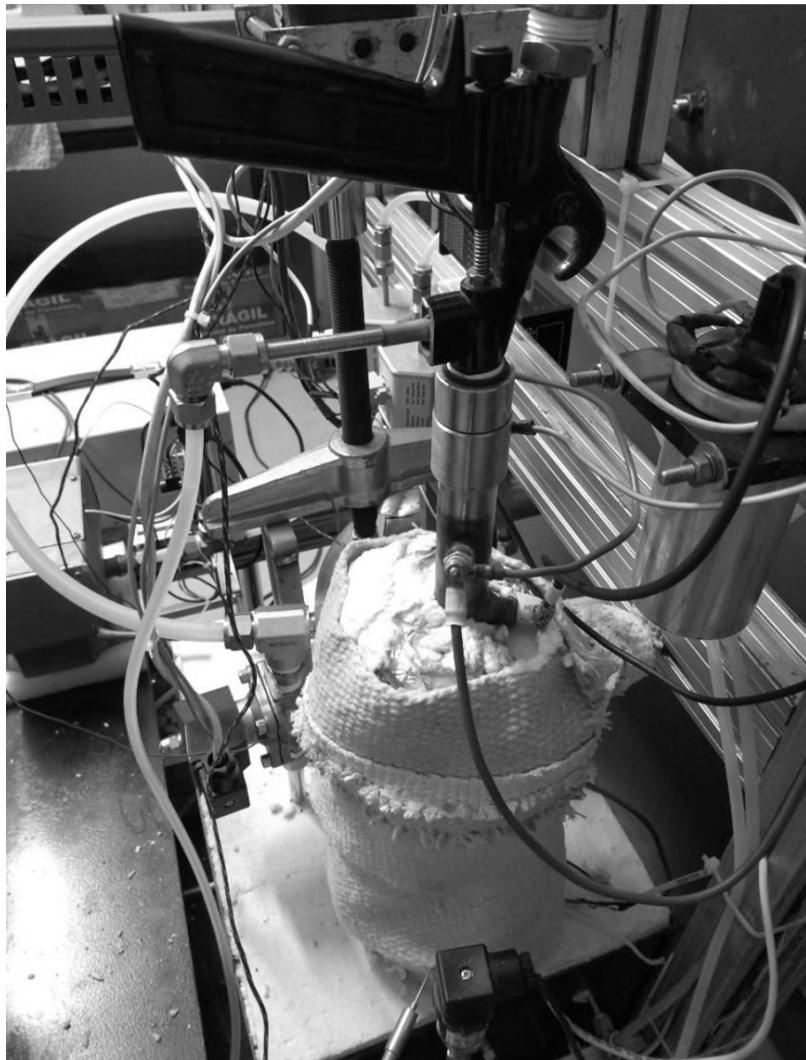
Anexo 12 - Interface homem/máquina do sistema de controle do protótipo.



Anexo 13 - Montagem do combustor.



Anexo 14 - Combustor em operação.



Anexo 15 - Combustor integrado no sistema.