

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

José Auri Flach

**CIRCUITO PARA MONITORAMENTO E RESTABELECIMENTO DA
TENSÃO ELÉTRICA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM
USANDO CURTOS-CIRCUITOS CONTROLADOS**

Santa Maria, RS

2019

José Auri Flach

**CIRCUITO PARA MONITORAMENTO E RESTABELECIMENTO DA TENSÃO
ELÉTRICA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM USANDO CURTOS-
CIRCUITOS CONTROLADOS**

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

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD.

Santa Maria, RS, Brasil

2019

Flach, José Auri

Monitoramento e Restabelecimento da Tensão Elétrica
em Células a Combustível tipo PEM Usando Curtos-Circuitos
Controlados / José Auri Flach.- 2019.

132 p.; 30 cm

Orientador: Felix A. Farret

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Células a combustível 2. Curtos-circuitos periódicos
3. Controlador de eficiência 4. Hidrogênio I. Farret,
Felix A. II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a José Auri Flach. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: auri.flach@gmail.com

José Auri Flach

**CIRCUITO PARA MONITORAMENTO E RESTABELECIMENTO DA TENSÃO
ELÉTRICA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM USANDO CURTOS-
CIRCUITOS CONTROLADOS**

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

Aprovado em 31 de março de 2019:

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

Frank Gonzatti (UFSM)

Vinicius Nizolli Kuhn (IFSul)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha esposa Verlaine e a meu filho Guilherme pela convivência, amor e carinho. Agradeço também à minha mãe e a meu pai, irmãs e irmãos, cunhadas e cunhados, sobrinhas e sobrinhos por cultivarem a amizade e a união familiar, fazendo da vida uma festa a cada vez que nos reunimos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, verdadeiro Mestre, por proporcionar-nos esta experiência maravilhosa da pesquisa e desafios da ciência satisfazendo nossa alma enquanto trilhamos seus caminhos;

- ao meu orientador, Prof. Felix Alberto Farret, pelos conhecimentos compartilhados, pela confiança em mim depositada e empenho em favor da ciência;

- ao Dr. Frank Gonzatti pela dedicação à equipe do laboratório H2, por estar sempre pronto a contribuir com sua experiência e pela amizade. Também ao Dr. Vinicius Nizolli Kuhn, pela amizade e por ter me estimulado a ingressar no projeto que a equipe do CEESP/UFSM desenvolve em energias renováveis;

- ao grupo de pessoas que compõe o CEESP/UFSM, principalmente ao pessoal do laboratório H2, onde fui muito bem acolhido e encontrei um grupo muito unido em torno da pesquisa e afazeres diário do laboratório. Agradeço também ao Lucas Feksa Ramos por sua habilidade diferenciada para movimentar as pessoas a atingirem seus objetivos;

- aos servidores da secretaria do PPGEE, Luciana e André, por sempre estarem disponíveis e empenhados no melhor andamento do meu trabalho;

- ao corpo docente e técnico administrativos do IFSul campus Camaquã, por serem gabaritados profissionais, por toda parceria que sempre demonstraram e onde existem pessoas que acreditam e trabalham incansavelmente pelo Brasil;

- aos colegas de todos os lugares onde já trabalhei, pois o que sou hoje foi moldado pelas pessoas que conheci ontem.

RESUMO

CIRCUITO PARA MONITORAMENTO E RESTABELECIMENTO DA TENSÃO ELÉTRICA EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM USANDO CURTOS-CIRCUITOS CONTROLADOS

AUTOR: José Auri Flach

ORIENTADOR: Felix Alberto Farret, PhD

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis pode contribuir significativamente para amenizar os impactos que as fontes não renováveis causam sobre a natureza. Dentre estas, a geração de energia utilizando hidrogênio é de grande interesse, podendo este ser obtido com facilidade e ser armazenado para utilização futura quando for necessário. O objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia para descobrir deficiências na tensão da geração de energia elétrica e recuperar o funcionamento ideal de células a combustível individuais tipo membrana de troca de prótons - proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). Esta metodologia relaciona-se à aplicação individual de curtos-circuitos controlados nas células que apresentem geração de tensão abaixo do nível esperado. A medição da tensão elétrica de cada célula a combustível é a base das informações sobre sua eficiência e para aplicação de um algoritmo adequado para sua reabilitação. Este estudo usa modelagem, simulações e a construção de um protótipo para testes de validação. Como parte deste trabalho foi desenvolvido e montado um Módulo para Monitoramento e Aplicação de Curtos-circuitos Controlados (MMACC) para monitorar e atuar sobre células individuais dentro de uma pilha delas e ser uma ferramenta auxiliar em laboratórios de estudos com hidrogênio. Durante este desenvolvimento foram realizadas simulações com pilhas de células a combustível, fazendo leituras das suas tensões elétricas e aplicações de curtos-circuitos utilizando um programa simulador de circuitos eletrônicos. O protótipo real proposto foi validado em ambiente de simulação utilizando uma ferramenta auxiliar para simular as células a combustível atuando na faixa ôhmica. Foram obtidos resultados que mostraram a viabilidade de utilização deste protótipo para ser aplicado a pilhas de células a combustível. Os resultados desta dissertação podem ajudar no estudo de alternativas e otimização de estratégias de geração aplicadas em células individuais dentro de uma pilha, mas existem ainda desafios científicos a serem vencidos para aumentar a vida útil da célula a combustível, detectar as anomalias e manter a eficiência adequada.

Palavras-chave: Células a combustível. PEM. Hidrogênio. Controlador de eficiência. Curtos-circuitos periódicos.

ABSTRACT

CIRCUIT FOR MONITORING AND REESTABLISHMENT OF PEM TYPE FUEL CELL VOLTAGE USING CONTROLLED SHORT CIRCUITS

AUTHOR: José Auri Flach

ADVISOR: Felix Alberto Farret, PhD

Electricity generation from renewable sources can contribute significantly to mitigate the impacts that non-renewable sources have on nature. Of these, hydrogen power generation is of great interest and can be easily obtained and stored for future use when needed. The objective of this dissertation is to develop a methodology to discover voltage deficiencies of electric power generation and to recover the optimal functioning of individual proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). This methodology relates to the individual application of controlled short circuits in cells that present voltage generation below the expected level. The measurement of the electric voltage of each fuel cell is the basis of information about its efficiency and for the application of a suitable algorithm for its rehabilitation. This study uses modeling, simulations and the construction of a prototype for validation tests. As part of this work, a Module for Monitoring and Applying Controlled Short Circuits (MMACC) was developed and assembled to monitor and act upon individual cells within a stack and to be an auxiliary tool in hydrogen study laboratories. During this development, simulations were performed with fuel cell stacks, taking their voltage readings and short circuit applications using an electronic circuit simulator program. The proposed real prototype was validated in a simulation environment using an auxiliary tool to simulate fuel cells acting in the ohmic range. Results were obtained that showed the feasibility of using this prototype to be applied to fuel cell stacks. The results of this dissertation may help in the study of alternatives and optimization of generation strategies applied to individual cells within a stack. The results of this dissertation may assist in the study of alternatives and optimization of generation strategies applied to individual cells within a stack, but there are still scientific challenges to be overcome to increase fuel cell life, detect anomalies and maintain proper efficiency.

Keywords: Fuel cell. PEM. Hydrogen. Controller. Periodical short circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Processo de um armazenador de energia usando hidrogênio	26
Figura 1.2 – Controle da estequiometria constante.....	27
Figura 1.3 – Operação de longo prazo aplicando corrente de curto-circuito (CSC)	28
Figura 1.4 – Aplicação de curtos-circuitos em toda a pilha.....	29
Figura 2.1 – Pedido de patente	31
Figura 2.2 – Circuito do pedido de Patente	32
Figura 2.3 – Teste com defasagem de tempo de 24 h entre (b) e (a).....	33
Figura 2.4 – Tensão de polarização sem e com corrente de curto-circuito (CSC)	34
Figura 2.5 – Superposição de locais com <i>hotspot</i>	35
Figura 2.6 – Formação do <i>pin-hole</i>	35
Figura 2.7 – Curva típica da célula a combustível.....	37
Figura 2.8 – Teste de curto-circuito.....	37
Figura 3.1 – Aplicação prática da CaC para geração de energia elétrica	39
Figura 3.2 – Software do laboratório H2 do CEESP/UFSM.....	40
Figura 3.3 – Curtos-circuitos periódicos em testes no Lab. H2 do CEESP/UFSM.....	40
Figura 3.4 – Diagrama da pilha CaC comercial modelo H-3000	41
Figura 3.5 – Banco de capacitores da CaC comercial modelo H-3000	42
Figura 3.6 – Modelo da célula a combustível	43
Figura 3.7 – Distribuição normal com bandas de desvio padrão.....	45
Figura 3.8 – Curva característica da CaC modelo H-3000.....	46
Figura 3.9 – Modelo simplificado para uma célula	46
Figura 3.10 – Fonte V2 com modelamento ôhmico	47
Figura 3.11 – Curva P-I da CaC	47

Figura 3.12 – Topologia usada na simulação	48
Figura 3.13 – Capacidade de corrente	49
Figura 3.14 – Capacidade de corrente versus largura do pulso.....	50
Figura 3.15 – Circuito de acionamento lento	51
Figura 3.16 – Visão geral do acionamento lento das seis células	51
Figura 3.17 – Descarga do capacitor no início do acionamento	52
Figura 3.18 – Circuito de acionamento rápido.....	53
Figura 3.19 – Visão geral do acionamento rápido para uma célula	54
Figura 3.20 – Detalhe ampliado da descarga do capacitor.....	55
Figura 3.21 – Modelo para simular a curva I-V completa da célula PEM.....	56
Figura 3.22 – Simulação da curva I-V para uma célula	56
Figura 3.23 – Simulação da leitura diferencial de tensão – AD820.....	58
Figura 3.24 – Leitura da tensão de uma célula da pilha - AD820.....	59
Figura 3.25 – LM358 alimentado com fonte simples	60
Figura 3.26 – Simulação do LM358 alimentado com fonte simples	61
Figura 3.27 – Circuito LM358 com fonte positiva e negativa	61
Figura 3.28 – Simulação do LM358 alimentado com fonte positiva e negativa.....	62
Figura 4.1 – Laboratório H2 - CEESP UFSM	65
Figura 4.2 – CaC do Laboratório H2 do CEESP/UFSM	66
Figura 4.3 – Ponto de conexão do MMACC.....	67
Figura 4.4 – Módulo simulador da pilha PEM – região ôhmica.....	68
Figura 4.5 – Desvio padrão adaptado ao projeto.....	71
Figura 4.6 – PWM na célula 2	72
Figura 4.7 – Detalhe do PWM atuando sobre a saída 7	73
Figura 4.8 – Trem de pulsos de PWM na saída 7	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Cálculo do erro de leitura.....	69
Tabela 4.2 – Remoção do erro de leitura.....	70
Tabela 4.3 – Análise de células	71

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	Analog to Digital Converter
CaC	Célula a Combustível
CSC	Short Circuit Current
CEESP/UFSM	Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência da Universidade Federal de Santa Maria
ESS	Energy Storage Systems
GD	Geração Distribuída
MMACC	Módulo de Monitoramento e Aplicação de Curtos-circuitos Controlados
NTP	Normal Temperature and Pressure
PC	Personal Computer
PEM	Proton Exchange Membrane
OCV	Open Circuit Voltage
STP	Standard Temperature and Pressure

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{Nernst}	Tensão de Nernst do circuito aberto de uma CaC (V)
n	Número de células da CaC sendo monitoradas
P_{CaC}	Potência das células a combustível (W)
V_{act}	Tensão do potencial de ativação (V)
V_{CaC}	Tensão de saída da CaC para determinado ponto de operação (V)
V_{con}	Queda de tensão devido ao potencial de concentração (ou polarização de concentração) (V)
V_i	Tensão da célula individual (V)
V_m	Tensão média produzida pela CaC (V)
V_{ohmico}	Queda de tensão ôhmica (ou polarização ôhmica) (V)
V_{ref}	Tensão de referência (V)
σ	Desvio padrão
T	Temperatura (K)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO	28
1.1.1	Objetivo geral	28
1.1.2	Objetivos específicos	29
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
3	TEORIA E SIMULAÇÕES	39
3.1	CÉLULA A COMBUSTÍVEL	39
3.2	MODELAMENTO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL	43
3.3	MODELO SIMPLIFICADO DA CÉLULA PEM	45
3.4	SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO	48
3.4.1	Simulação: chaveamento lento dos MOSFETs	50
3.4.2	Simulação: chaveamento rápido dos MOSFETs	53
3.5	MODELO APERFEIÇOADO DE CÉLULAS PEM	55
3.5.1	Simulação: circuito de leitura da tensão das células individuais	57
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA E RESULTADOS	65
4.1	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	65
4.2	SOFTWARE, TESTES E RESULTADOS	68
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5	CONCLUSÃO	75
5.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	76
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A PROJETO ELETRÔNICO	83
	APÊNDICE B DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DO MMACC	91
	APÊNDICE C FONTE DO SOFTWARE PARA MÓDULO ARDUINO	97
	ANEXOS	117
	ANEXO A COMPONENTES DO LABORATÓRIO H2 – CEESP/UFSM	119
	Anexo A.1 ELETROLISADOR	119
	Anexo A.2 – CILINDRO COM LIGA DE HIDRETO METÁLICO	122

Anexo A.3 – PILHA DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL	125
ANEXO B ESPECIFICAÇÃO DE COMPONENTES.....	129

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções para geração de energia elétrica com baixo risco e impacto ambiental tem direcionado as pesquisas para as fontes alternativas, de acordo com Farret (2018). Um fator muito positivo dessa forma de geração é a possibilidade de localizar a planta geradora nas proximidades do ponto de consumo, diminuindo assim perdas e probabilidades de defeitos nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Este conceito é conhecido como geração distribuída (GD) e, como exemplo, têm-se as fontes de geração fotovoltaica, eólica, geotérmica, por biodigestores, pequenas centrais hidrelétricas e também por utilização de hidrogênio.

Uma característica típica da GD é a intermitência de geração, tais como as causadas pela falta de sol ou de ventos, dificuldades estas que podem ser amenizadas com a mescla de tipos diferentes de geração. Como exemplo, tem-se a mescla entre geração fotovoltaica e geração por hidrogênio, que se transforma numa solução muito conveniente. Durante o dia, uma parte da energia produzida pela geração fotovoltaica pode acionar um eletrolisador, separando o hidrogênio da água e acumulando-o para usar na geração de eletricidade durante a noite.

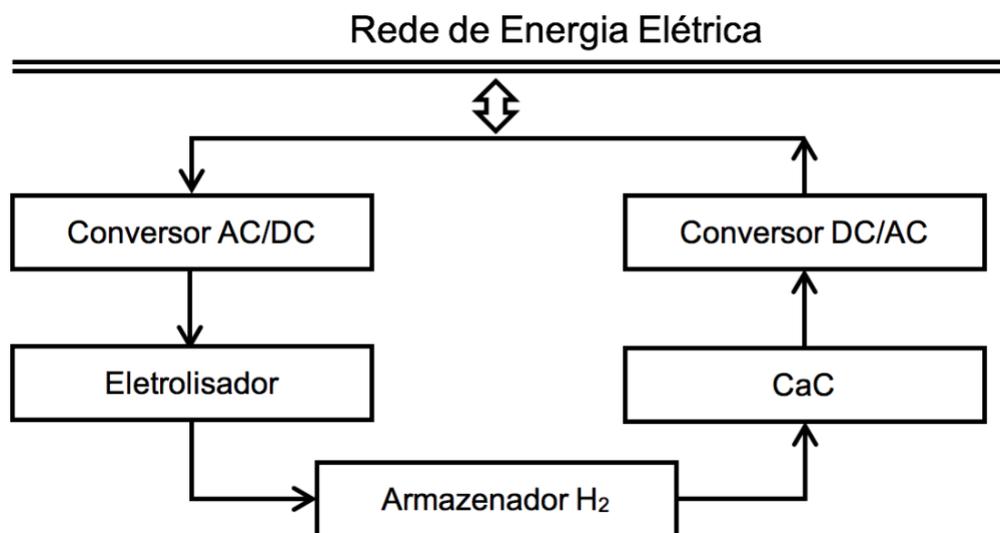
Uma vantagem da GD é sua aplicação para a estabilização dos picos de demanda por fornecimento de energia elétrica, ou em situações de emergência, ou mesmo para suprir a energia durante as atividades de manutenção da rede de distribuição. Neste sentido, a GD pode ser compreendida como parte do conceito de sistema de armazenamento de energia (ESS, em inglês, energy storage systems), conforme Ibrahim et al. (2008). Uma das formas é o uso do hidrogênio, como mostrado na Figura 1.1.

Outra aplicação direta e promissora para células a combustível é na área automotiva, onde a crescente preocupação com a poluição ambiental tem levado os fabricantes de automóveis a desenvolverem pesquisas para uso desta tecnologia. Neste tipo de aplicação a constante alteração das condições ambientais de operação da célula a combustível precisa ser muito bem verificada para garantir um rendimento estável de geração de energia, como aponta Migliardini; Corbo (2012).

As pesquisas sobre células a combustível mostram que o rendimento na geração de eletricidade costuma ficar entre 35 e 50%, Kuhn (2018). Entretanto, este rendimento pode variar por diversos fatores como os ocasionados por alterações de pressão, vazão de ar, contaminação, formação interna de água, entre outros. A manutenção de condições inapropriadas de funcionamento pode culminar com o rompimento da membrana de troca de prótons,

ocasionando rachaduras ou furos conhecidos como *pin-holes*. O rendimento da célula é diretamente influenciado pela quantidade de água na membrana de troca de prótons, Riascos (2008), sendo possível controlar o rendimento ajustando a umidade da célula, Figura 1.2. Perdas por queda de tensão na faixa ôhmica da célula podem ser amenizadas regulando sua umidificação correta, Gonzatti (2017), possibilitando que a membrana PEM opere com menor chance de danos. O hidrogênio é alimentado pelo lado do anodo enquanto que o oxigênio chega pelo catodo. No catodo ocorre a formação de água, mas como a membrana de troca de prótons é bem fina ocorre também a difusão reversa da água em direção ao anodo. Neste sentido é necessário manter o controle preciso da estequiometria em função da temperatura e da umidade relativa do ar.

Figura 1.1 – Processo de um armazenador de energia usando hidrogênio

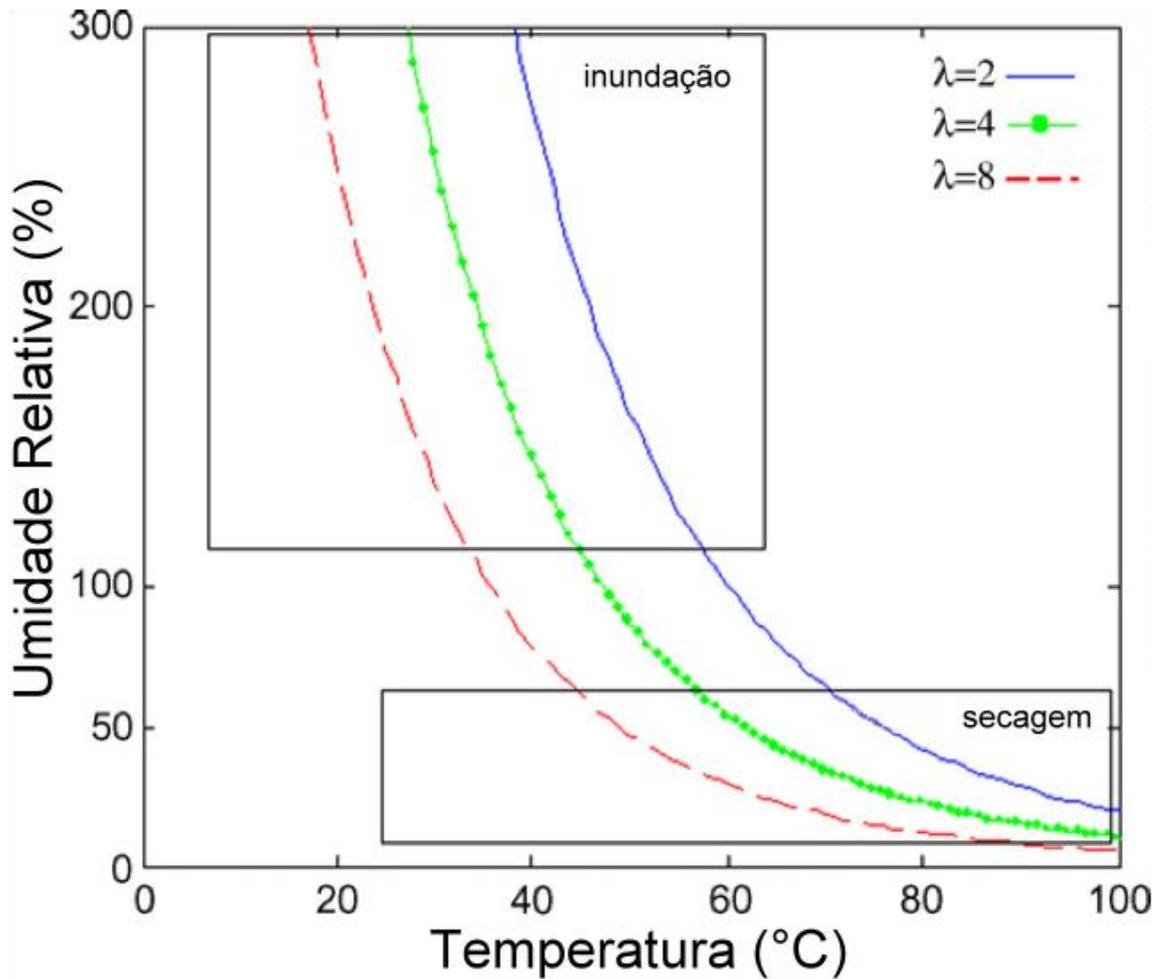


Fonte: Gonzatti (2017)

De grande importância é o comportamento de longo prazo das células a combustível do tipo PEM. Estudos apontam que aplicar curtos-circuitos em células a combustível pode diminuir a degradação que ocorre no longo prazo, Zhan et al. (2014), como mostra a Figura 1.3, mantendo a célula saudável mesmo que ocorrendo uma perda relativa de eficiência na potência de saída. A célula a combustível de teste foi utilizada em duas situações distintas e por um tempo longo, uma sem aplicação da corrente de curto-circuito (CSC – current short circuit) e a

outra com um tempo bem mais longo e usando aplicações da corrente de curto-circuito. O resultado é muito positivo e mostra que mesmo com um tempo longo de operação a performance se mantém estável.

Figura 1.2 – Controle da estequiometria constante

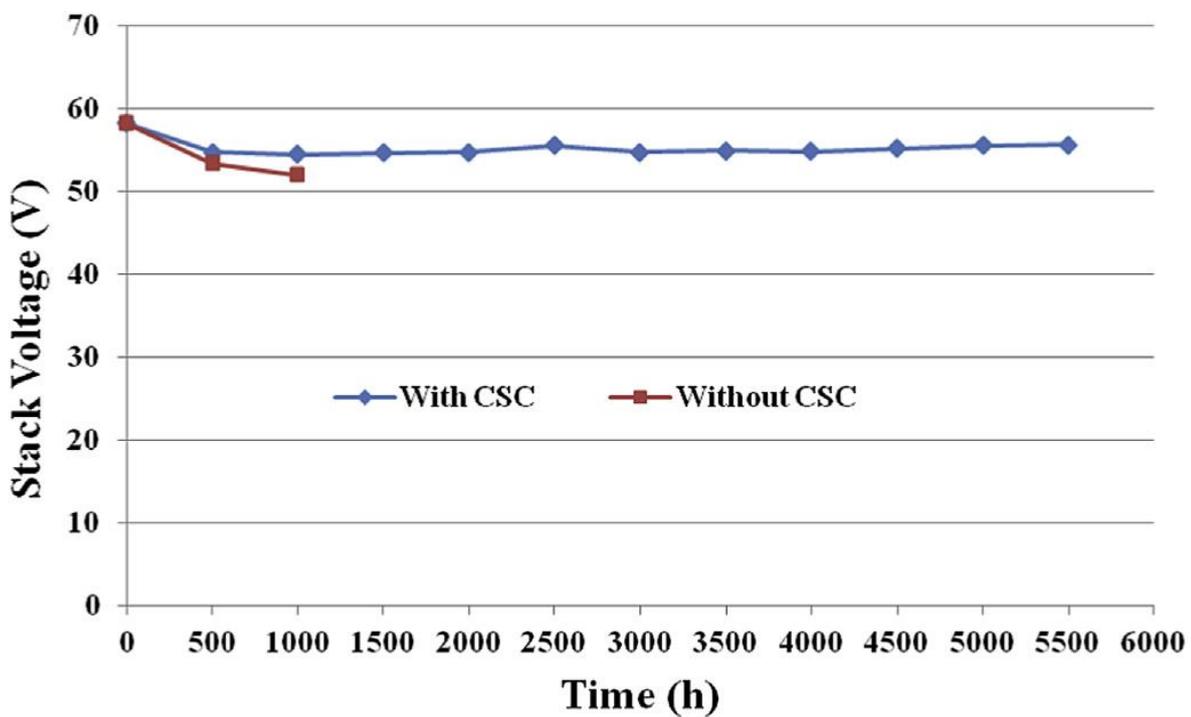


Fonte: Riascos (2008)

Uma técnica que procura equalizar a quantidade de água no valor correto reabilitando a CaC em condições de baixa geração de energia é a aplicação periódica de curtos-circuitos em toda a pilha de células a combustível, como mostra a Figura 1.4. O módulo desenvolvido nesta dissertação serve para este propósito, podendo vir a ser aplicado no gerador de eletricidade com células a combustível do laboratório H2 do CEESP/UFSM. O diferencial é a possibilidade de

se fazer a aplicação de curtos-circuitos em células individuais, conforme uma classificação que segue um critério de análise de desempenho. Células que não apresentem deficiência de geração não sofrem a aplicação de curtos-circuitos. Ainda, conforme o resultado da análise de desempenho é possível modificar a intensidade do processo de atuação para recuperar a capacidade de geração das células que apresentem deficiência.

Figura 1.3 – Operação de longo prazo aplicando corrente de curto-circuito (CSC)



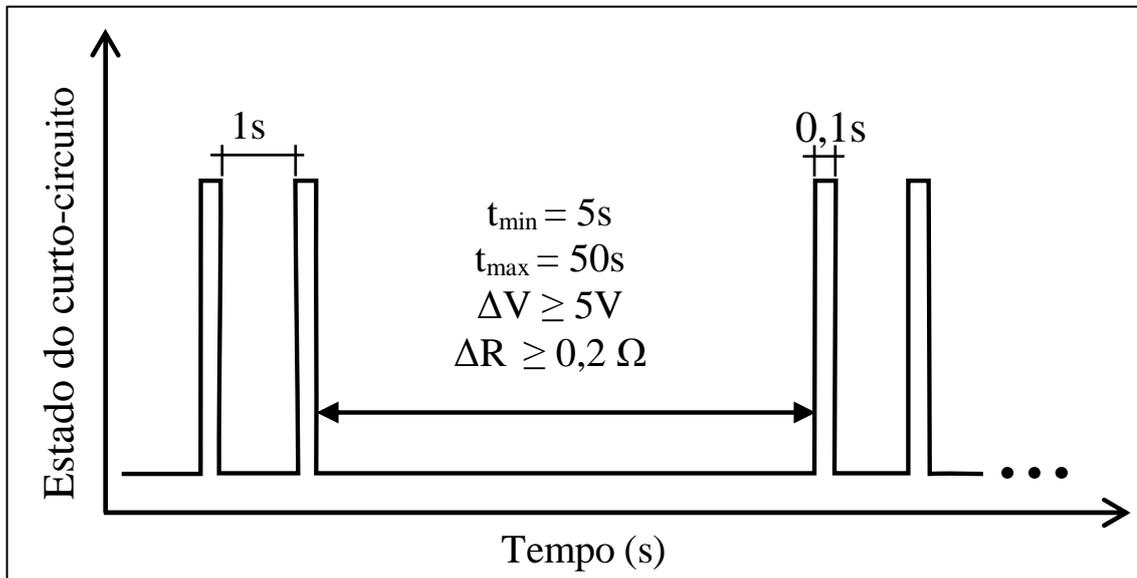
Fonte: Zhan et al. (2014)

1.1 OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação objetiva o desenvolver uma metodologia para recuperar o funcionamento de células a combustível que tenham reduzido a sua tensão terminal dentro de uma pilha FC.

Figura 1.4 – Aplicação de curtos-circuitos em toda a pilha



Fonte: Gonzatti (2017)

1.1.2 Objetivos específicos

Esta dissertação busca atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um módulo eletrônico para adquirir informações individuais precisas de tensão em células a combustível;
- Implementar um algoritmo de decisões quanto à necessidade ou não da aplicação de curtos-circuitos em células individuais de combustível e que faça tentativas de reabilitar o rendimento da geração de eletricidade total da pilha;
- Pesquisar uma forma de modelamento da célula a combustível para utilização no simulador de circuitos eletrônicos LTSpice que está disponível em Analog Devices Inc. (2019);
- Projetar um circuito que permita aplicar a técnica de curto-circuito individualmente em células de combustível para recuperar a tensão;
- Avaliar a viabilidade da montagem dos contatos elétricos numa CaC individual dentro de uma pilha e propor as modificações necessárias;

- Projetar um módulo de controle que permita a integração com um programa de gerenciamento e acionamento por computador;
- Obter resultados práticos com um simulador da região ôhmica de CaCs permitindo sua integração em módulos de controle.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em capítulos organizados da seguinte forma:

- O capítulo 1 discorre sobre causas e recuperação de tensão deficiente de células a combustível dentro de uma pilha para geração de energia usando hidrogênio e a motivação para um estudo dos aspectos que o tema envolve.
- O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, categorizando problemas e soluções que se relacionam com o funcionamento ótimo de células a combustível.
- O capítulo 3 aborda a simulação de uma pilha de células a combustível e como inferir sobre a eficiência da geração de energia elétrica que esta célula pode produzir.
- O capítulo 4 descreve a implantação de um hardware para monitoramento individual de células a combustível dentro de uma pilha e desenvolve a metodologia para a implantação do software de controle e aquisição de dados do processo.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões e o resumo das principais contribuições, incluindo sugestões para novas pesquisas nesta temática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica utilizada nesta dissertação é apresentada em aspectos distintos quanto aos procedimentos e as estratégias na manipulação de células a combustível.

Fuglevand et al. (2000) descreve o trabalho de um grupo de pesquisadores que depositou pedido de patente em diversos países, conforme mostra a Figura 2.1, relacionado à recuperação dos níveis de tensão de células a combustível dentro de uma pilha.

Figura 2.1 – Pedido de patente

			
		US006096449A	
United States Patent [19]	[11] Patent Number:		6,096,449
Fuglevand et al.	[45] Date of Patent:		Aug. 1, 2000
<hr/>			
[54] FUEL CELL AND METHOD FOR CONTROLLING SAME	57-60670	4/1982	Japan .
	57-80675	5/1982	Japan .
	57-107570	7/1982	Japan .
[75] Inventors: William A. Fuglevand; Peter D. DeVries; Greg A. Lloyd; David R. Lott; John P. Scartozzi , all of Spokane, Wash.	2129237	5/1984	United Kingdom .
	WO94/15377	7/1994	WIPO .
[73] Assignee: Avista Labs , Spokane, Wash.	OTHER PUBLICATIONS		
[21] Appl. No.: 09/108,667	Chul-Hawan et al., <i>Journal of Polymer Science</i> , vol. 34, pp. 2709-2714, (1996), (month unknown).		
[22] Filed: Jul. 1, 1998	(List continued on next page.)		
Related U.S. Application Data	<i>Primary Examiner</i> —Stephen Kalafut		
[63] Continuation-in-part of application No. 08/979,853, Nov. 20, 1997.	<i>Attorney, Agent, or Firm</i> —Wells, St. John, Roberts, Gregory & Matkin P.S.		
[51] Int. Cl. ⁷	ABSTRACT		
[52] U.S. Cl.	The present invention relates to an improved fuel cell and method for controlling same having an anode and a cathode which produces an electrical current having a given voltage and current output and which includes a controller electrically coupled with the fuel cell and which shunts the electrical current between the anode and the cathode of the fuel cell. The invention also discloses a method for controlling the fuel cell having an anode, a cathode and a given voltage and current output and which includes determining the voltage and current output of the fuel cell; and shunting the electrical current between the anode and cathode of the fuel cell under first and second operational conditions.		
[58] Field of Search	[57]		
[56] References Cited			
U.S. PATENT DOCUMENTS			
2,852,554 9/1958 England	260/481		
3,498,844 3/1970 Sanderson	136/86		
(List continued on next page.)			
FOREIGN PATENT DOCUMENTS			
25 51936 11/1975 Germany .			
	73 Claims, 4 Drawing Sheets		

Fonte: Fuglevand et al. (2000)

O pedido de patente é realizado para garantir o direito de terem desenvolvido uma topologia para recuperação da tensão de células a combustível dentro de uma pilha, aplicando curtos-circuitos periódicos individuais em todas as células, Figura 2.2. Junto com os curtos-circuitos é feito o monitoramento da condição de operação de cada célula. Caso alguma célula não tenha reação, ou apresente um defeito grave, poderá ser marcada como defeituosa, sendo possível desligar a alimentação de hidrogênio individualmente para esta célula. Ainda neste pedido de patente, uma chave eletrônica do tipo MOSFET permite retirar a célula defeituosa do circuito, fazendo um *by-pass* da corrente, o que deve tornar desnecessária a inclusão de um diodo.

Figura 2.2 – Circuito do pedido de Patente

			
		US006096449A	
United States Patent [19]		[11] Patent Number:	6,096,449
Fuglevand et al.		[45] Date of Patent:	Aug. 1, 2000
4]	FUEL CELL AND METHOD FOR CONTROLLING SAME	57-60670	4/1982 Japan .
		57-80675	5/1982 Japan .
		57-107570	7/1982 Japan .
5]	Inventors: William A. Fuglevand; Peter D. DeVries; Greg A. Lloyd; David R. Lott; John P. Scartozzi , all of Spokane, Wash.	2129237	5/1984 United Kingdom .
		WO94/15377	7/1994 WIPO .
		OTHER PUBLICATIONS	
3]	Assignee: Avista Labs , Spokane, Wash.	Chul-Hwan et al., Journal of Polymer Science, vol. 34, pp 2709-2714, (1996), (month unknown).	
1]	Appl. No.: 09/108,667	(List continued on next page.)	
2]	Filed: Jul. 1, 1998	<i>Primary Examiner</i> —Stephen Kalafut <i>Attorney, Agent, or Firm</i> —Wells, St. John, Roberts, Gregor & Matkin P.S.	
Related U.S. Application Data			
31	Continuation in part of application No. 08/070,853, Nov. 15, 1994, U.S. Pat. No. 5,711,111.	ABSTRACT	

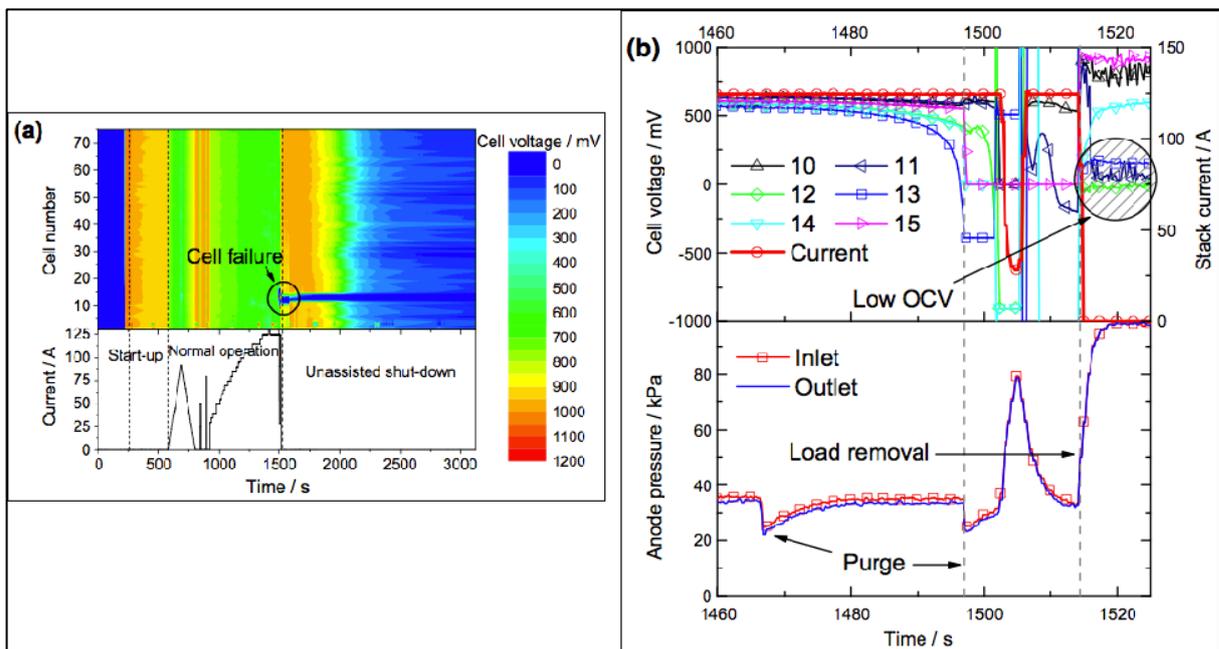
Fonte: Fuglevand et al. (2000)

O protótipo usado nesta dissertação permite a aplicação de curtos-circuitos periódicos para estudos mais aprofundados, porém, não implanta o controle sobre a alimentação de combustível para células individuais.

A publicação de Wu et al. (2016a) aborda a complexidade da estratégia de purga do hidrogênio, técnica realizada para retirar água e nitrogênio que cruzam a membrana PEM,

originários do catodo e que se depositam na região do anodo. A equipe de pesquisa argumenta a respeito dos riscos que esta técnica apresenta para o rompimento da membrana ocasionando o que chamam de *pin-holes*, Figura 2.3. Esta pesquisa apresenta dados do experimento mostrando que após o aparecimento de *pin-holes* a tensão de saída fica mais baixa quando a carga é removida, como informa a anotação *open circuit voltage* (OCV) da Figura 2.3. Este estudo também relaciona o formato dos canais que alimentam o hidrogênio na célula como responsável pelo surgimento de locais com variações na pressão, o que se traduz em pulsos de pressão que se deslocam pelo interior da célula quando a purga acontece gerando stress para a membrana, podendo culminar com o aparecimento de rachaduras ou furos, denominados *pin-holes*. O procedimento empregado no estudo de Wu et al. (2016a) permite a aquisição prolongada da tensão e corrente individual das células, além da pressão total para se estudar as situações que levam a falhas.

Figura 2.3 – Teste com defasagem de tempo de 24 h entre (b) e (a)

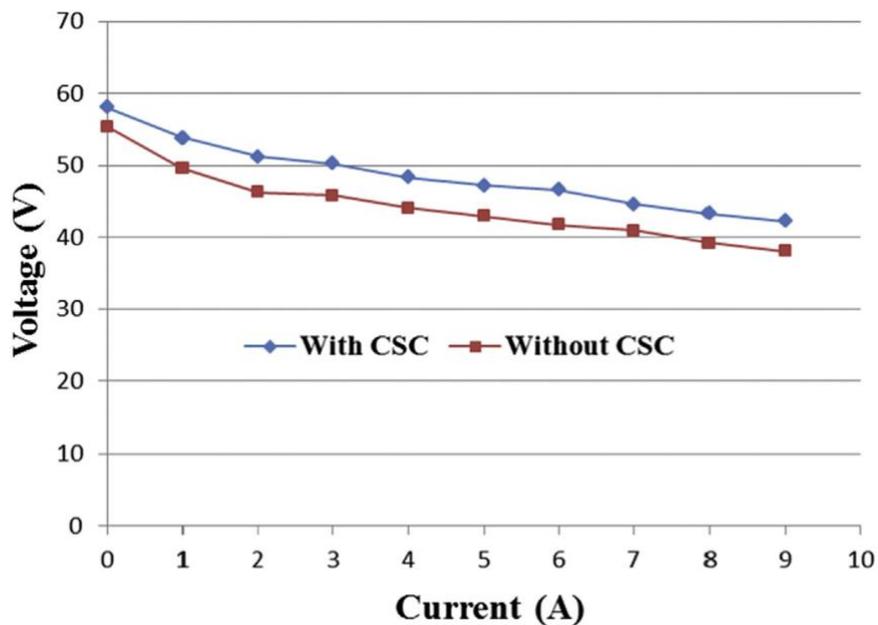


Fonte: Wu et al. (2016a)

Zhan et al. (2014) fala da importância de manter uma alta eficiência das células a combustível do tipo PEM para maximizar a potência da geração elétrica. Este estudo abordou

algumas formas para se aumentar a performance e vida útil de pilhas FC, apresentando resultados que indicam que a aplicação de curtos circuitos periódicos garante um desempenho melhor a longo prazo e diminui a degradação da geração de tensão elétrica da pilha, como mostra a Figura 2.4. Foram realizados experimentos com diversas configurações entre o instante da aplicação do curto circuito e uma espera entre as aplicações, mas sempre os aplicando sobre toda a pilha. Este artigo foi de fundamental importância para a realização desta dissertação servindo de base para a aplicação de curtos-circuitos, porém agora em células individuais e quando necessário, mas deixando células com funcionamento normal de fora do procedimento. Atuar apenas sobre células com deficiência de geração de energia elétrica também pode contribuir para aumentar a vida útil da pilha e evitar o aparecimento de *pin-holes*, já que a aplicação de curtos-circuitos sobre toda a pilha pode forçar um aumento da velocidade das purgas com a retirada do excesso de água que pode se formar após a aplicação deste procedimento, como indica Wu et al. (2016b).

Figura 2.4 – Tensão de polarização sem e com corrente de curto-circuito (CSC)

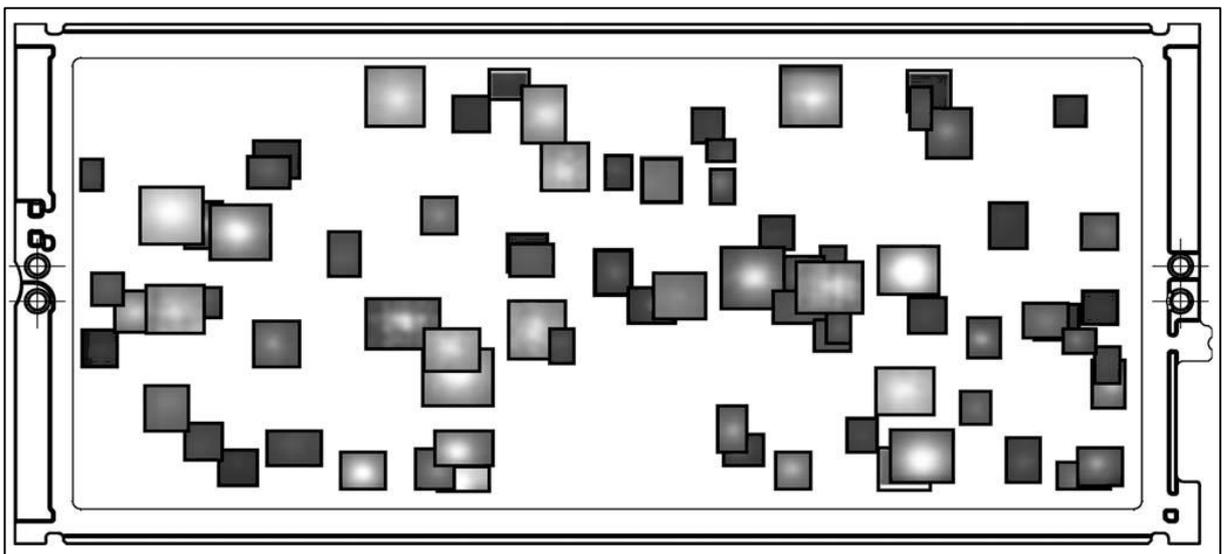


Fonte: Zhan et al. (2014)

O trabalho de De Moor et al. (2015) estipula que uma forma muito comum de se estimar a condição adequada de funcionamento de uma célula a combustível é monitorar sua tensão nos

seus terminais. O artigo fala sobre um experimento que foi realizado usando componentes de diferentes fabricantes para uma quantidade considerável de células novas submetidas a diversas condições de funcionamento com diferentes graus de envelhecimento até a ocorrência de falhas. O artigo também chama a atenção para a complexidade de fabricação das membranas, pois uma análise revelou a presença de *pin-holes* em muitas membranas das células novas, mascarada por ter uma ordem de magnitude menor do que a corrente gerada pela difusão do hidrogênio. A Figura 2.5 mostra a superposição de *hotspots* encontrados em 100 células novas.

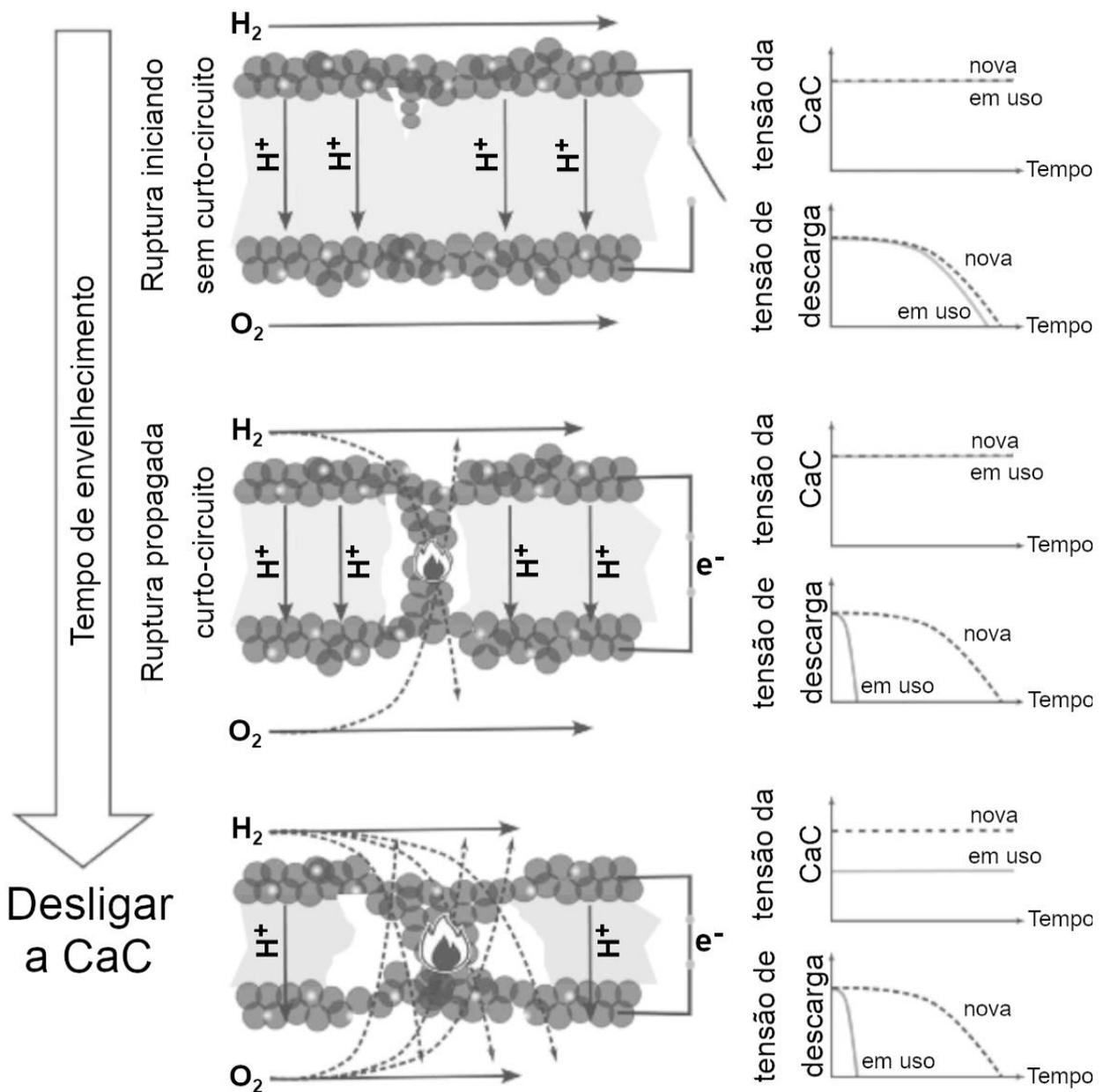
Figura 2.5 – Superposição de locais com *hotspot*



Fonte: De Moor et al. (2015)

O artigo de De Moor et al. (2015) é de importância nesta dissertação, pois desperta a investigação para usar a técnica de curto-circuito que foi implantada no protótipo destes autores como forma de detectar falhas permanentes nas células, como a mostrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Formação do *pin-hole*



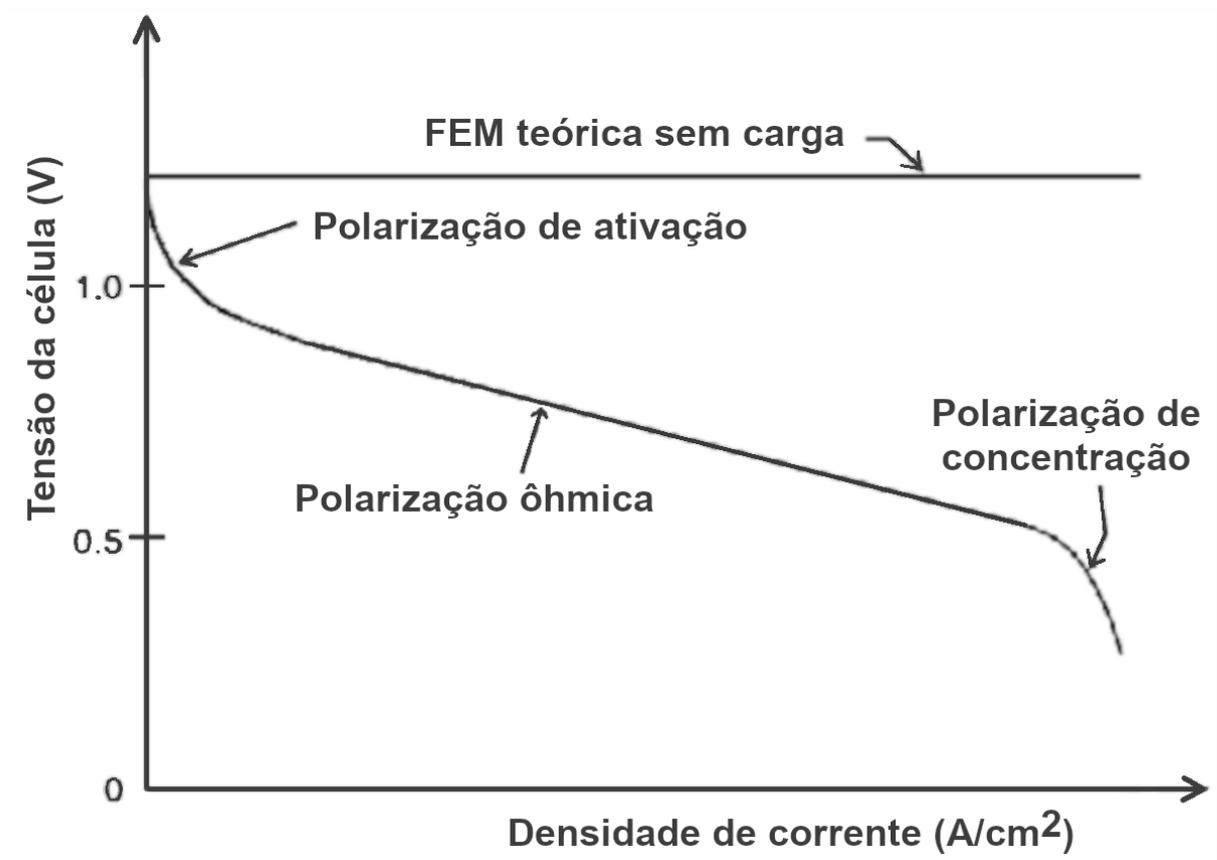
Fonte: De Moor et al. (2015) – tradução adaptada pelo Autor

O artigo de Benesch; Jacksier (2005) serve como material complementar para esta dissertação, porque aborda fatores de contaminação que podem degradar o rendimento da célula a combustível. Mesmo que a forma de medição implementada no protótipo não traga informações sobre o percentual de contaminação, este artigo pode contribuir para a inclusão posterior de novos sensores para este fim.

Já o trabalho de Arsov (2008) mostra uma forma de se montar um modelo de simulação completa com as características da célula a combustível, como ilustrado na Figura 2.7, para o

simulador de circuitos eletrônicos LTSpice. A integração do modelo proposto na simulação com outros componentes eletrônicos é importante para desenvolver circuitos que possam lidar adequadamente com as características encontradas nas células a combustível, como o protótipo desenvolvido para esta dissertação.

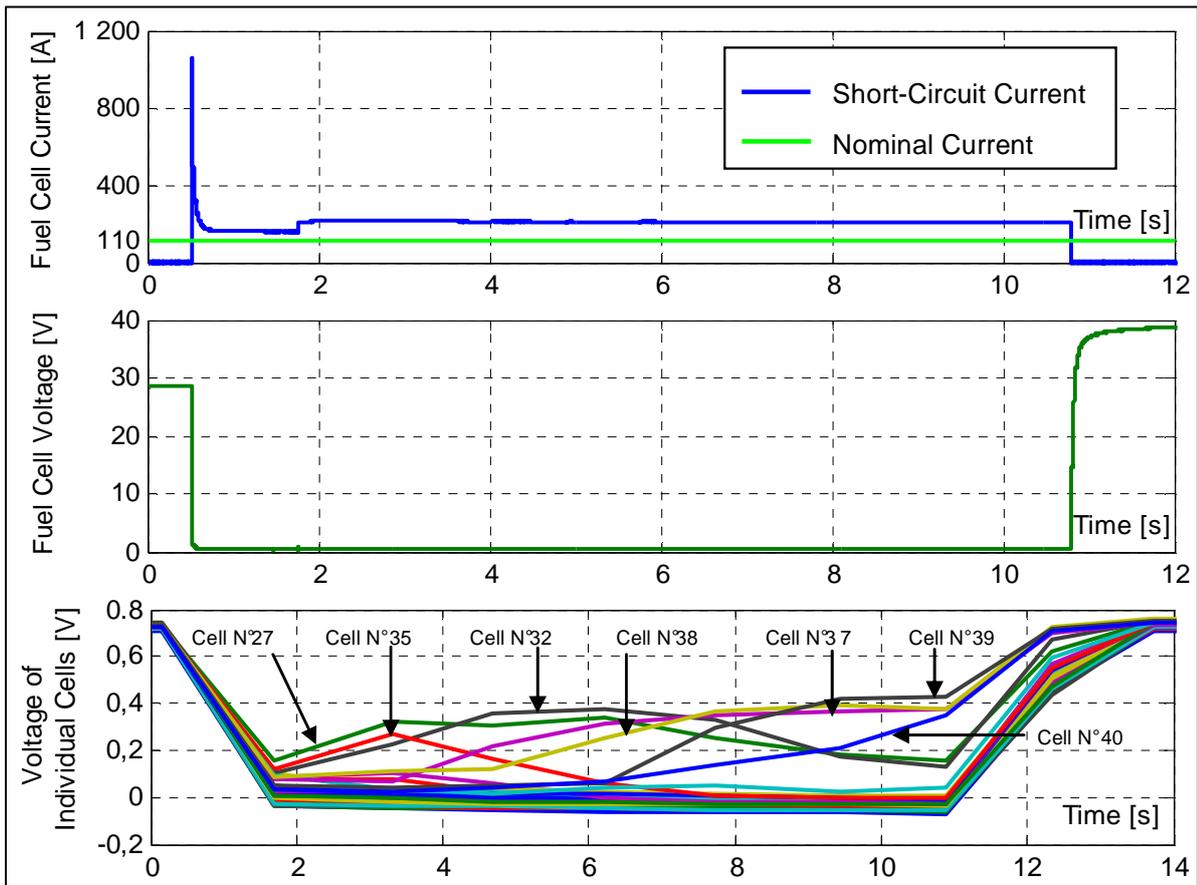
Figura 2.7 – Curva típica da célula a combustível



Fonte: Arsov (2008) – tradução adaptada pelo Autor

O estudo de Sanchez et al. (2016) pondera sobre a eficácia da aplicação de curtos-circuitos em células a combustível, o que é demonstrado na Figura 2.8. Porém, o estudo não conseguiu obter respostas conclusivas e sugere que novas pesquisas devam ocorrer.

Figura 2.8 – Teste de curto-circuito



Fonte: Sanchez et al. (2016)

2.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

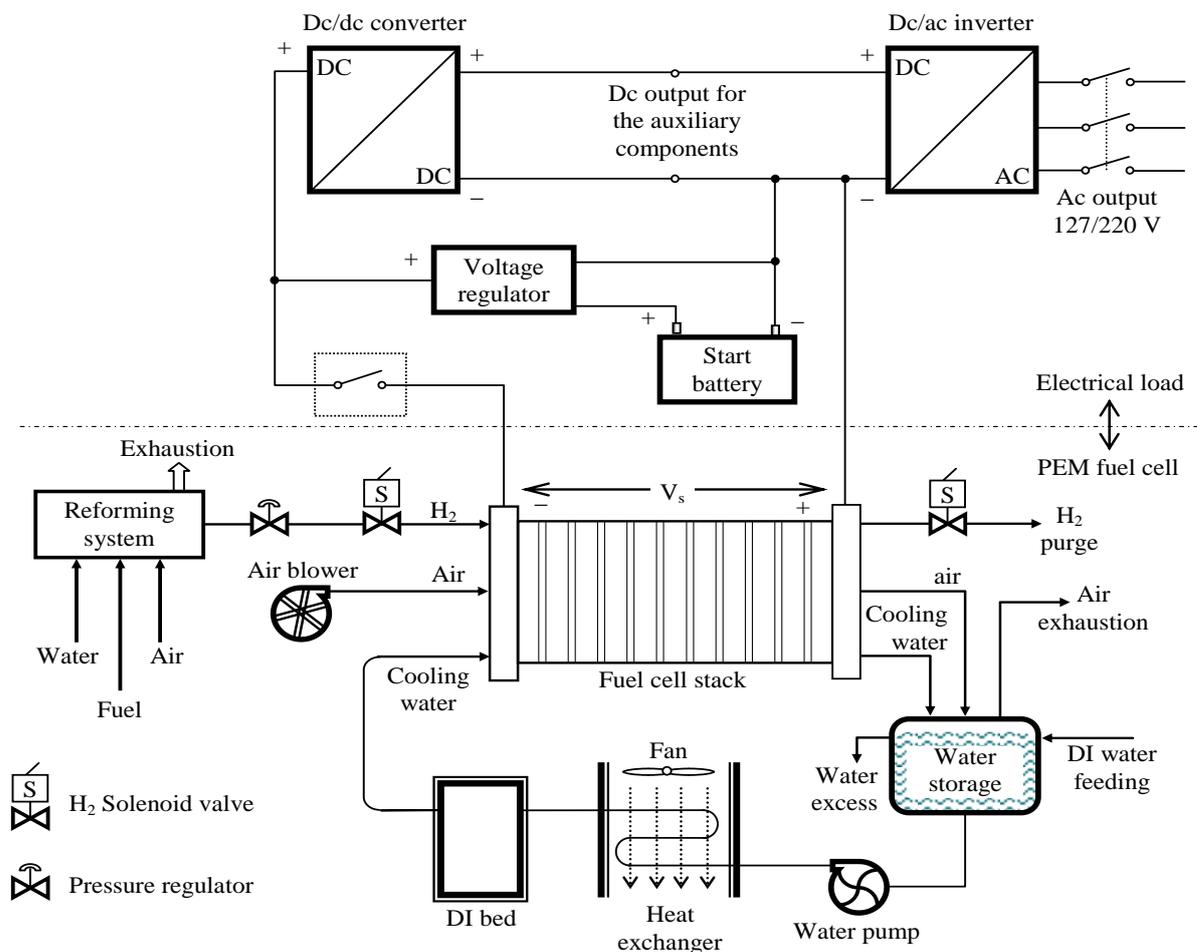
Este capítulo é uma revisão bibliográfica focada em pesquisas que abordam aspectos importantes para aumentar a vida útil das células a combustível dentro de uma pilha, tais como o cuidado que deve ser dispensado ao processo da purga de hidrogênio. Outro tópico aponta para a necessidade de melhorias no padrão de qualidade das membranas, como forma de diminuir as falhas de fabricação e assim prevenir o surgimento prematuro de pontos onde ocorrerá a ruptura da célula. De grande importância é também a possibilidade de se detectar anomalias em células individuais, permitindo a tomada de ações de recuperação ou mesmo para alertar sobre a necessidade de manutenção.

3 TEORIA E SIMULAÇÕES

3.1 CÉLULA A COMBUSTÍVEL

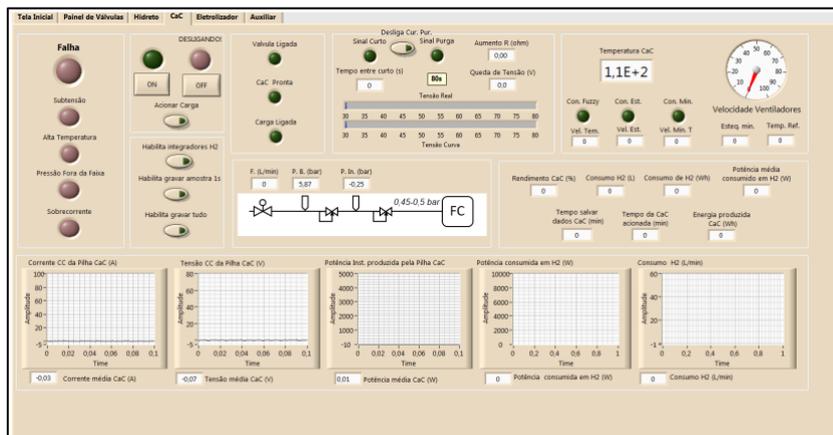
Uma célula a combustível (CaC) produz energia elétrica a partir da reação química entre hidrogênio e oxigênio. Numa célula a combustível do tipo *Proton Exchange Membrane* (PEM), o átomo de hidrogênio é transformado em íon positivo, deixando para trás seu elétron para então atravessar a membrana de passagem dos prótons. Do outro lado da membrana ocorre a reação do próton de hidrogênio com o oxigênio, resultando em calor e água. O elétron perdido pelo hidrogênio também é recuperado, pois este se desloca por um caminho eletricamente condutivo externo, manifestando-se como energia elétrica, o que é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Aplicação prática da CaC para geração de energia elétrica



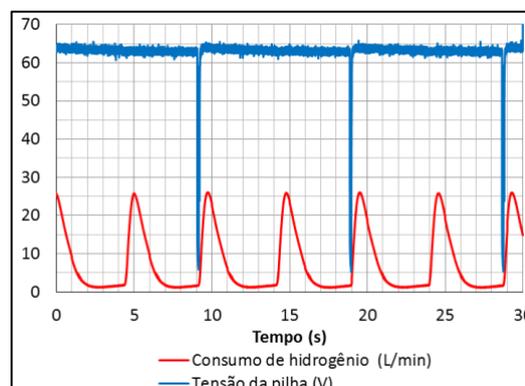
O laboratório H2 do CEESP/UFSM já desenvolveu um software, mostrado na Figura 3.2, para gerenciamento de uma planta geradora de energia elétrica usando hidrogênio numa aplicação para computador PC. Este software pode controlar desde a alimentação do hidrogênio, a geração de curtos-circuitos periódicos nos terminais da pilha de células, como mostra a Figura 3.3, e também o acionamento de cargas resistivas para simulação de consumo da energia gerada. O software pode ainda medir o fluxo do hidrogênio, a temperatura da CaC e a tensão de saída do conjunto da planta.

Figura 3.2 – Software do laboratório H2 do CEESP/UFSM



Fonte: Gonzatti (2017)

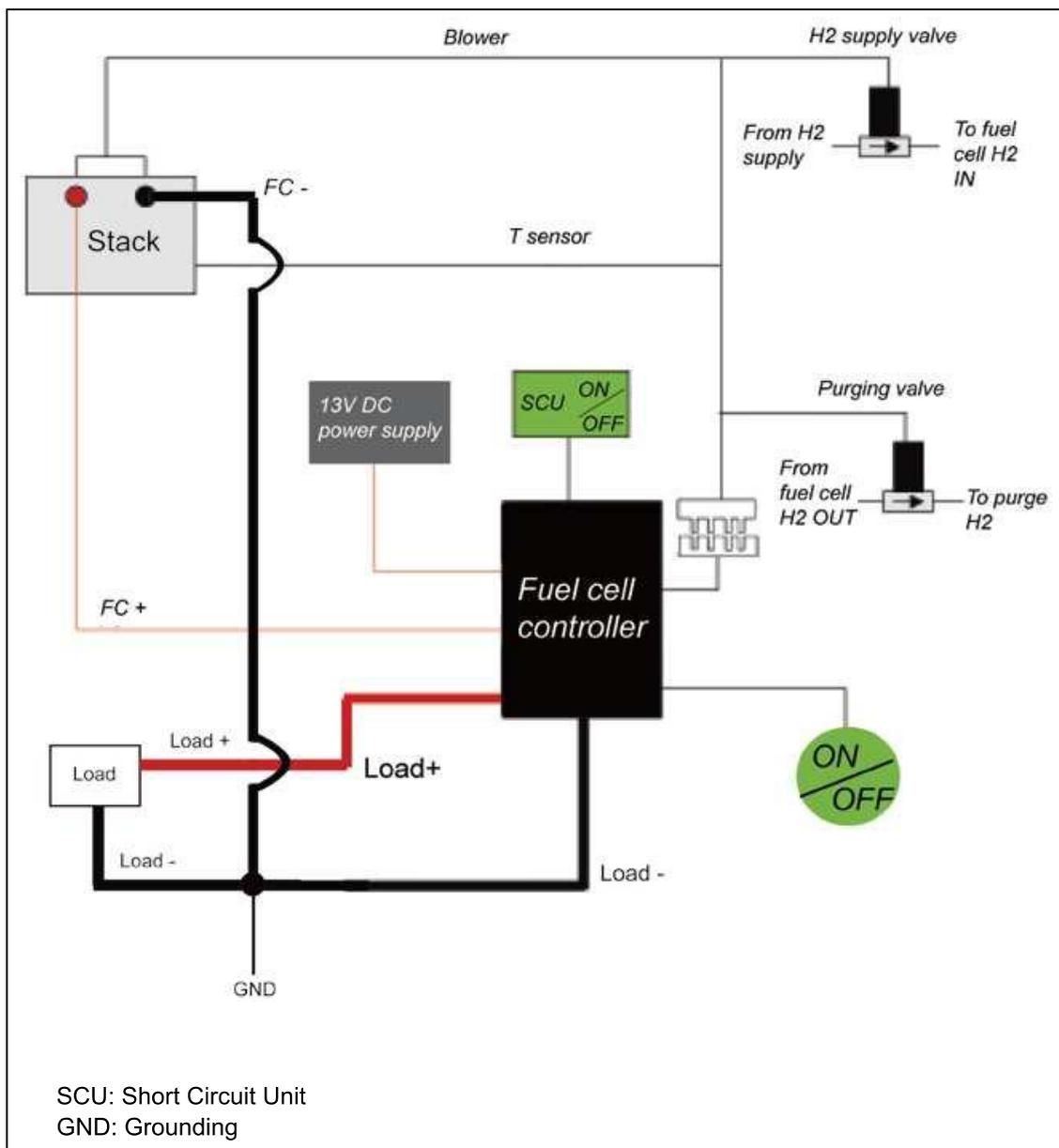
Figura 3.3 – Curtos-circuitos periódicos em testes no Lab. H2 do CEESP/UFSM



Fonte: Gonzatti (2017)

A tensão elétrica gerada pela pilha de células é uma tensão contínua e a Figura 3.4 exemplifica um *setup* de conexões para aproveitamento da energia elétrica gerada, como implementado pelo fabricante Horizon Fuel Cell Technologies (2013).

Figura 3.4 – Diagrama da pilha CaC comercial modelo H-3000



Fonte: Horizon Fuel Cell Technologies (2013)

Para poder alimentar cargas que consomem potência alternada, esta tensão precisaria de um conversor CC-CA. Neste sentido, a geração de qualquer curto-circuito na pilha CaC precisa ter uma alternativa de suprimento de energia para o instante em que ocorra falta de fornecimento de energia pela CaC. Uma alternativa comercial é a utilização de um banco de capacitores, como o da Figura 3.5.

Figura 3.5 – Banco de capacitores da CaC comercial modelo H-3000



Fonte: Autor

O banco de capacitores precisa ter uma capacidade de armazenamento suficiente para fornecimento de energia durante o tempo que a pilha CaC ficar desconectada do inversor CC-CA. Ao se provocar curtos-circuitos em toda a pilha todas as células serão afetadas, o que nem sempre pode ser necessário. De forma ideal, apenas as células que estivessem com deficiência de geração precisariam passar pela tentativa de reabilitação pelo curto-circuito periódico. Logo, uma estratégia mais precisa e eficaz de atuação pode prolongar a vida útil da CaC, o que também contribui para baixar custos, como o de reparo, já que apenas as células que necessitam ser reavivadas terão aplicada a técnica de curto-circuito.

No estudo desta dissertação, a pilha de células a combustível foi modelada utilizando o programa LTSpice, disponível em Analog Devices Inc. (2019). O software LTSpice foi desenvolvido pela empresa Linear Technologies, que agora pertence à Analog Devices e que continua com o desenvolvimento do simulador, incorporando agora também os componentes do portfólio desta empresa.

Obter um modelo da pilha CaC no LTSpice vai permitir a sua simulação em conjunto com um circuito eletrônico para monitoramento individual das tensões nos terminais de cada célula e, caso necessário, também fazer o acionamento de curtos-circuitos individuais por célula.

3.2 MODELAMENTO DA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

A tensão de saída da célula a combustível é definida pela Equação (3.1), obtida de Farret (2018) e Zhan et al. (2014),

$$V_{CaC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{con} - V_{\delta hmico} \quad (3.1)$$

onde

V_{CaC} : tensão de saída da CaC (V);

E_{Nernst} : tensão de Nernst do circuito aberto de uma CaC (V);

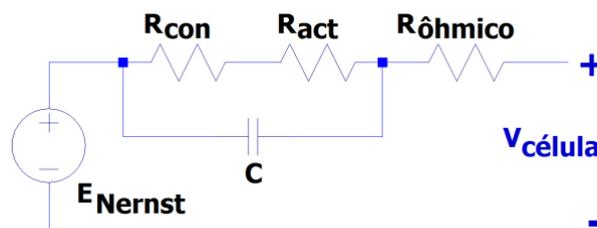
V_{act} : potencial de ativação (V);

$V_{\delta hmico}$: potencial ôhmico (V);

V_{con} : potencial de concentração (V).

A equação (3.1) representa uma célula a combustível com o modelo esquemático ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Modelo da célula a combustível



Um método de descobrir se uma célula PEM está com deficiência de geração é contrastar sua eficiência de operação frente às demais células da pilha. Isto pode ser realizado calculando-se o ponto médio de operação de todas as células (3.2), para depois verificar se alguma célula individual está fora da faixa prevista, usando o cálculo do desvio padrão (3.3), o que permite descobrir a necessidade de tratamento para aquela célula em particular. Tomando como critério considerar que as células que estejam além de uma unidade de desvio padrão, como mostra a Figura 3.7, estão fora da média admissível, pode-se marcá-las para receberem uma ação de recuperação. Neste caso, o software deste projeto inicia o tratamento da célula para tentar recuperar sua capacidade de produção de energia.

A tensão média pode ser calculada usando a média aritmética,

$$V_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.2)$$

onde

V_m : tensão média produzida pela CaC (V);

n : número de células da pilha CaC sendo monitoradas;

V_i : tensão da célula individual (V);

Para uma quantidade finita de amostras para a qual o conjunto contém todas as amostras, o desvio padrão é calculado por,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2} \quad (3.3)$$

onde

σ : desvio padrão da quantidade de amostras monitoradas;

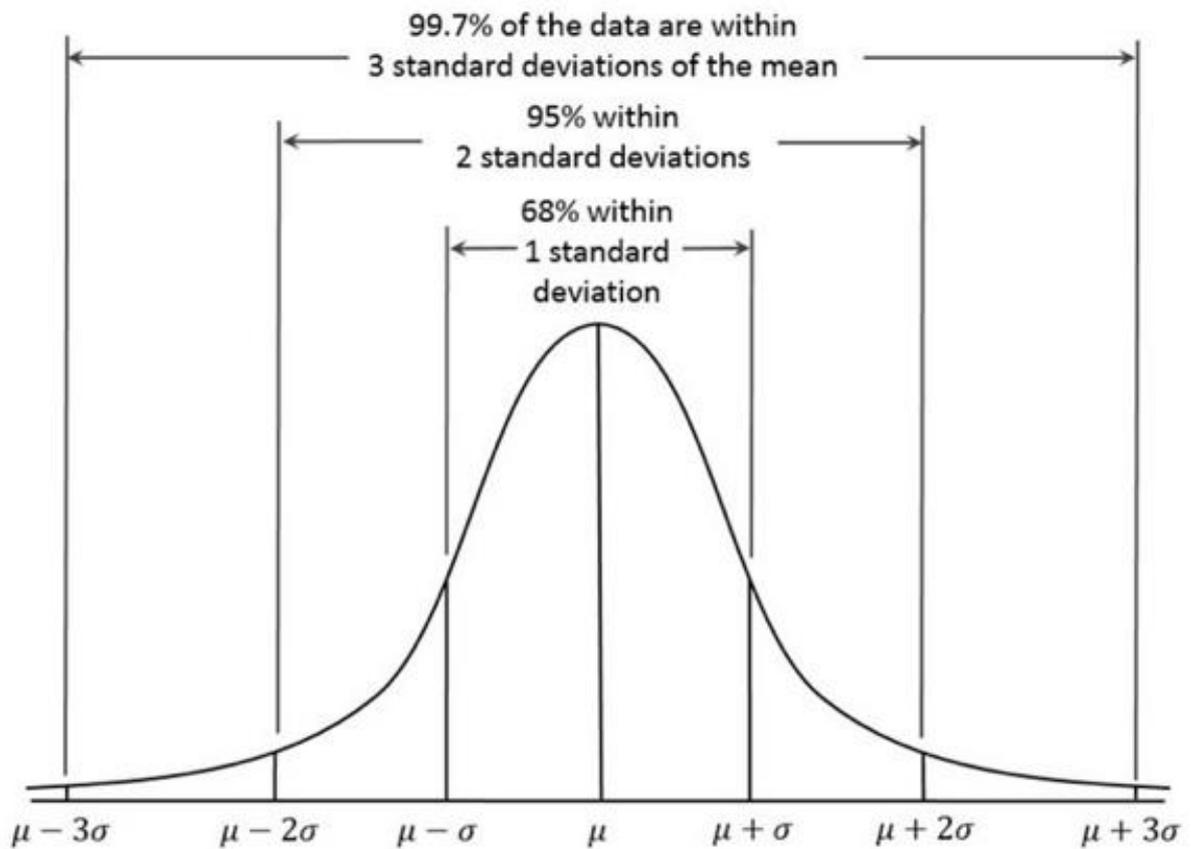
n : número de células da CaC sendo monitoradas;

V_i : tensão da célula individual (V);

V_m : tensão média produzida pela CaC (V);

A Figura 3.7 mostra a forma da distribuição normal e o percentual de inclusão para alguns valores de desvio padrão.

Figura 3.7 – Distribuição normal com bandas de desvio padrão

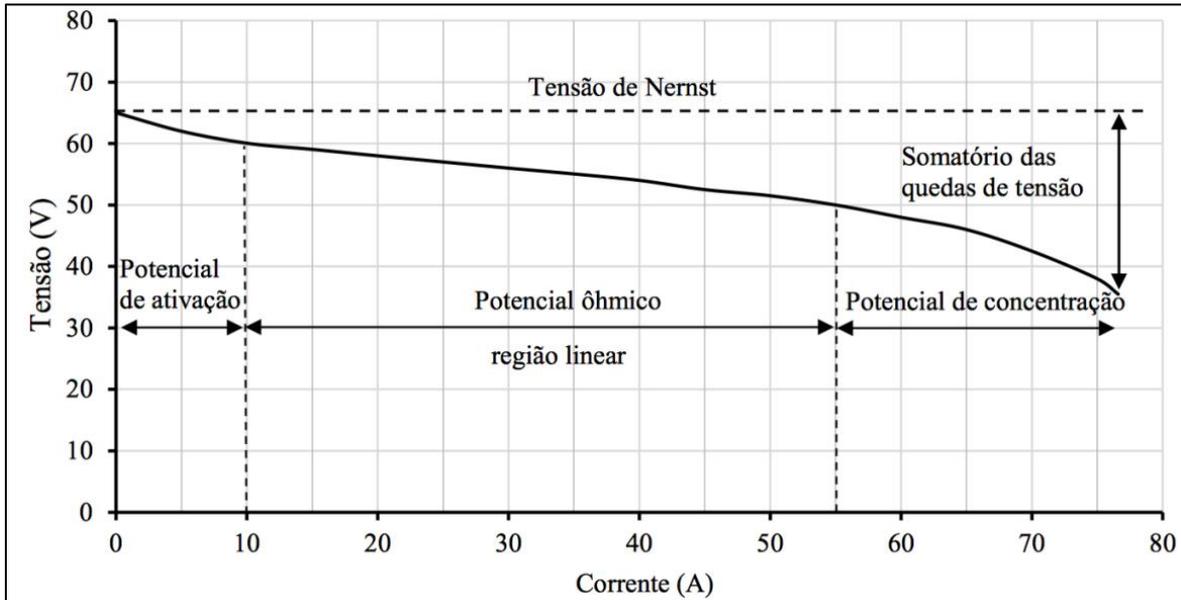


Fonte: Kernler; Kiersz (2014)

3.3 MODELO SIMPLIFICADO DA CÉLULA PEM

Para modelamento da pilha de CaC iniciou-se com uma forma simplificada, procurando montar um modelo para a faixa ôhmica da célula, como mostra a Figura 3.8.

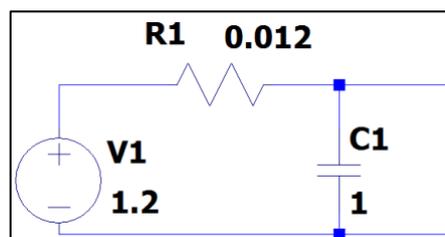
Figura 3.8 – Curva característica da CaC modelo H-3000



Fonte: Adaptada de Horizon Fuel Cell Technologies (2013) citada em Gonzatti (2017) com tradução adaptada pelo Autor

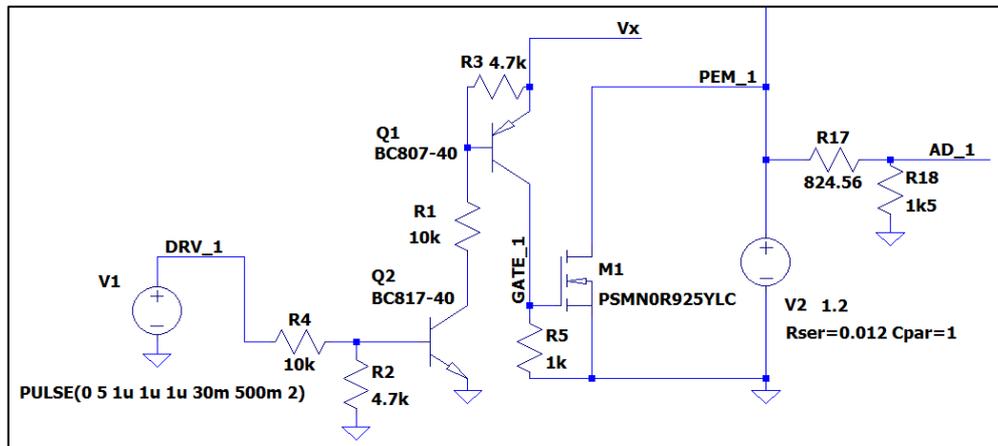
No modelo apresentado na Figura 3.9, existe uma fonte de tensão e um resistor em série, junto com um capacitor em paralelo. Este modelo está incorporado no modelo maior, usado na simulação do circuito, conforme a Figura 3.10. Procurou-se simular também o comportamento capacitivo da célula, pois esta propriedade foi observada durante as medições feitas em células individuais da CaC do laboratório H2 do CEESP/UFSM estando a pilha desligada. O valor do capacitor foi estimado em 1 F por ficar além da faixa máxima de medição do multímetro disponível, modelo Fluke-189, e também usando como referência os valores apresentados em Farret (2018).

Figura 3.9 – Modelo simplificado para uma célula



Fonte: Autor

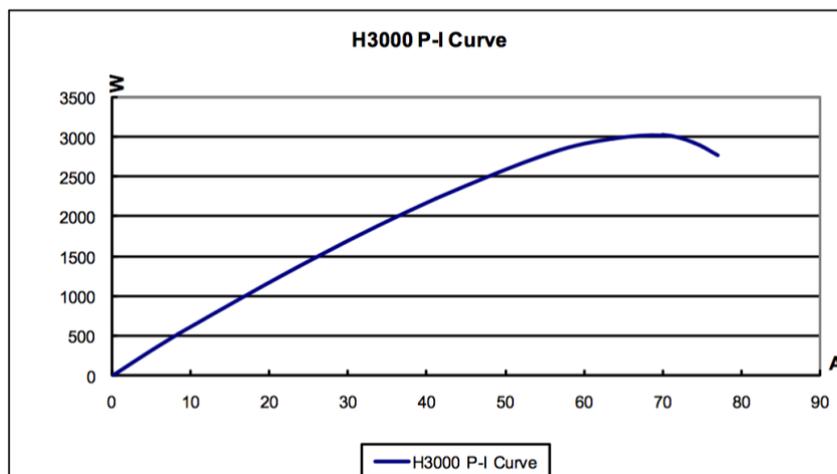
Figura 3.10 – Fonte V2 com modelamento ôhmico



Fonte: Autor

O modelo simplificado da fonte de tensão foi ajustado para o valor da tensão de Nernst, que é a tensão teórica da célula quando não existe consumo de corrente. O valor de R_1 foi calculado dividindo a potência máxima da CaC pela corrente, neste ponto com aproximadamente 60 A, como mostra a Figura 3.11. Como a pilha CaC possui 77 células, R_1 resulta em 12 miliohms. A especificação da CaC consta no Anexo A.

Figura 3.11 – Curva P-I da CaC



Fonte: Horizon Fuel Cell Technologies (2013)

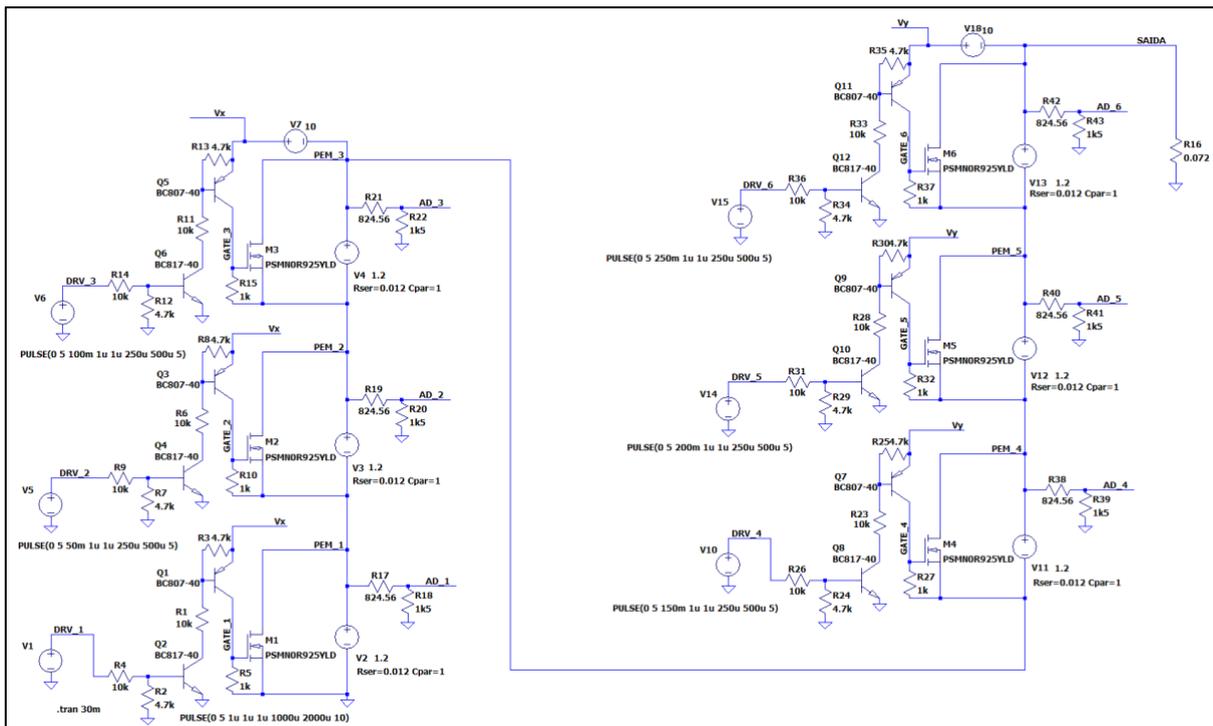
3.4 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito eletrônico é constituído de três blocos básicos:

- Bloco de ligações com o módulo microcontrolado Arduino Mega;
- Bloco de condicionamento para leituras dos sinais analógicos;
- Bloco de acionamento que permite executar curtos-circuitos controlados nas células PEM.

Todas as simulações do circuito eletrônico conectado a pilha de células foram realizadas utilizando o software LTSpice, com um circuito constituído por seis células como mostra a Figura 3.12.

Figura 3.12 – Topologia usada na simulação



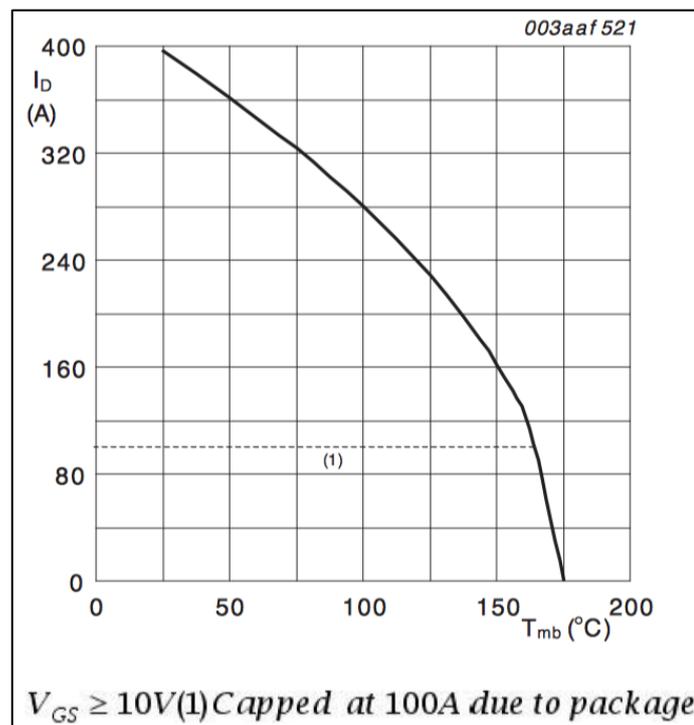
Fonte: Autor

Na primeira fase de projeto do circuito, foi realizada a simulação do bloco de acionamento. Este circuito aceita sinais de comando digitais compatíveis com Arduino, sendo 0 V desligado e 5 V para o acionamento ligado. Foi utilizado um transistor do tipo MOSFET

(PSMN0R9-25YLC) de 25 V e 0,99 miliohms, com capacidade de condução de corrente de 100 A em modo contínuo. Um resumo da especificação foi inserido no Anexo B. Para que o MOSFET ficasse completamente saturado e atingisse a menor resistência ôhmica, foi preciso aplicar uma tensão de 10 V entre os pinos Gate (porta) e Source (fonte) (VGS). Isto exige um circuito de acionamento auxiliar com mais dois transistores para que os sinais de comando do Arduino (0 a 5 V) consigam comandar o MOSFET. Para a definição deste circuito podem ser escolhidas diversas topologias, mas a selecionada foi a que preza pela segurança, mantendo o MOSFET desligado no caso de algum imprevisto, como defeito do processador, ou estado de *reset* perseverante que pode deixar o pino de controle flutuando.

O datasheet do MOSFET informa que este componente pode suportar pulsos durante pequenos intervalos de tempo com uma corrente bem maior do que a corrente nominal. Para isto foi necessário cuidar da dissipação de potência, evitando que a temperatura da junção ultrapassasse 175 °C, como mostra a Figura 3.13. Nesta figura verifica-se que sem uma base para dissipação de calor, a potência máxima no MOSFET não deve ultrapassar 9 W, valor obtido da corrente que foi limitada em 100 A e $R_{DS(on)}$ de 9 miliohms.

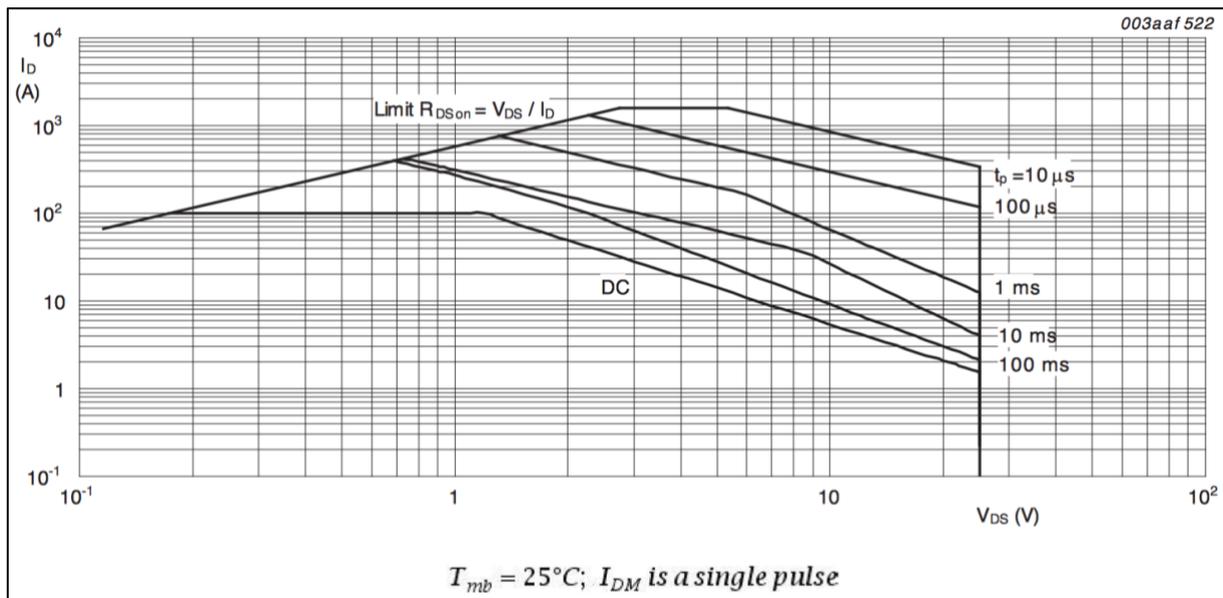
Figura 3.13 – Capacidade de corrente



Outro fator importante a determinar é a largura do pulso de acionamento do MOSFET para ajustar o tempo de acionamento e condução de corrente, como mostra a Figura 3.14.

Para estudar a forma de descarregar a capacitância intrínseca da célula, a simulação dos acionamentos foi dividida em dois grupos principais, um com acionamento lento e outro rápido dos MOSFETs. Entretanto, no teste do protótipo real deverão ser realizados testes com tempo de acionamento progressivo do MOSFET, enquanto é feita a medição da temperatura da superfície do componente. Este procedimento é importante porque o MOSFET vai dissipar calor pela espessa trilha de cobre que forma o contato elétrico com a célula a combustível. A retirada do calor do componente vai permitir que novos pulsos sejam aplicados e a definição da largura final dos pulsos terá que ser obtida por experimentos práticos.

Figura 3.14 – Capacidade de corrente versus largura do pulso



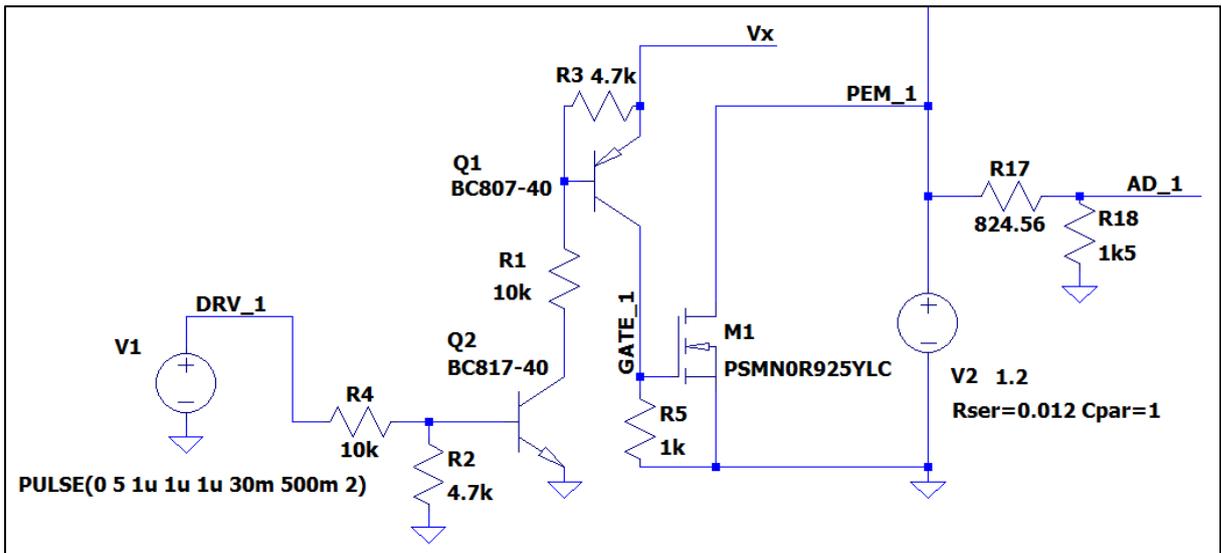
Fonte: Nexperia (2011)

3.4.1 Simulação: chaveamento lento dos MOSFETs

Na simulação dos chaveamentos lentos, como mostra a Figura 3.15, os MOSFETs foram acionados durante um tempo longo, para que a carga capacitiva da célula fosse totalmente

descarregada num único acionamento. Esta simulação é importante para avaliar se a corrente inicial que ocorre quando é feito um curto-circuito representa um problema de dissipação de potência para os MOSFETs. Nesta configuração, a fonte V₁ gera pulsos com 30 ms de duração, que se repetem a cada 500 ms. Estes tempos foram ajustados para estes valores pela observação dos resultados da simulação.

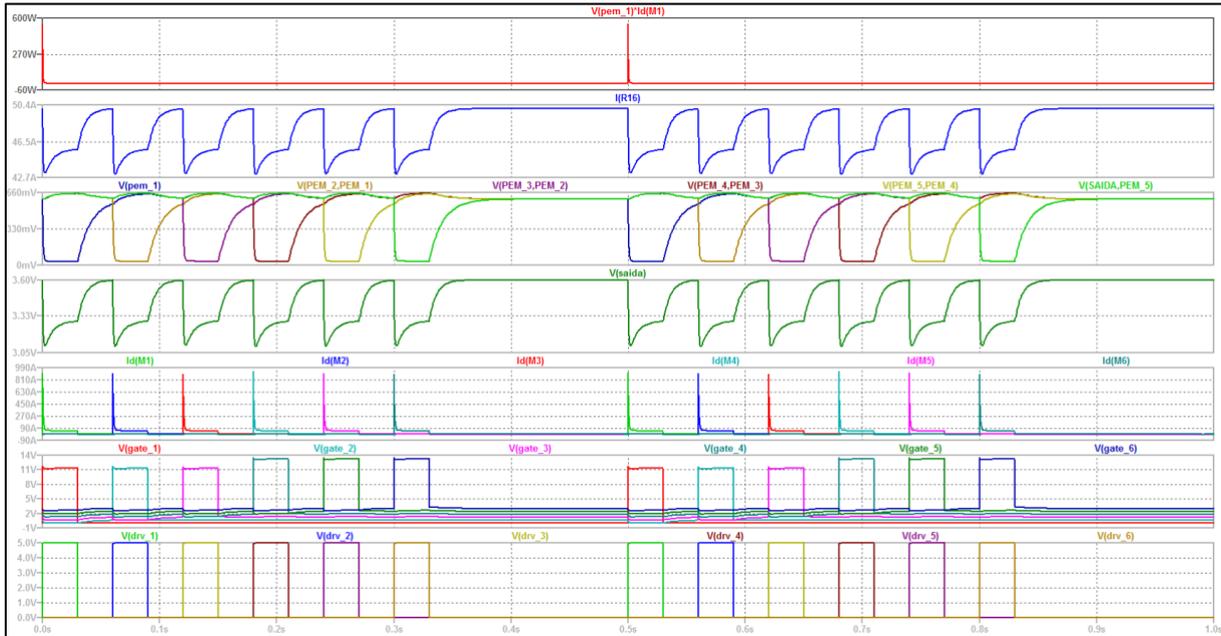
Figura 3.15 – Circuito de acionamento lento



Fonte: Autor

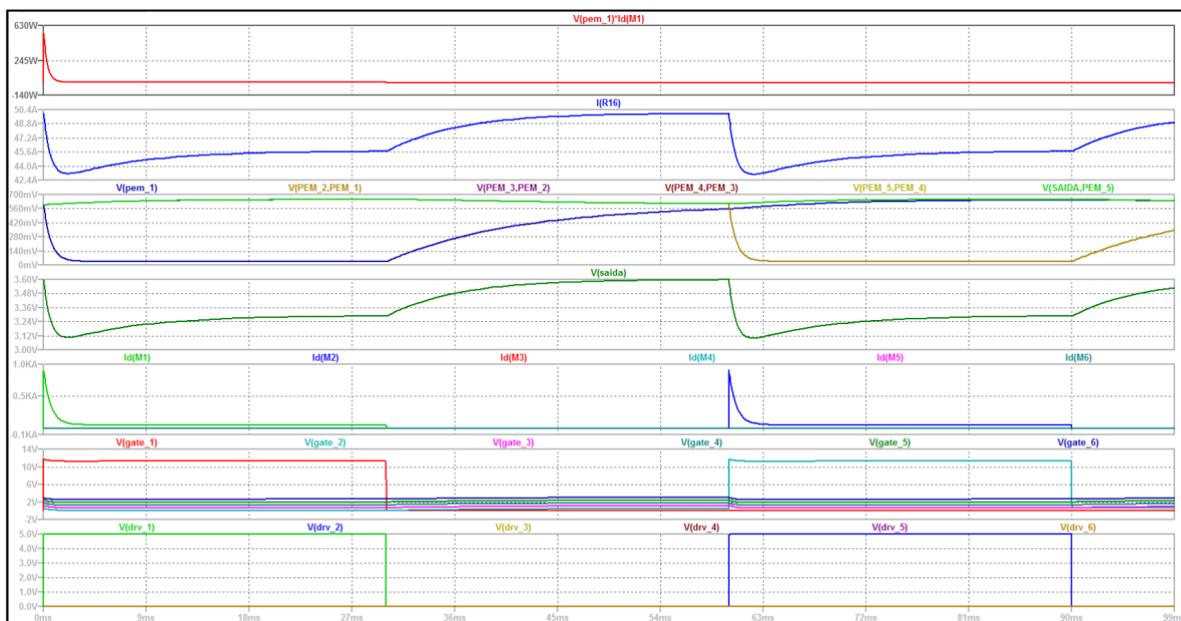
Os resultados obtidos com o acionamento lento dos MOSFETs são mostrados em duas figuras, uma com a visão geral, Figura 3.16, e outra com um recorte ampliando a exibição de detalhes, como mostra a Figura 3.17.

Figura 3.16 – Visão geral do acionamento lento das seis células



Fonte: Autor

Figura 3.17 – Descarga do capacitor no início do acionamento



Fonte: Autor

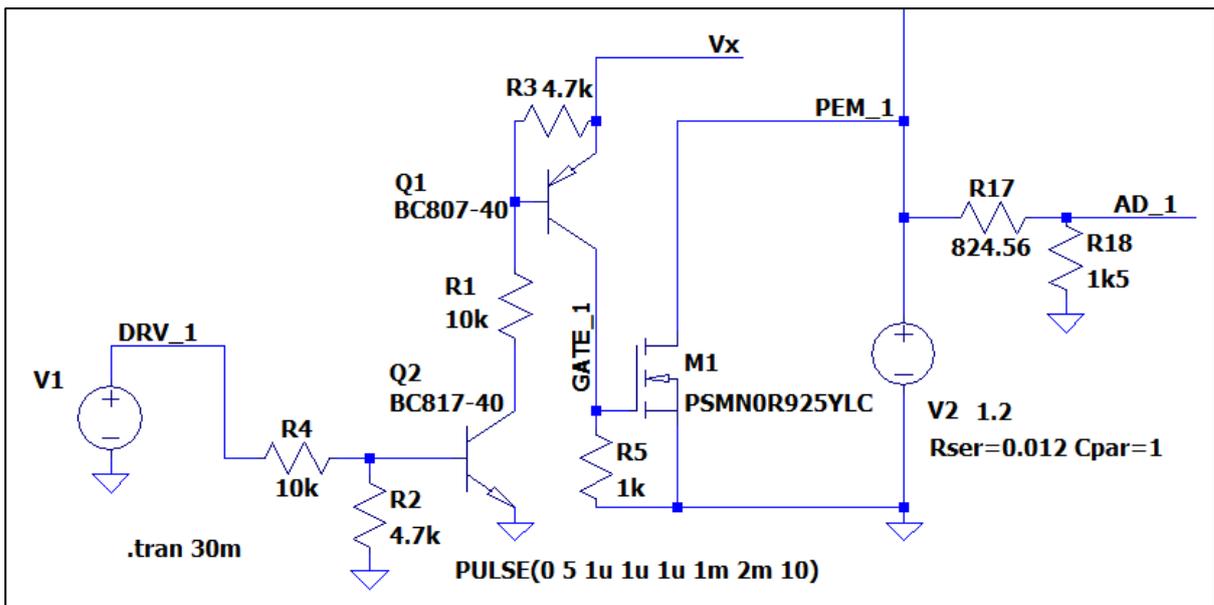
É importante observar que na simulação dos chaveamentos lentos não são consideradas as resistências inerentes aos condutores que existem numa aplicação real, o que naturalmente vai atenuar o pico máximo de corrente mostrado na Figura 3.16 e Figura 3.17. A Figura 3.17

exibe com detalhe ampliado o resultado da simulação mostrando a descarga do capacitor sobre os MOSFETs no início do acionamento para os componentes M1 e M2.

3.4.2 Simulação: chaveamento rápido dos MOSFETs

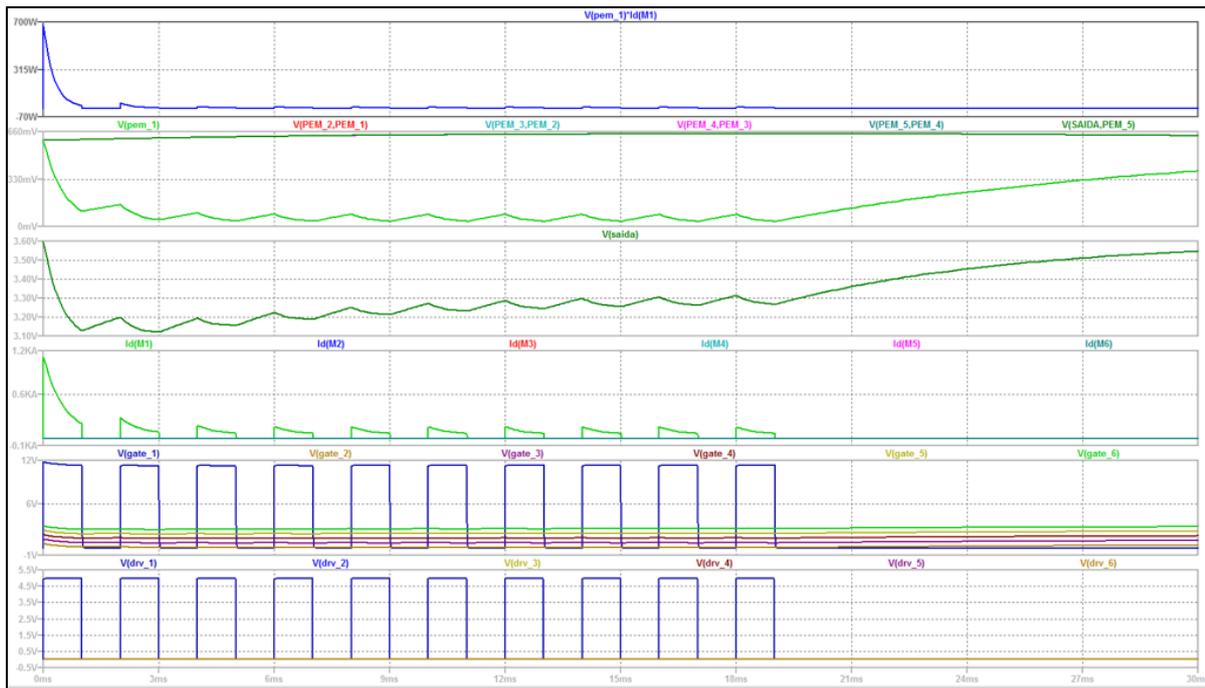
A simulação de chaveamento rápido objetiva verificar se o conjunto de acionamento se comporta bem quando a largura dos pulsos é menor e se é possível controlar a descarga do capacitor intrínseco à cada célula. Durante os chaveamentos rápidos, exibidos na Figura 3.18, os MOSFETs são acionados por períodos curtos de tempo. Dessa forma ocorre o fatiamento do surto inicial de corrente gerado pelo capacitor, como mostra a Figura 3.19, o que permite fracionar a dissipação de potência em intervalos controlados e assim proteger o MOSFET, como pode ser visto na ampliação mostrada na Figura 3.20. A fonte V_1 gera pulsos com duração de 1 ms, que se repetem a cada 2 ms. São produzidos dez pulsos com amplitude de 5 V cada um. Os tempos de subida (*rise time*) e de descida (*fall time*) foram fixados em 1 μ s. Também foi permitido um tempo de retardo (*delay time*) de 1 μ s, meramente para otimização, antes da fonte entrar em operação. A Figura 3.18 mostra o modelo utilizado para simular o acionamento rápido dos MOSFETs.

Figura 3.18 – Circuito de acionamento rápido



A Figura 3.19 apresenta uma visão geral da simulação mostrando a aplicação de dez pulsos acionando curtos-circuitos no MOSFET M1.

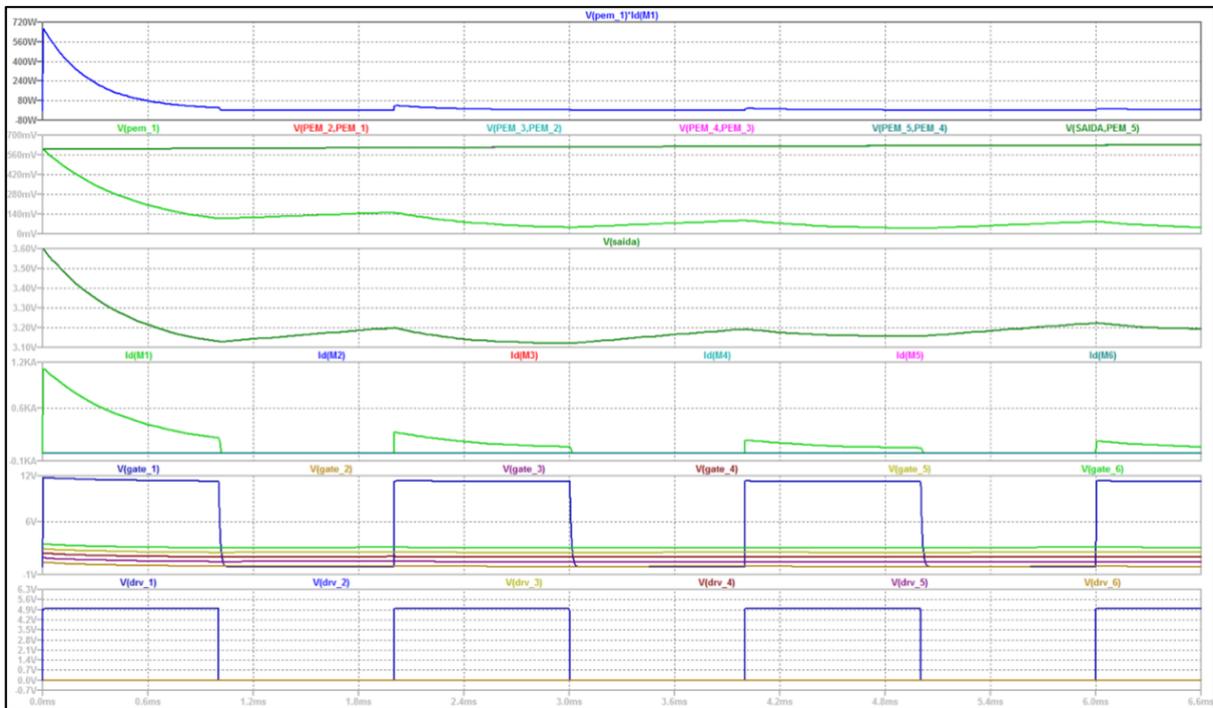
Figura 3.19 – Visão geral do acionamento rápido para uma célula



Fonte: Autor

A Figura 3.20 apresenta em detalhes o procedimento para fatiamento da descarga do capacitor para assim proteger o MOSFET de sofrer danos por sobreaquecimento. Esta figura mostra ainda o acionamento com quatro pulsos do MOSFET M1, onde podemos observar a tensão dos pulsos $V(\text{drv}_1)$, a tensão $V(\text{gate}_1)$ e a corrente de dreno $\text{id}(\text{M1})$. Pode-se observar que a corrente do dreno $\text{id}(\text{M1})$ pode ser fatiada conforme a necessidade de operação. Se o módulo MMACC for instalado numa célula a combustível real novas informações sobre a corrente de descarga poderão ser obtidas, permitindo ajustar a largura do pulso de acionamento dos MOSFETs, principalmente para tratar o comportamento capacitivo que a célula apresenta. Também poderão ocorrer diferenças de comportamento do circuito devido à influência das ligações elétricas das partes que não foram modeladas nesta simulação.

Figura 3.20 – Detalhe ampliado da descarga do capacitor



Fonte: Autor

3.5 MODELO APERFEIÇOADO DE CÉLULAS PEM

A simulação da faixa completa da curva característica I-V da célula PEM para a polarização de ativação, polarização ôhmica e polarização de concentração foi feita utilizando o circuito mostrado na Figura 3.21. Nesta figura também aparecem os componentes que não fazem parte do modelo de células PEM, como o resistor de carga, o MOSFET para acionamento de curto-circuito e sua fonte de geração de pulsos. A seguir são apresentadas as linhas do modelamento, sendo as linhas iniciadas por asteriscos linhas que foram transformadas em comentários:

*Fuel Cell DC sweep

*Nota:

*k = capacidade de corrente = $k \cdot 1_A/cm^2$

*m = numero de celulas

.param k=30

.param m=1

```

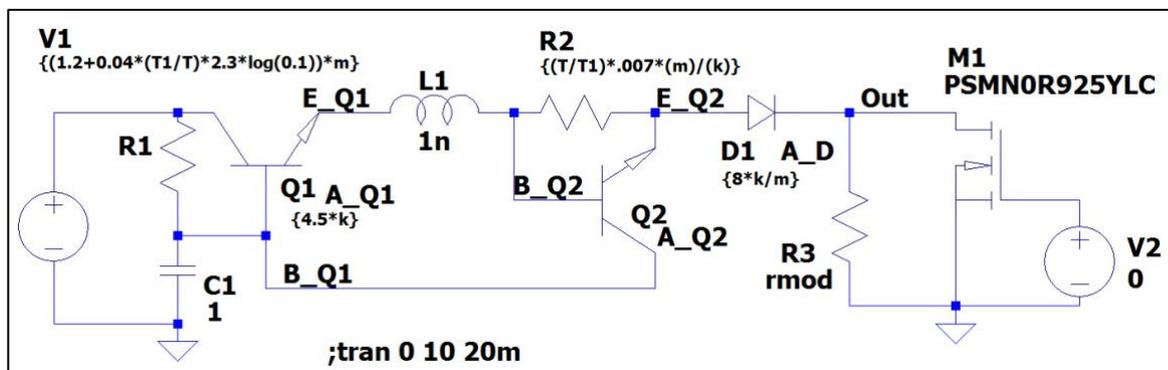
.param T1=353
.param T=353

.model A_Q1 npn(bf={2500} is={(((1/(1+(T-T1)/10))))*(1e-16)} nf={(m/45)*(1+(T-T1)/(T+T1))})
.model A_Q2 npn(bf={2500} is={(((1/(1+(T-T1)/10))))*(1e-16)} nf={(m/45)*(1+(T-T1)/(T+T1))})
.model A_D d(n={2.14*m*(1+(T-T1)/(T+T1))} is={(((1/(1+(T-T1)/10))))*.0006*m} rs={(1+(T-T1) /
(T+T1))*1.05*m/k})

.save V(Out) I(R3)
.model rmod res
.DC LIN res rmod(r) .001 1 .001
.option plotwinsize=0 numdgt=10

```

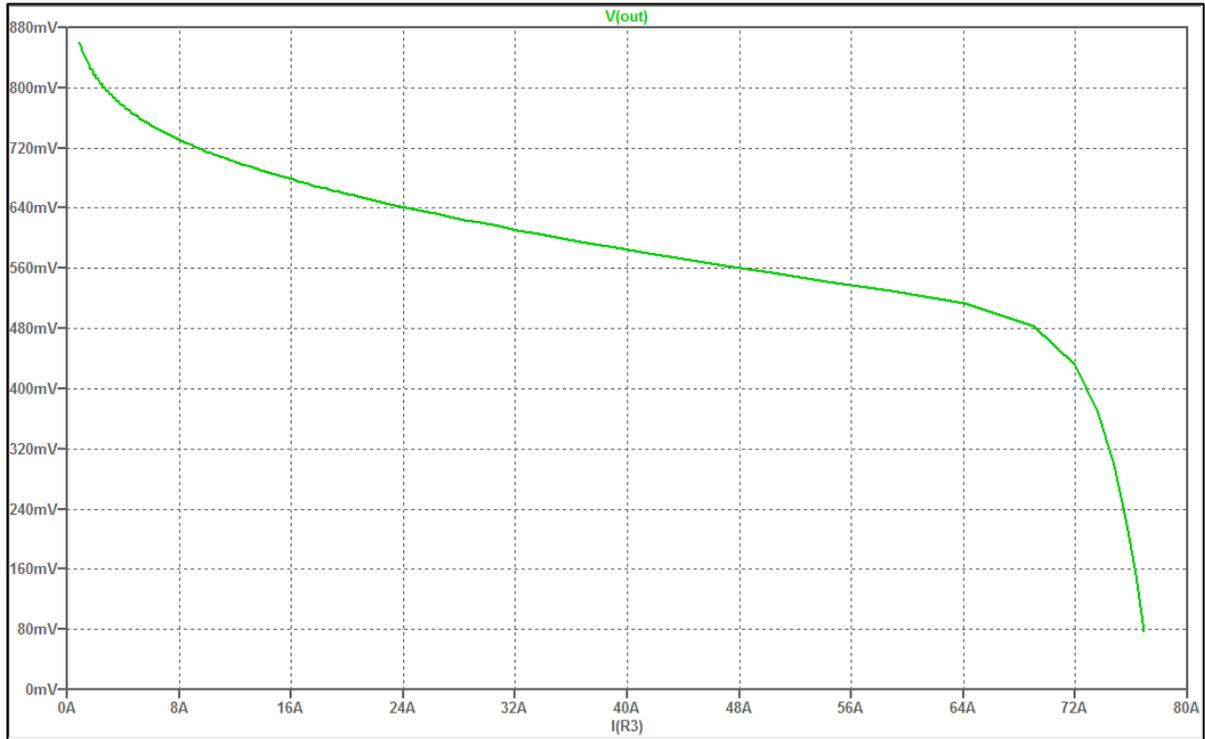
Figura 3.21 – Modelo para simular a curva I-V completa da célula PEM



Fonte: Arsov (2008)

Para obter a curva I-V mostrada na Figura 3.22 foi aplicada uma simulação do tipo DC, variando o resistor de carga r_{mod} .

Figura 3.22 – Simulação da curva I-V para uma célula



Fonte: Autor

3.5.1 Simulação: circuito de leitura da tensão das células individuais

O circuito de leitura da tensão foi projetado para poder fazer leituras nos terminais de cada célula individualmente. O conversor analógico para digital (ADC) utilizado foi o que está incorporado no próprio processador do Arduino, modelo Atmel ATMEGA2560 (a empresa Atmel foi adquirida pela empresa Microchip Technology Inc. (2015)). O ADC deste processador possui 16 canais de entrada podendo fazer conversões com dez bits de resolução e com tempo mínimo de 13 μ s por conversão.

A tensão típica de uma CaC pode ficar em torno de 0,5 V. Isto pode trazer uma dificuldade para o ADC do Arduino, pois para a conversão do sinal analógico em digital, o ADC faz a comparação do sinal de entrada contra uma referência de tensão. Neste componente, existem três referências internas selecionáveis, 1,1 V; 2,56 V e 5 V. Estas, porém, não são muito estáveis e, segundo o *datasheet*, podem ter até 20% de tolerância. Então foi adicionado ao projeto uma fonte de referência externa, com tensão de 2,048 V e 0,1% de tolerância. Este valor de tensão é conveniente porque com 10 bits de resolução do conversor tem-se 1024 valores digitais distintos, onde cada degrau de tensão foi calculado pela equação (3.4)

$$degrau (V) = \frac{V_{ref}}{2^N} = \frac{2,048 V}{1024} = 0,002 V \quad (3.4)$$

onde

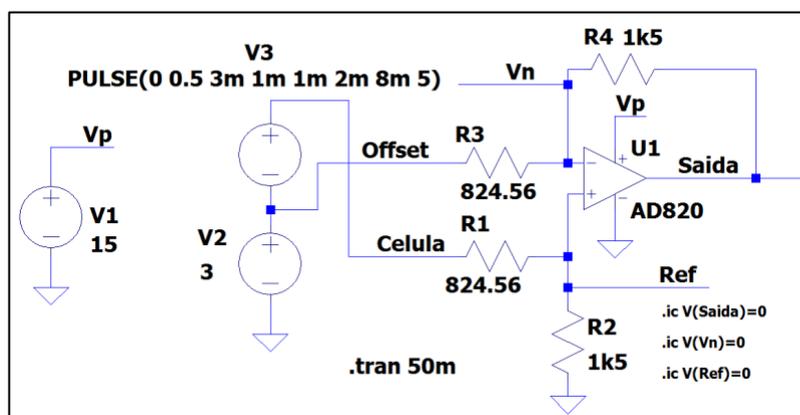
$degrau (V)$: tensão de um passo do ADC em volts;

V_{ref} : tensão de referência (V);

N : número de bits do conversor ADC;

Uma forma conveniente de se fazer a medição de uma pilha de células a combustível é fazer a medição de forma diferencial, pois conforme é medida a tensão das células mais distantes do ponto de zero volts torna-se necessário descontar a tensão de *offset* que aparece. Para fazer a medição diferencial pode ser utilizado um amplificador operacional. Como o ADC do ATMEGA2560 opera apenas com tensões na faixa de 0 a 5 V, a escolha natural do circuito operacional recai num componente que opera com fonte simples. Com isso se evita a possibilidade de pulsos com tensão negativa na entrada do ADC, o que pode inclusive significar a queima do conversor. O componente que foi adquirido para a montagem do protótipo foi o LM358, fabricado por diversas empresas e por isso que não foi incluída a especificação no Anexo B. Porém, para este operacional não existe um modelo no LTSpice e então, depois de confrontado com alguns *datasheets*, foi escolhido o amplificador operacional AD820, disponível no simulador. Este foi o circuito de simulação usado e mostrado na Figura 3.23. A especificação do AD820 pode ser encontrada no Anexo B.

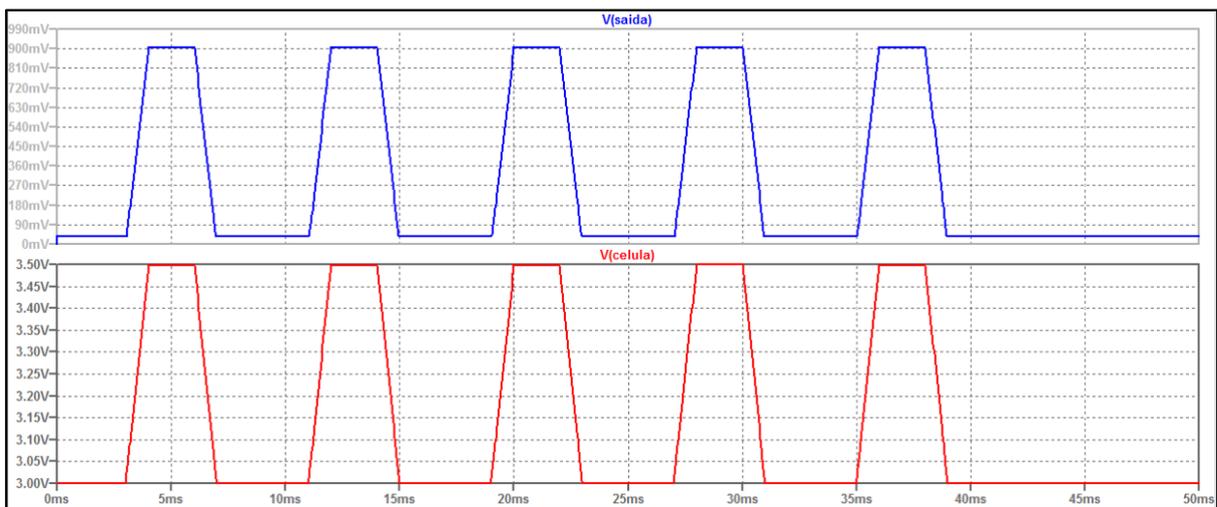
Figura 3.23 – Simulação da leitura diferencial de tensão – AD820



No circuito da Figura 3.23, a fonte V_1 alimenta o circuito. A fonte V_2 simula o deslocamento (offset), ou seja, a distância de uma determinada célula do ponto de zero volts na pilha, o que permite a simulação de tensão em um ponto qualquer. A fonte V_3 simula uma célula individual para a qual se deseja fazer uma medição. O circuito foi projetado para fazer a medição diferencial e para amplificar o sinal, deixando a tensão numa escala mais compatível com a faixa ideal do ADC.

Na construção do protótipo foram utilizados resistores da série E-24 combinando valores que estavam disponíveis no laboratório, já que os circuitos amplificadores necessariamente precisam ser calibrados ao final da montagem. Os fatores de calibração foram registrados no software do microcontrolador, o que torna irrelevante a necessidade de providenciar resistores de valor exato e facilita a montagem. Para ajustar a amplificação de cada circuito amplificador foram associados em paralelo dois resistores, um de $1k\Omega$ e outro de $4k7$, resultando no valor de $824,56\ \Omega$ e deixando o ganho de tensão em 1,82 vezes maior, conforme ilustrado na Figura 3.24.

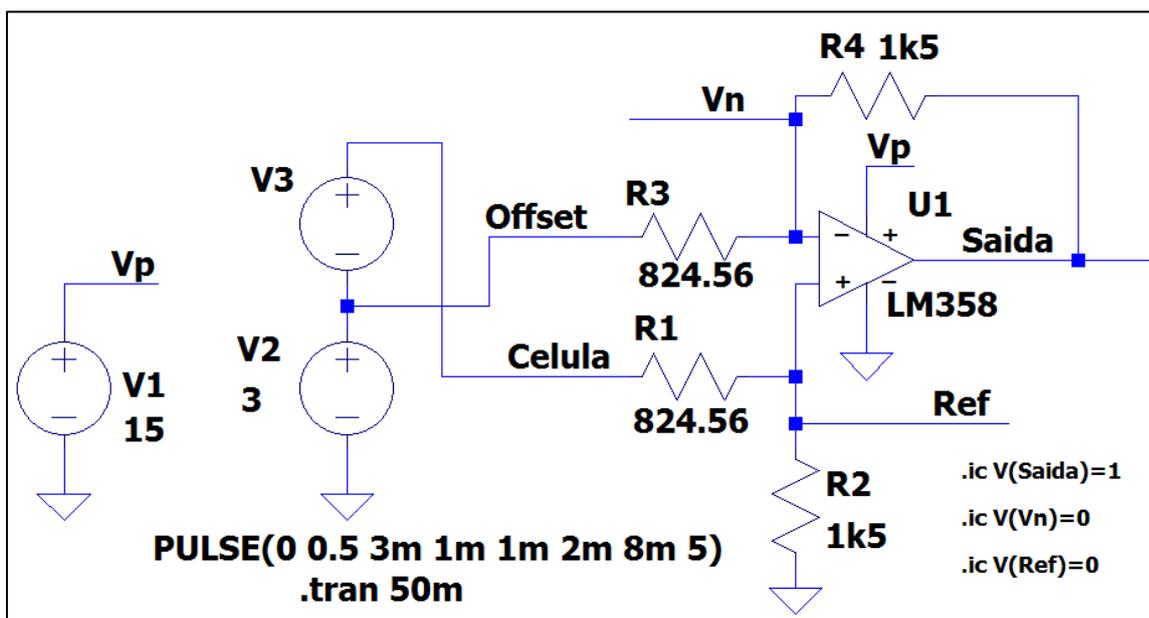
Figura 3.24 – Leitura da tensão de uma célula da pilha - AD820



Fonte: Autor

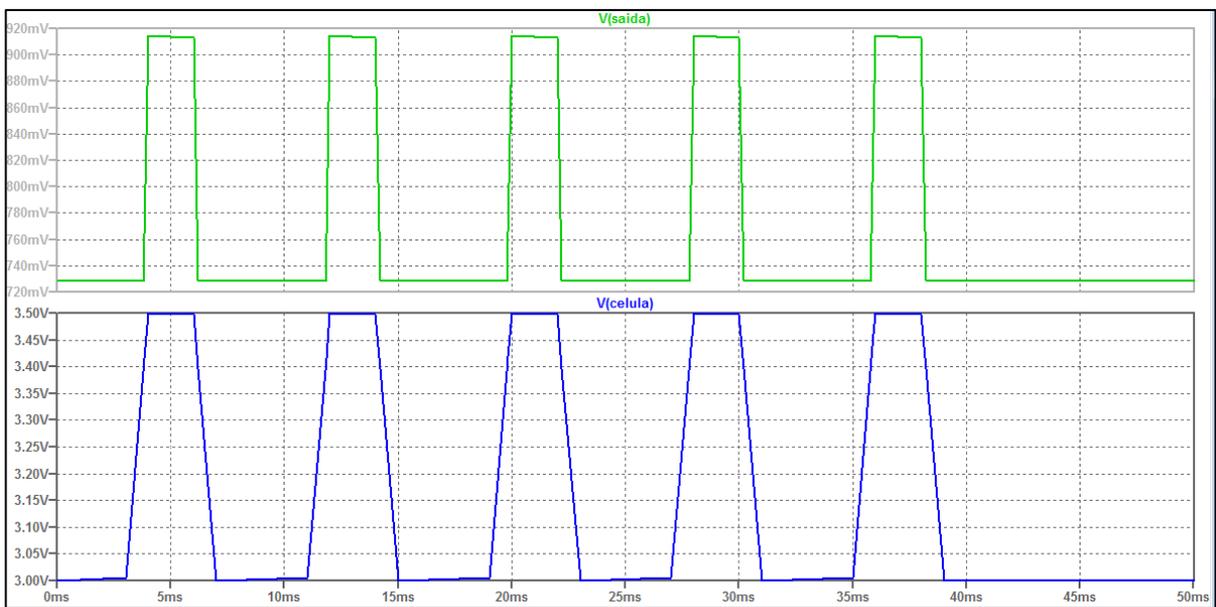
Feita a montagem do protótipo, observou-se que na prática existe uma não linearidade na tensão de saída do amplificador operacional LM358 quando a tensão de modo comum fica acima de zero volts. De volta ao simulador LTSpice, foi pesquisada uma forma de utilizar modelos externos, passando-se a usar o modelo ofertado no site da Texas Instruments (). Com a simulação do circuito contendo o LM358, visualizado na Figura 3.25, pode-se observar esta não linearidade de comportamento também no simulador, quando existir nas entradas uma tensão de modo comum e a fonte de alimentação for única, como mostra a Figura 3.26. Neste caso, mesmo quando a diferença entre as tensões de entrada for zero, a saída continua a apresentar uma tensão de aproximadamente 0,7 V. Este comportamento foi atribuído a algum detalhe de construção interna do chip, pois, quando não existe tensão de modo comum, a saída do LM358 consegue chegar próximo de zero, atingindo cerca de 20 mV mesmo se alimentado com fonte simples. A solução encontrada foi modificar o circuito, como exemplificado na Figura 3.27, incluindo uma pequena fonte negativa, que na simulação foi ajustada para -1 V. Dessa forma, o circuito passou a se comportar da maneira desejada, Figura 3.28. Na aplicação real foi utilizada uma fonte negativa de -5 V, pela praticidade em usar o regulador da tensão negativa LM7905. Incluir a fonte negativa foi uma solução mais rápida de ser implantada e foi a preferida ao invés da compra de outro amplificador operacional.

Figura 3.25 – LM358 alimentado com fonte simples



A Figura 3.26 mostra um problema de offset que aparece quando o LM358 é simulado com alimentação de fonte simples. Esta característica também apareceu durante a montagem do protótipo.

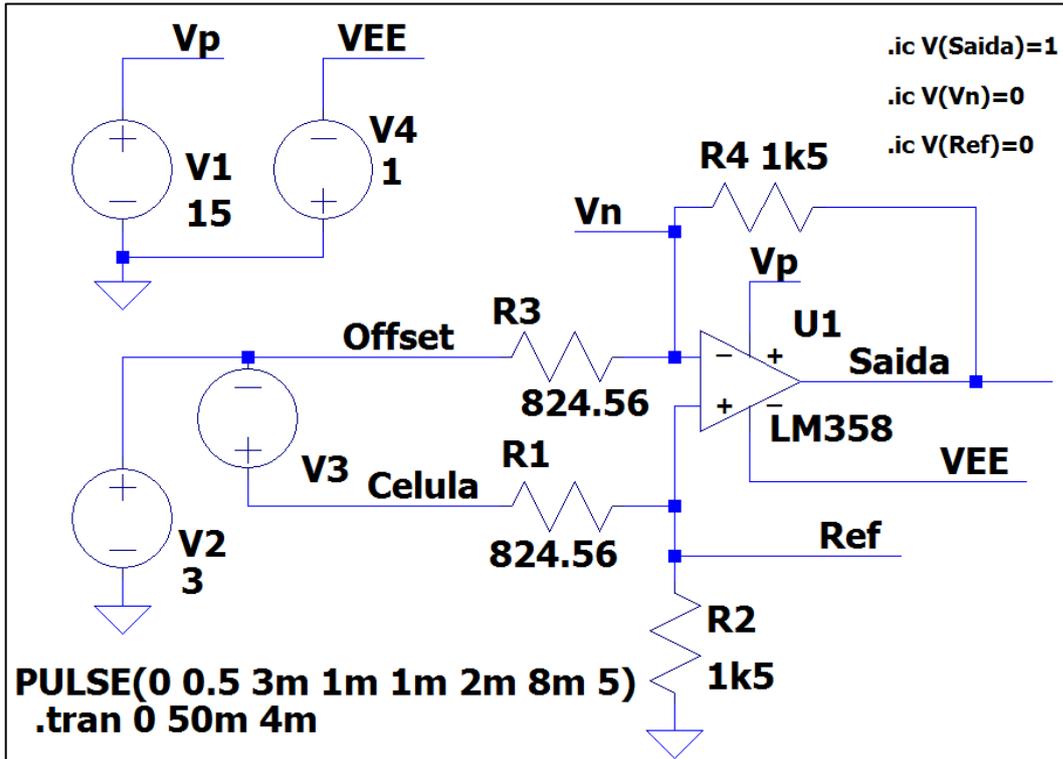
Figura 3.26 – Simulação do LM358 alimentado com fonte simples



Fonte: Autor

A Figura 3.27 mostra o circuito que inclui uma pequena fonte negativa para resolver um problema de offset que aparece com o funcionamento do LM358.

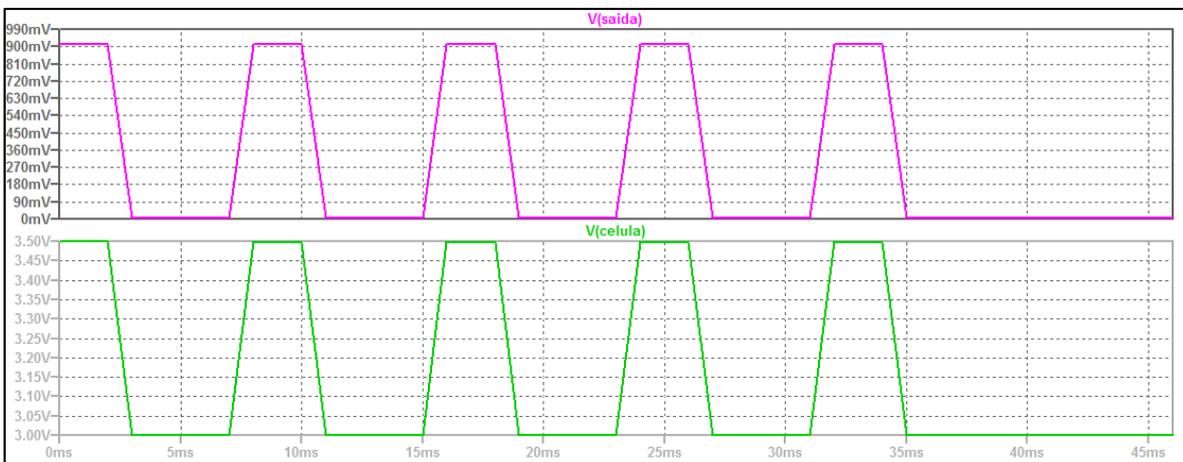
Figura 3.27 – Circuito LM358 com fonte positiva e negativa



Fonte: Autor

A Figura 3.28 mostra a tensão de funcionamento correto do circuito de leitura de tensão com uma subtração de offset usando o LM358 alimentado com fonte dupla.

Figura 3.28 – Simulação do LM358 alimentado com fonte positiva e negativa



Fonte: Autor

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta os resultados da simulação do circuito para aplicação de curtos-circuitos controlados em células a combustível. Foram considerados dois modelos de simulação no protótipo usado da célula a combustível, sendo um simplificado e outro mais completo. Também foi realizada uma simulação para diminuir os surtos de dissipação de potência que os MOSFETs podem sofrer devido ao comportamento capacitivo da célula a combustível.

Os resultados encontrados com as simulações apontam para a viabilidade em desenvolver um projeto eletrônico que possa operar sobre uma célula a combustível real, permitindo fazer a leitura das grandezas elétricas necessárias e também atuar sobre células que necessitem de recuperação do seu desempenho.

4 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA E RESULTADOS

4.1 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

A planta FC geradora de eletricidade usada no laboratório usou uma pilha de células a combustível alimentada por hidrogênio, como mostra a Figura 4.1 e em detalhes na Figura 4.2. Esta pilha de CaC é formada por um conjunto de células individuais, do tipo Proton Exchange Membrane (PEM). Outros detalhes dos equipamentos do laboratório podem ser encontrados no anexo COMPONENTES DO LABORATÓRIO H2 – CEESP/UFMS.

Figura 4.1 – Laboratório H2 - CEESP UFMS

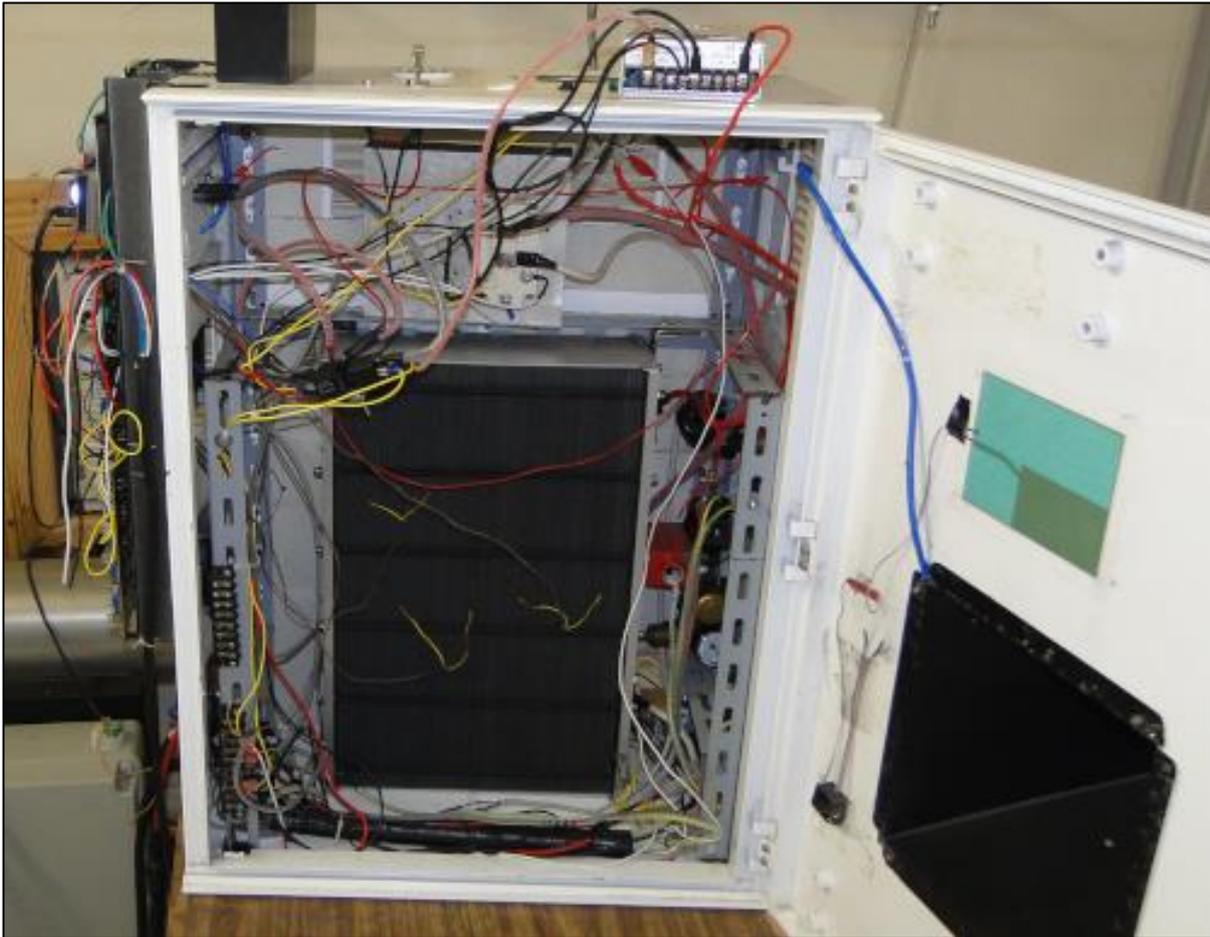


Fonte: Autor

Para esta dissertação foi projetado um Módulo de Monitoramento e Aplicação de Curtos-circuitos Controlados (MMAACC) que amplia a capacidade de gerenciamento de um laboratório H2 qualquer, permitindo o monitoramento individual das células PEM. Em caso de necessidade, o MMAACC também permite atuar sobre células individuais efetuando periodicamente curtos-circuitos com a finalidade de reativar o melhor rendimento de células.

A pilha de CaC utilizada, como mostra a Figura 4.2, possui 77 células PEM conectadas em série com 78 contatos externos que permitem serem todos conectados a diversas unidades MMACC.

Figura 4.2 – CaC do Laboratório H2 do CEESP/UFSM



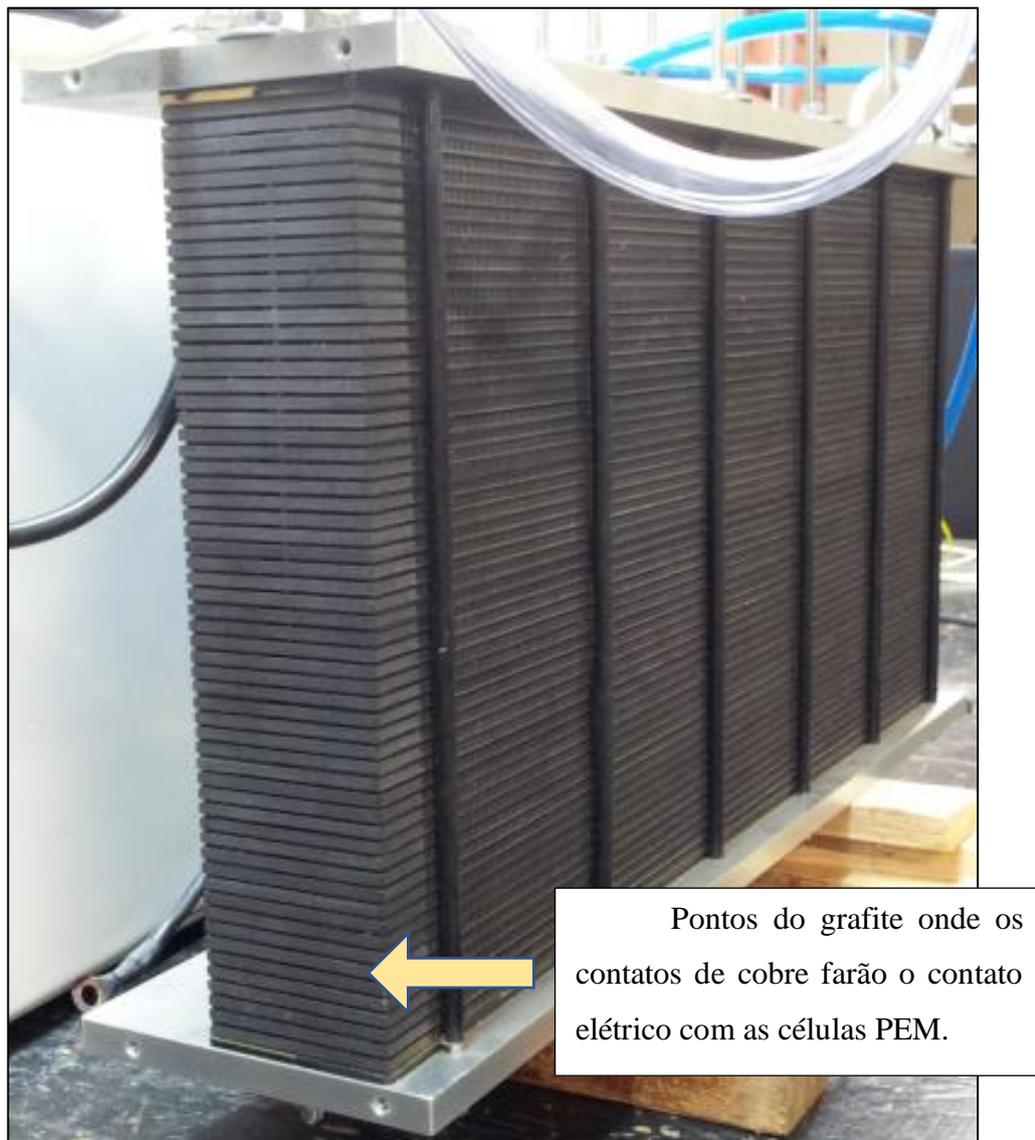
Fonte: Autor

Um protótipo de unidade de controle MMACC para gerenciar 13 células PEM com 14 contatos de cobre que se conectam às placas de grafite da pilha CaC é mostrado na Figura 4.3.

O protótipo usado para os testes práticos desta dissertação foi dimensionado para ter uma escalabilidade aceitável e permitir expansão futura, alocando outros módulos de controle na CaC numa disposição paralela, até que se complete a gerência de todas as células PEM.

A descrição do projeto do circuito eletrônico, desenhado no software KiCad (2019), detalhes do dimensionamento mecânico, a montagem e a listagem do software estão descritos nos apêndices PROJETO ELETRÔNICO, DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DO MMACC e FONTE DO SOFTWARE.

Figura 4.3 – Ponto de conexão do MMACC

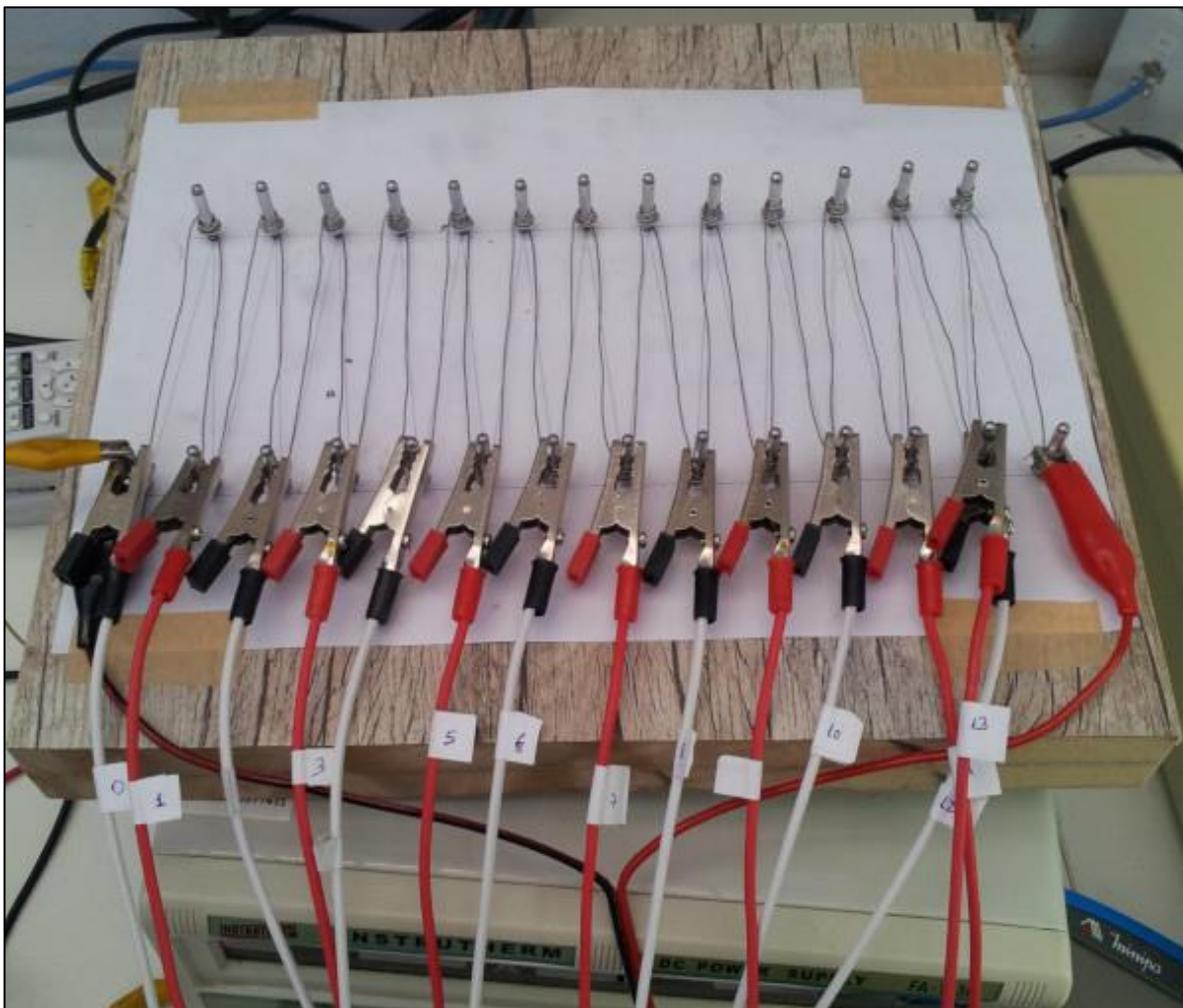


Fonte: Autor

4.2 SOFTWARE, TESTES E RESULTADOS

Com o desenvolvimento do software e a calibração do MMACC foi possível a construção de um módulo divisor de tensões que simula uma pilha de células PEM atuando na sua região ôhmica, como pode ser observado na Figura 4.4. Nas extremidades deste módulo é aplicada uma tensão conhecida gerada por uma fonte de alimentação. A tensão da fonte fica dividida em intervalos pela associação em série dos resistores. Para isso foi utilizado um fio de níquel-cromo com 5 ohms/metro. Como mostra a Figura 4.4, entre cada par de garras-jacaré, preto e vermelho, existe cerca de 1 ohm. Os degraus (*steps*) de tensão foram medidos com o multímetro de referência disponível, Fluke-189, o que permitiu a construção de uma tabela no software do MMACC e diminuir ao máximo erros de medição.

Figura 4.4 – Módulo simulador da pilha PEM – região ôhmica



A Tabela 4.1 resume o processo de calibração do módulo divisor de tensões usado no laboratório. O divisor de tensão foi conectado a uma fonte DC calibrada para gerar cerca de 0,5 V em cada passo. Nesta etapa, o MMACC fez a leitura das tensões de todas as entradas e, em paralelo, também foi feita a medição com o multímetro Fluke-189. Em seguida, usando uma planilha, foi calculado o erro de cada entrada, como pode ser visto na coluna “Cálculo do erro” da Tabela 4.1. Esta informação de erro foi inserida numa tabela de multiplicação do software para que novas leituras de tensão pudessem ter o valor corrigido, como exemplificado a seguir numa linha de definição do software:

```
const float ADC_Val_Calibration[ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS] = {1.0,
1.014316, 1.007096, 1.014545, 1.003631, 1.031009, 1.027400, 0.996924, 0.941429, 1.005980,
0.994455, 0.969537, 0.971250, 0.996004, 1.0, 1.0};
```

Tabela 4.1 – Cálculo do erro de leitura

Entrada Analógica	Valor ADC	Tipo	Valor sem calibração (V)	Medição Fluke 189 (V)	Ponteiras Jacaré	Cálculo do erro
CEL_ADC1	494	CEL (V)	0,54332161	0,5511	0-1	1,0143160
CEL_ADC2	429	CEL (V)	0,47224894	0,4756	1-2	1,0070960
CEL_ADC3	430	CEL (V)	0,47302002	0,4799	2-3	1,0145450
CEL_ADC4	504	CEL (V)	0,55438709	0,5564	3-4	1,0036310
CEL_ADC5	404	CEL (V)	0,44441891	0,4582	4-5	1,0310090
CEL_ADC6	467	CEL (V)	0,51372397	0,5278	5-6	1,0274000
CEL_ADC7	420	CEL (V)	0,46202123	0,4606	6-7	0,9969240
CEL_ADC8	495	CEL (V)	0,54481030	0,5129	7-8	0,9414290
CEL_ADC9	420	CEL (V)	0,46203679	0,4648	8-9	1,0059800
CEL_ADC10	413	CEL (V)	0,45431906	0,4518	9-10	0,9944550
CEL_ADC11	505	CEL (V)	0,55531681	0,5384	10-11	0,9695370
CEL_ADC12	485	CEL (V)	0,53405404	0,5187	11-12	0,9712500
CEL_ADC13	460	CEL (V)	0,50602198	0,5040	12-13	0,9960040

Fonte: Autor

Na Tabela 4.2 pode-se observar a efetividade da correção do erro de leitura com base na tabela de correção que foi inserida no software. Como critério de aceitabilidade da calibração, foi especificado que o erro deveria ficar abaixo de 10 mV. Este valor comparado

com a tensão máxima de entrada do ADC (2V) fica dentro de 0,5%, o que pode ser aceito, pois a tensão de referência do ADC tem tolerância de 0,1%. Os valores mostrados na tabela não foram truncados e nem todos os dígitos são significativos.

Tabela 4.2 – Remoção do erro de leitura

Entrada Analógica	Valor ADC	Tipo	Valor com calibração (V)	Medição Fluke 189 (V)	Ponteiras Jacaré	Erro (V)
CEL_ADC1	433	CEL (V)	0,48313922	0,4809	0-1	-0,0022392
CEL_ADC2	399	CEL (V)	0,44203329	0,4414	1-2	-0,0006333
CEL_ADC3	385	CEL (V)	0,43022680	0,4298	2-3	-0,0004268
CEL_ADC4	463	CEL (V)	0,51117110	0,5113	3-4	0,0001289
CEL_ADC5	390	CEL (V)	0,44288790	0,4405	4-5	-0,0023879
CEL_ADC6	418	CEL (V)	0,47255987	0,4729	5-6	0,0003401
CEL_ADC7	394	CEL (V)	0,43208629	0,4318	6-7	-0,0002863
CEL_ADC8	447	CEL (V)	0,46292037	0,4638	7-8	0,0008796
CEL_ADC9	387	CEL (V)	0,42825517	0,4252	8-9	-0,0030552
CEL_ADC10	384	CEL (V)	0,42007566	0,4197	9-10	-0,0003757
CEL_ADC11	451	CEL (V)	0,48100781	0,4803	10-11	-0,0007078
CEL_ADC12	449	CEL (V)	0,47972077	0,4787	11-12	-0,0010208
CEL_ADC13	413	CEL (V)	0,45250386	0,4509	12-13	-0,0016039

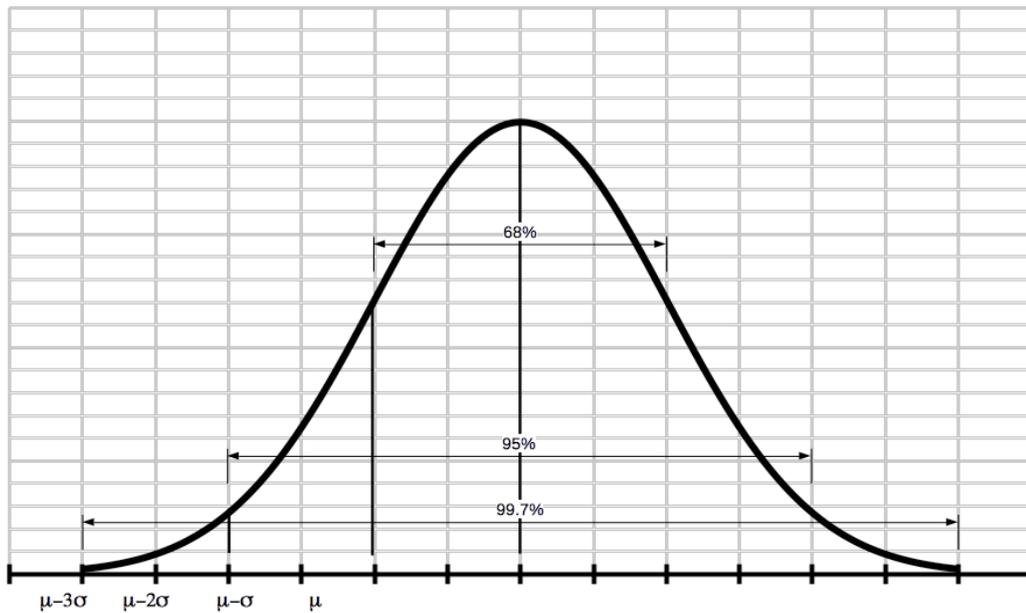
Fonte: Autor

A Tabela 4.3 ilustra o comportamento do software na análise de cada célula. Duas formas de atuação foram previstas conforme o distanciamento da tensão da célula em relação ao desvio padrão, calculado pela equação (3.3). Apenas células que estavam abaixo da tensão média necessitavam de ação corretiva, como mostra a Figura 4.5. As que estão acima da curva do desvio padrão têm desempenho muito bom e não necessitam de atenção, sendo consideradas células aceitáveis.

Uma célula boa é marcada com um identificador que designa uma ação do tipo 10 e, neste caso, não é necessária nenhuma intervenção. Quando o identificador calculado for do tipo 20, a célula receberá uma tentativa de recuperação branda, passando a receber curtos-circuitos de curta duração. Se deste momento em diante a célula passar a se recuperar, voltará a receber o identificador do tipo 10. Por outro lado, se continuar se degradando no desempenho, poderá receber o identificador de ação tipo 100, passando a receber pulsos de curtos-circuitos com duração maior. Logo, células marcadas com a ação tipo 100 passarão por uma tentativa de

recuperação mais aprofundada. No caso de uma célula ter sofrido dano permanente a ação poderia ser marcada como tipo zero, caracterizando o abandono. Entretanto, neste projeto, esta estratégia não foi adotada e o software está programado para sempre continuar fazendo tentativas de recuperação.

Figura 4.5 – Desvio padrão adaptado ao projeto



Fonte: Autor

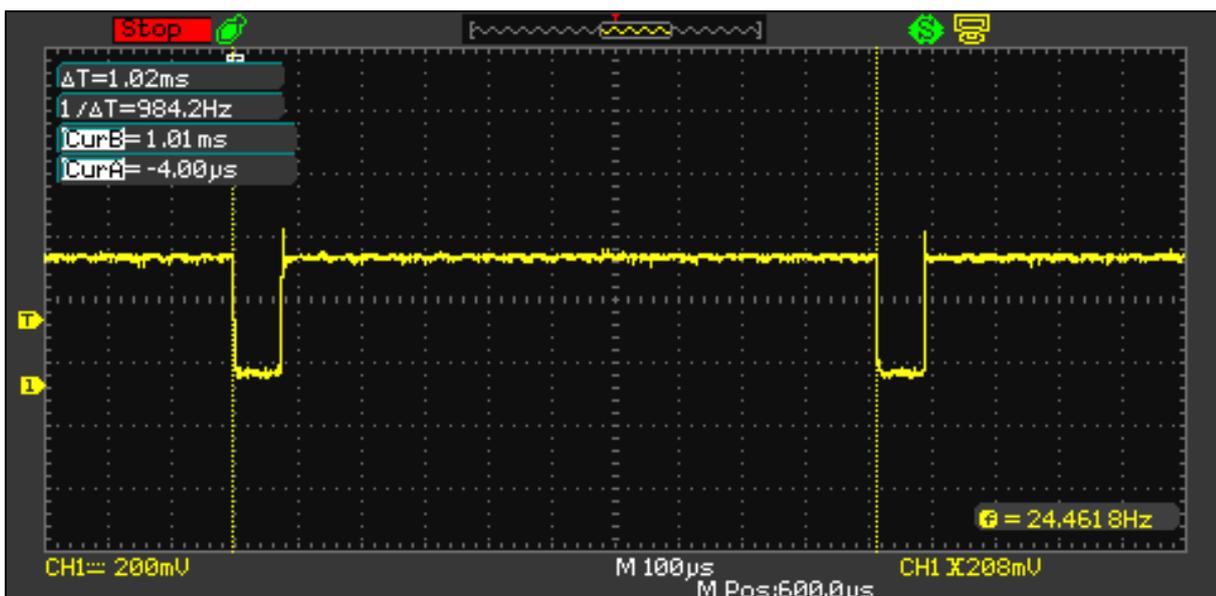
Tabela 4.3 – Análise de células

	Hora	Entrada Analógica	Valor ADC	Tipo	(Vcal) Valores Calibrados	Status	Ação SW	Vcal - m	Fora da Faixa σ	Fora da Faixa 2σ
1	11:10:46.906 -	CEL_ADC1	448	CEL (V)	0,499527390	Status	10	0,04351745	0	0
2	11:10:46.975 -	CEL_ADC2	355	CEL (V)	0,393126730	Status	20	-0,06288321	1	0
3	11:10:47.043 -	CEL_ADC3	404	CEL (V)	0,450517920	Status	10	-0,00549202	0	0
4	11:10:47.081 -	CEL_ADC4	473	CEL (V)	0,521864350	Status	10	0,06585441	0	0
5	11:10:47.150 -	CEL_ADC5	400	CEL (V)	0,453309980	Status	10	-0,00269996	0	0
6	11:10:47.184 -	CEL_ADC6	422	CEL (V)	0,476584970	Status	10	0,02057503	0	0
7	11:10:47.251 -	CEL_ADC7	295	CEL (V)	0,330642100	Status	100	-0,12536784	1	1
8	11:10:47.325 -	CEL_ADC8	497	CEL (V)	0,511465910	Status	10	0,05545597	0	0
9	11:10:47.358 -	CEL_ADC9	397	CEL (V)	0,438985530	Status	10	-0,01702441	0	0
10	11:10:47.424 -	CEL_ADC10	384	CEL (V)	0,419663280	Status	10	-0,03634666	0	0
11	11:10:47.493 -	CEL_ADC11	455	CEL (V)	0,485075120	Status	10	0,02906518	0	0
12	11:10:47.529 -	CEL_ADC12	451	CEL (V)	0,481990280	Status	10	0,02598034	0	0
13	11:10:47.602 -	CEL_ADC13	425	CEL (V)	0,465375600	Status	10	0,00936566	0	0
					(m) Média Aritmética:	0,456009935385				
					(σ) Desvio Padrão:	0,050120241792				

Fonte: Autor

Como se pode observar na Tabela 4.3, a célula 2 está marcada com a ação de valor tipo 20, para receber a tentativa de reabilitação usando a técnica de curtos-circuitos mostrada na Figura 4.6. O chaveamento PWM é uma técnica usada para controlar quanto tempo um circuito ficará ligado ou desligado. O PWM possui um período definido e fixo. O que vai mudar são as proporções entre o tempo de circuito ligado/desligado. Mesmo o processador tendo capacidade para gerar PWM por hardware, neste projeto o PWM teve que ser implantado por rotina de software porque nem todas as saídas digitais do processador possuem hardware para gerar este tipo de sinal.

Figura 4.6 – PWM na célula 2

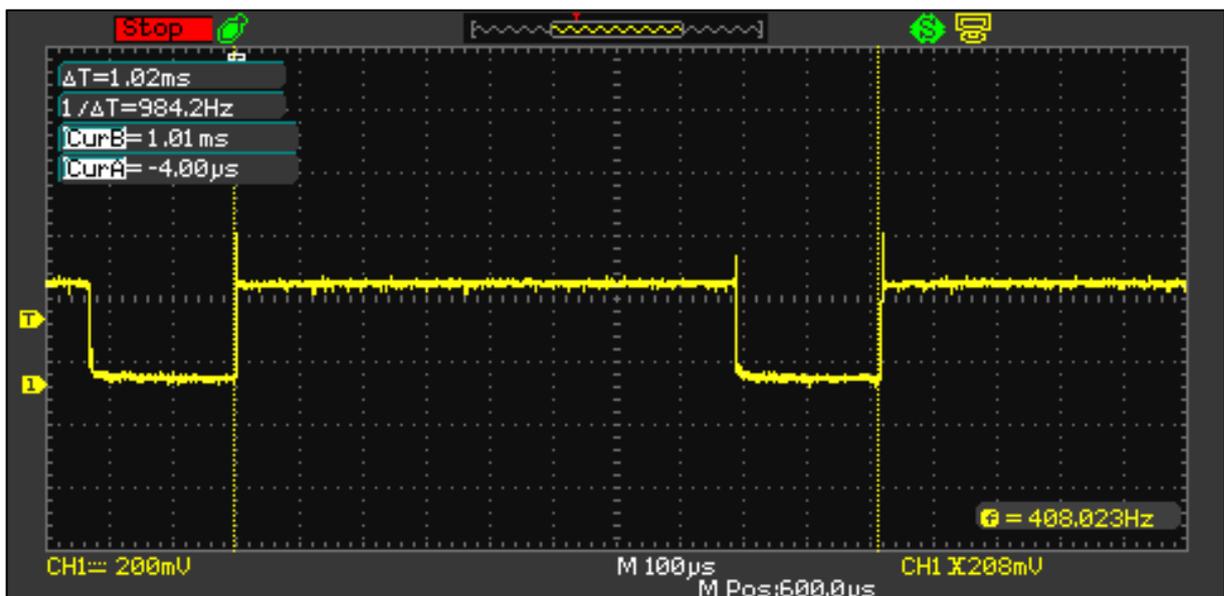


Fonte: Autor

Na Tabela 4.3 observa-se que a saída 7 também está marcada com a ação de valor tipo 100, indicando que o módulo irá executar uma tentativa de reabilitação mais aprofundada e gerar pulsos de PWM mais longos. Esta atuação é mostrada na Figura 4.7. Mesmo com um tempo de curto-circuito maior, o período do PWM é mantido constante. Foi executado um número programado de pulsos PWM e depois uma pausa para que fossem efetuadas novas

leituras de tensão e nova tomada de decisão sobre a necessidade de reabilitação. A Figura 4.8 mostra três ciclos de recuperação de células aplicados à célula de número 7. A cada segundo é efetuada uma nova tentativa de reabilitação e nova avaliação para tomada de decisão. Nenhum novo ciclo de PWM irá acontecer caso a célula evolua para a ação de valor tipo 10, caracterizando-se assim sua recuperação. As duas formas de recuperação da célula, branda e aprofundada, tiveram o tempo do curto-circuito definidos empiricamente. Porém, o software foi projetado para permitir alteração facilitada destes tempos. Resultados futuros a serem obtidos com a experimentação prática no laboratório H2 do CEESP/UFSM poderão definir a temporização mais adequada para o projeto final.

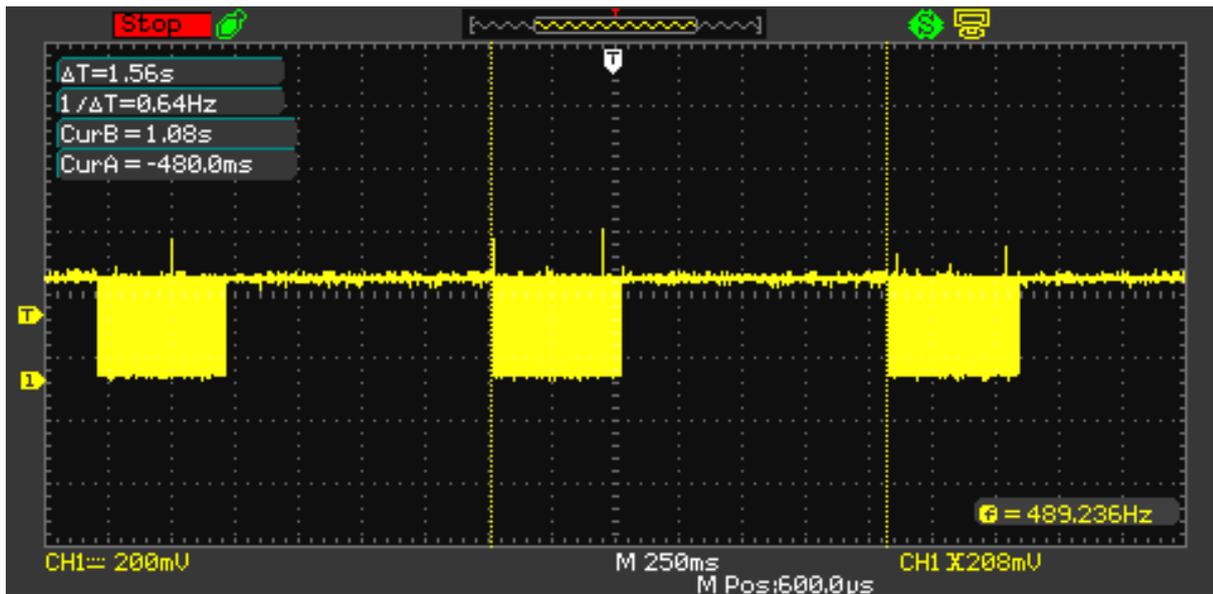
Figura 4.7 – Detalhe do PWM atuando sobre a saída 7



Fonte: Autor

A aquisição de sinais foi realizada utilizando um osciloscópio digital modelo OD-265 da Instrutherm.

Figura 4.8 – Trem de pulsos de PWM na saída 7



Fonte: Autor

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreve a construção do protótipo usado para o dimensionamento mecânico e eletrônico e alerta para cuidados, limitações e calibração para que se tenha redução de erro na aquisição dos dados para o estabelecimento de curtos-circuitos periódicos em pilhas FC. Em seguida, são apresentados detalhes da aplicação de curtos-circuitos controlados no protótipo da pilha de células a combustível, e da estratégia para descobrir células com anomalias de funcionamento. Logo após, passa-se pela aquisição de dados e em seguida para o planejamento do algoritmo que foi escrito e compilado para o microcontrolador do módulo Arduino. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos com o simulador para a faixa ôhmica de funcionamento do protótipo de pilha de células a combustível usado nos testes.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de novas fontes de energia, e em particular das pilhas de células a combustível, torna vital a sua importância para o crescimento da sociedade. Tais fontes renováveis de energia estão adquirindo um papel de destaque neste processo e a geração de energia por hidrogênio tende a desempenhar um papel importante em parceria com outras formas de geração de energia limpa. Por exemplo, quando uma pilha de células a combustível for combinada com a geração fotovoltaica pode-se resolver a deficiência de geração que ocorre pela ausência do sol e acumular hidrogênio durante o período em que a geração fotovoltaica está em funcionamento.

Esta dissertação descreve um meio para que um conjunto de contatos elétricos possa acessar discriminadamente células individuais dentro de uma CaC qualquer. Para isto, foram simulados e montados diversos circuitos eletrônicos com facilidades para obter também dados em computadores. O software com o algoritmo de aquisição de dados para análise e aplicação da técnica de curtos-circuitos foi desenvolvido e depurado usando um simulador da região ôhmica de pilhas CaC. O simulador permitiu alterar a tensão usada nas simulações com células individuais. Diante das alterações de tensão, o módulo MMACC respondeu às tomadas de decisões fazendo uma atuação específica para cada caso previsto. O módulo MMACC apresentou rendimento suficiente para que os pulsos PWM gerassem curtos-circuitos com resolução da ordem de microssegundos. Com a calibração de parâmetros via software, a resolução de leitura das tensões nos terminais de cada célula permitiu que o MMACC adquirisse valores melhores do que dez milivolts na faixa de 0 a 2 V.

Para esta dissertação foram estudadas duas formas diferentes de modelamento da célula a combustível, usando o simulador de circuitos eletrônicos LTSpice. Os modelos de cada célula usaram uma forma simplificada e outra mais completa.

Como resultados dos estudos desta dissertação, produziu-se um módulo instrumental que permitiu adquirir informações e atuar individualmente em células a combustível de uma pilha, para ajudar em novos estudos para integração da geração por hidrogênio na matriz energética. Este trabalho também permitirá ampliar os estudos sobre a efetividade do método de curtos-circuitos em células a combustível, contribuindo com estas para a manutenção, aumento da vida útil e rendimento.

Outro aspecto a ressaltar é que os resultados desta dissertação se mostraram propícios para a automação de CaCs, contribuindo como peça importante para o desenvolvimento de um método genérico de controle, onde toda a planta passa a ser automatizada. Esta automação requer a obtenção precisa de informações e atuação pontual, para que se tenha maior flexibilidade e segurança.

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A contribuição principal desta dissertação foi especificamente o desenvolvimento de uma metodologia para recuperação de células a combustível individuais de uma pilha CaC. Espera-se que com os resultados aqui obtidos o aumento da qualidade na aquisição de dados e recuperação de células FC individuais, atuando diretamente dentro da pilha toda.

Outra contribuição importante é a automação da aquisição de informações detalhadas on-line sobre o rendimento das células que compõem uma pilha FC.

Esta dissertação pode servir também para incentivar o uso de simuladores de circuitos eletrônicos que se refiram a modelos diversos de simulação de células a combustível.

Na área de desenvolvimento de circuitos eletrônicos e projetos de placas de circuito impresso, este trabalho também incentiva a utilização do ambiente de projetos utilizando o software livre KiCad (2019).

Espera-se contribuir também com novas aplicações para o projeto Arduino, tanto na parte do hardware quanto do software, na recuperação automática de tensão em células a combustível e melhor compreensão da geração de energia utilizando hidrogênio em células a combustível, servindo de subsídio para trabalhos futuros relacionados ao tema.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade desta dissertação pode se dar de diferentes formas, dentre as quais:

- Fazer a integração do módulo proposto neste texto com uma pilha CaC para ensaios em outras plataformas de software, como o Matlab ou LabView;
- Implementar novos algoritmos de análise de dados coletados e de atuação sobre pilhas CaC como um todo;
- Conectar a proposta de chaveamento dos curtos-circuitos individuais em células a combustível com um computador PC usando a interface de comunicação serial com isolamento óptico disponível num módulo MMACC. Dessa forma os dados poderão trafegar a uma distância maior no laboratório sem comprometer a

segurança dos circuitos de comunicação, seja por diferenças de potencial ou descargas elétricas entre os pontos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANALOG DEVICES INC. LTSpice Circuit Simulator. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>>. Acesso em: 4/3/2019.

ARSOV, G. L. Improved parametric PSpice model of a PEM fuel cell. 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. **Anais...** . p.203–208, 2008. Brasov, Romania: IEEE.

BENESCH, R.; JACKSIER, T. Hydrogen and Material Quality Issues for PEM Fuel Cells. 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. **Anais...** . v. 2005, p.481–486, 2005. IEEE.

FARRET, F. A. **Integration of Renewable Sources of Energy**. Hoboken: John Wiley and Sons, New Jersey, p. 648, 2018.

FUGLEVAND, W. A.; DEVRIES, P. D.; LLOYD, G. A.; LOTT, D. R.; SCARTOZZI, J. P. Fuel Cell and Metho for Controlling Same - United States Patent (19) Fig-2a. , 2000.

GONZATTI, F. **Estabilização de tensão em geração distribuída usando armazenamento de energia elétrica em hidretos metálicos**, 2015. Santa Maria: 136 p. (Qualificação de Doutorado)- Universidade Federal de Santa Maria.

GONZATTI, F. **Fundamentos para Concepção, Controle e Automação de uma Planta Armazenadora de Energia Utilizando Hidrogênio**, 2017. Santa Maria: 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Maria.

HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES. 3000W Fuel Cell Stack User Manual. **Fuel Cell**, 2013. Horizon Fuel Cell Technologies.

IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. Energy storage systems-Characteristics and comparisons. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 5, p. 1221–1250, 2008.

KERNLER, D.; KIERSZ, A. Standard Deviation. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/standard-deviation-2014-12>>. .

KICAD. KiCad EDA. Disponível em: <<http://kicad-pcb.org/>>. Acesso em: 4/3/2019.

KUHN, V. **Aumento da Eficiência Total de Armazenadores de Energia Compostos por Eletrolisadores, Células a Combustível e Hidretos Metálicos**, 2018. Santa Maria: 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Maria.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Datasheet ATmega2560. Disponível em: <<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>>. Acesso em: 4/3/2019.

MIGLIARDINI, F.; CORBO, P. Optimization of fuel cell performance in vehicles by electrochemical impedance spectroscopy. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. **Anais...** . p.1–6, 2012. Napoli: IEEE.

DE MOOR, G.; CHARVIN, N.; BAS, C.; et al. In situ quantification of electronic short circuits in PEM fuel cell stacks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 8, p. 5275–5282, 2015.

NEXPERIA. PSMN0R9-25YLC Datasheet. Disponível em: <<https://www.nexperia.com/products/mosfets/power-mosfets/PSMN0R9-25YLC.html>>. Acesso em: 4/3/2019.

RIASCOS, L. A. M. Relative humidity control in polymer electrolyte membrane fuel cells without extra humidification. **Journal of Power Sources**, v. 184, n. 1, p. 204–211, 2008.

SANCHEZ, R. E.; HAREL, F.; JEMEI, S.; et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit To cite this version : HAL Id : hal-01304007 Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit. , 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. LM358 Design & Development model. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/zip/snom268>>. Acesso em: 4/3/2019.

WU, B.; PARKES, M. A.; DE BENEDETTI, L.; et al. Real-time monitoring of proton exchange membrane fuel cell stack failure. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 46, n. 11, p. 1157–1162, 2016a. Springer Netherlands.

WU, B.; PARKES, M. A.; DE BENEDETTI, L.; et al. Real-time monitoring of proton exchange membrane fuel cell stack failure. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 46, n. 11, p. 1157–1162, 2016b. Springer Netherlands.

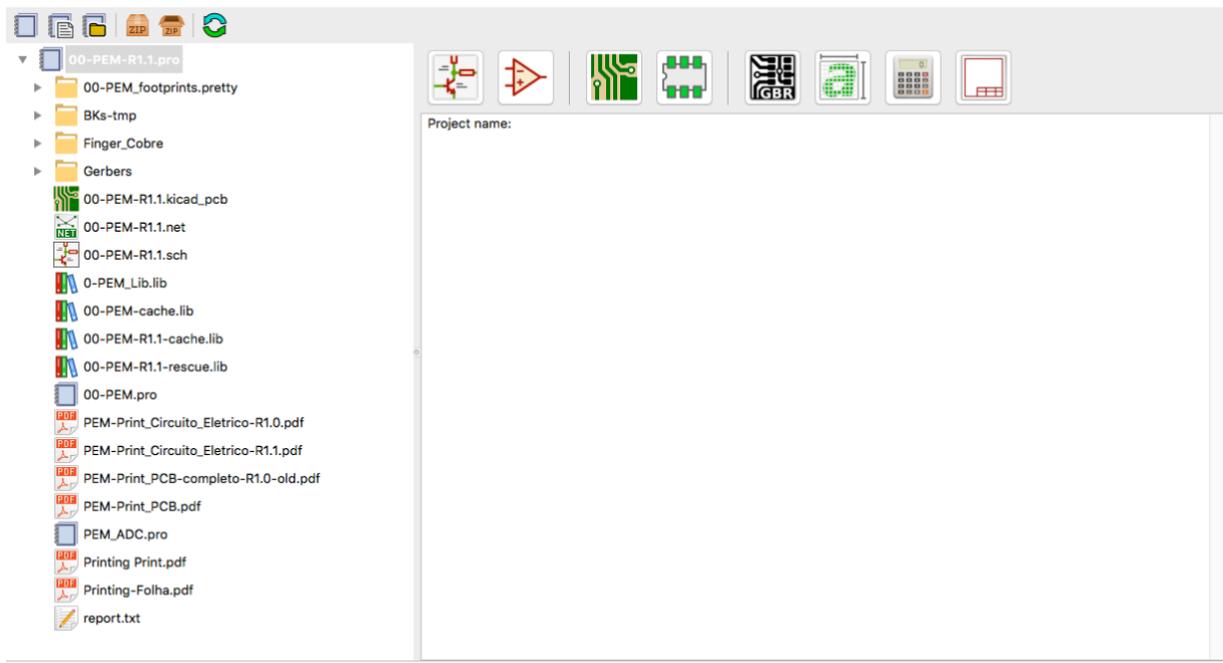
ZHAN, Y.; GUO, Y.; ZHU, J.; LI, L. Current short circuit implementation for performance improvement and lifetime extension of proton exchange membrane fuel cell. **Journal of Power Sources**, v. 270, p. 183–192, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A PROJETO ELETRÔNICO

O projeto eletrônico final da aplicação controlada de curtos-circuitos em células individuais de uma pilha CaC comprovou o circuito desenvolvido durante as simulações. Todo o desenho do circuito eletrônico e o projeto da placa de circuito impresso foram realizados usando o programa KiCAD 5.0 disponível em KiCad (2019). Este é um software gratuito, de código aberto e que inclui uma grande quantidade de bibliotecas para os componentes existentes no mercado.

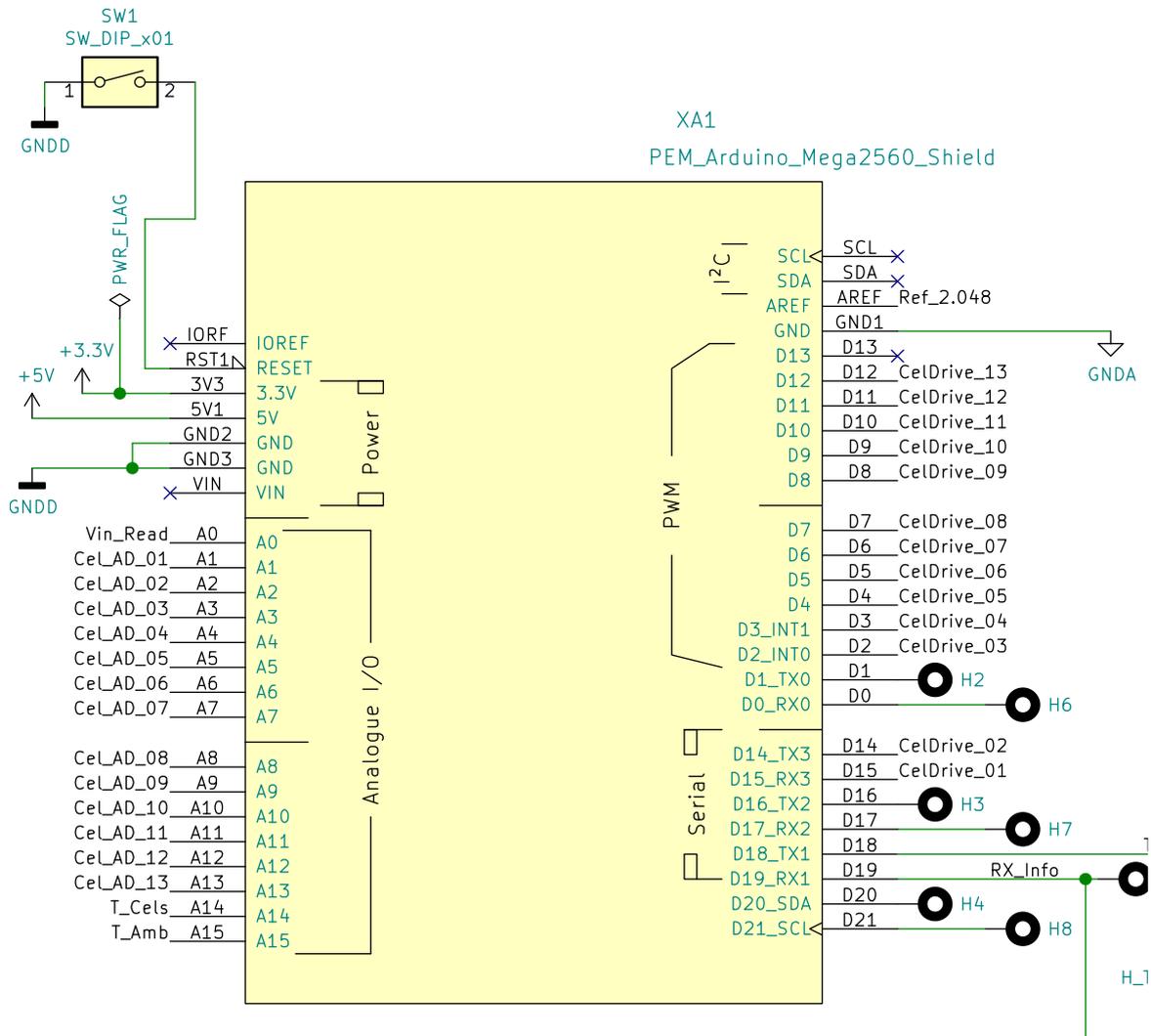
Figura A. 1 – Janela principal do KiCAD



Fonte: Autor

Uma vez criado o projeto na janela principal, inicia-se o desenho do circuito. Para isso, basta iniciar um novo desenho de circuito eletrônico usando o menu Editor de *Layout* de Esquemáticos.

Figura A. 2 – Janela de edição de esquemas elétricos



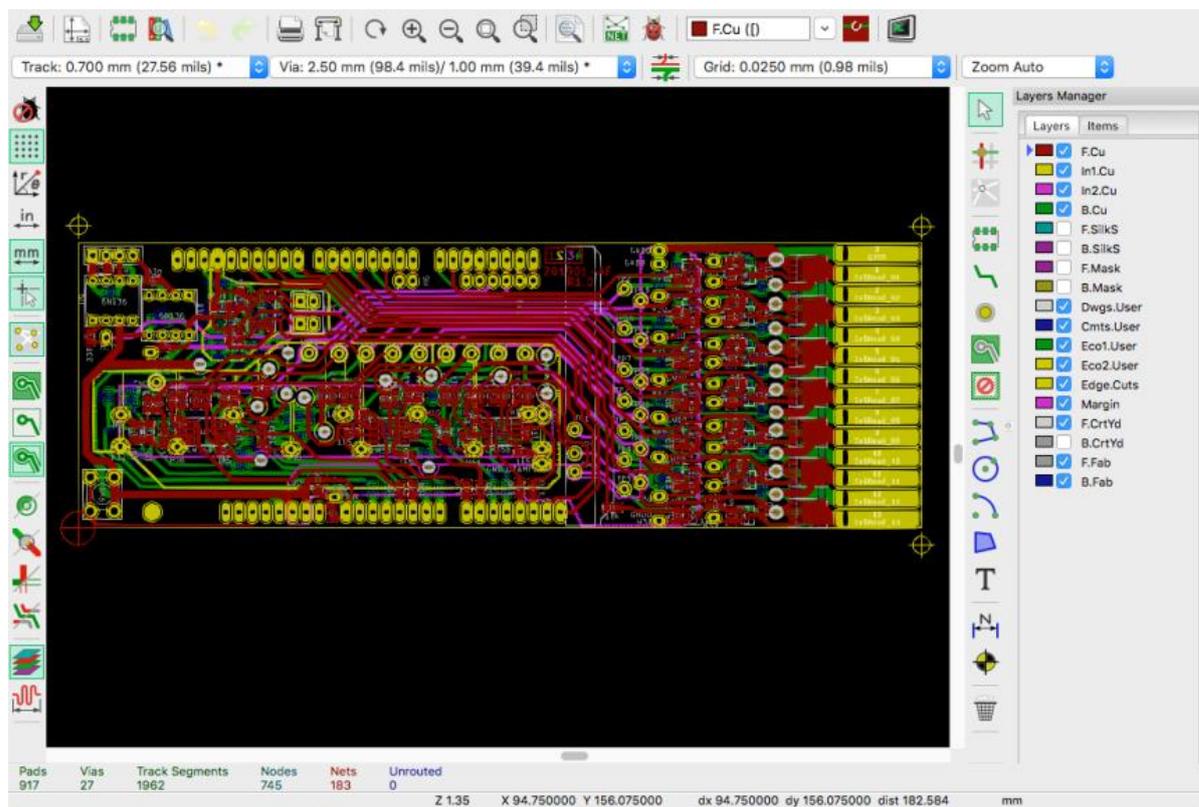
Fonte: Autor

O Editor de esquemáticos do KiCAD permite fazer os desenhos usando blocos hierárquicos, o que facilita a organização geral e distribuição dos componentes, garantindo assim a ligação elétrica entre as diversas páginas dos desenhos.

A placa de circuito impresso (PCI) é um *shield* do Arduino sendo inserida sobre a placa do Arduino-Mega. O program KiCAD também oferece um Editor de Layout PCI, que deve ser iniciado, preferencialmente, após a conclusão do esquema elétrico. O editor de placas faz a importação de todos os componentes utilizados no esquema elétrico e também permite a

atualização reversa do esquemático, em caso de necessidade. A placa está projetada para ser fabricada em quatro faces, mas também foi projetada para poder ser fabricada em duas faces, permitindo ser usinada por uma fresa para fabricação de circuitos impressos, como mostra a Figura A.3. Este artifício de projeto permite a fabricação rápida de um protótipo.

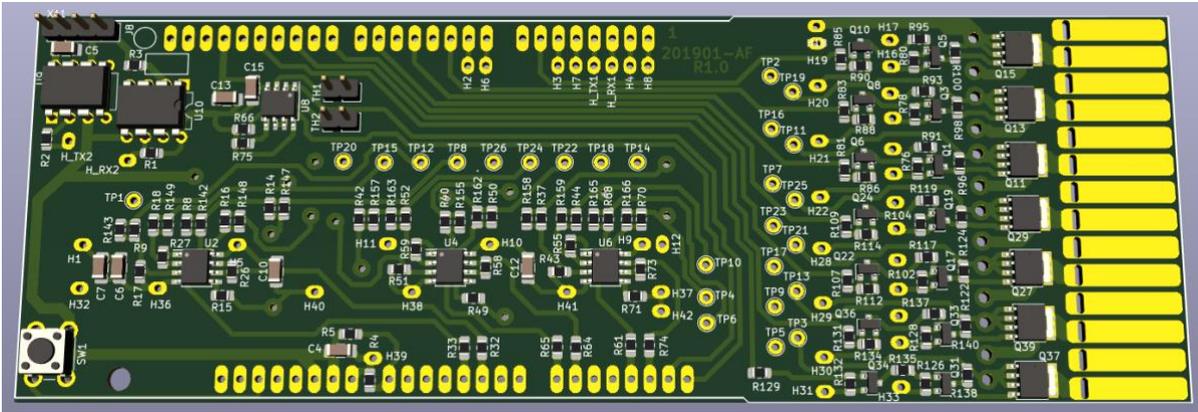
Figura A.3 – Editor de PCI



Fonte: Autor

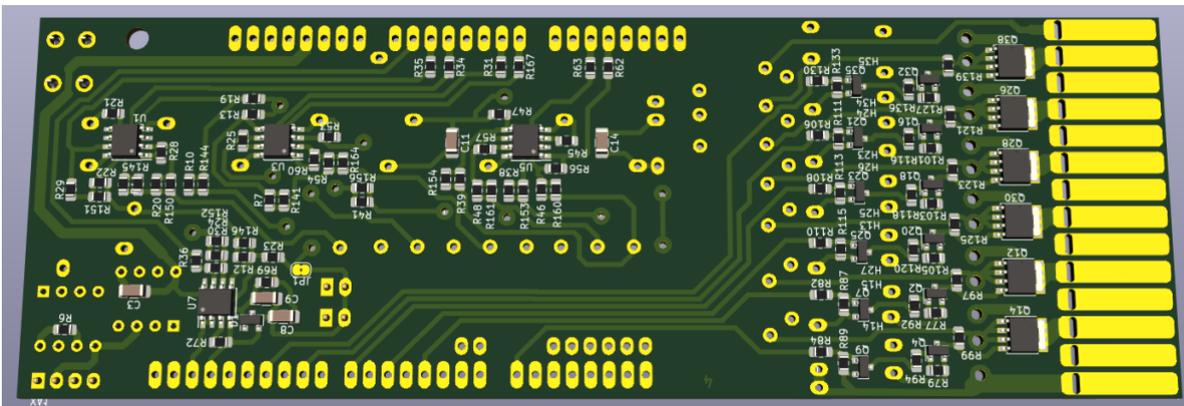
A previsão de pontos para ligação de fios permite fabricar uma placa de quatro faces com apenas duas, possibilitando contornar a falta das faces internas. Para economia de espaço, os componentes são montados na face superior e inferior da placa utilizando a tecnologia de montagem de superfície (SMT), como mostram as Figura A.4 e Figura A.5.

Figura A.4 – Vista 3D da parte superior da PCI



Fonte: Autor

Figura A.5 – Vista 3D inferior da PCI



Fonte: Autor

O diagrama esquemático completo é apresentado nas Figura A.6, Figura A. 7 e Figura A. 8.

Figura A.6 – Circuito eletrônico, folha 1/3

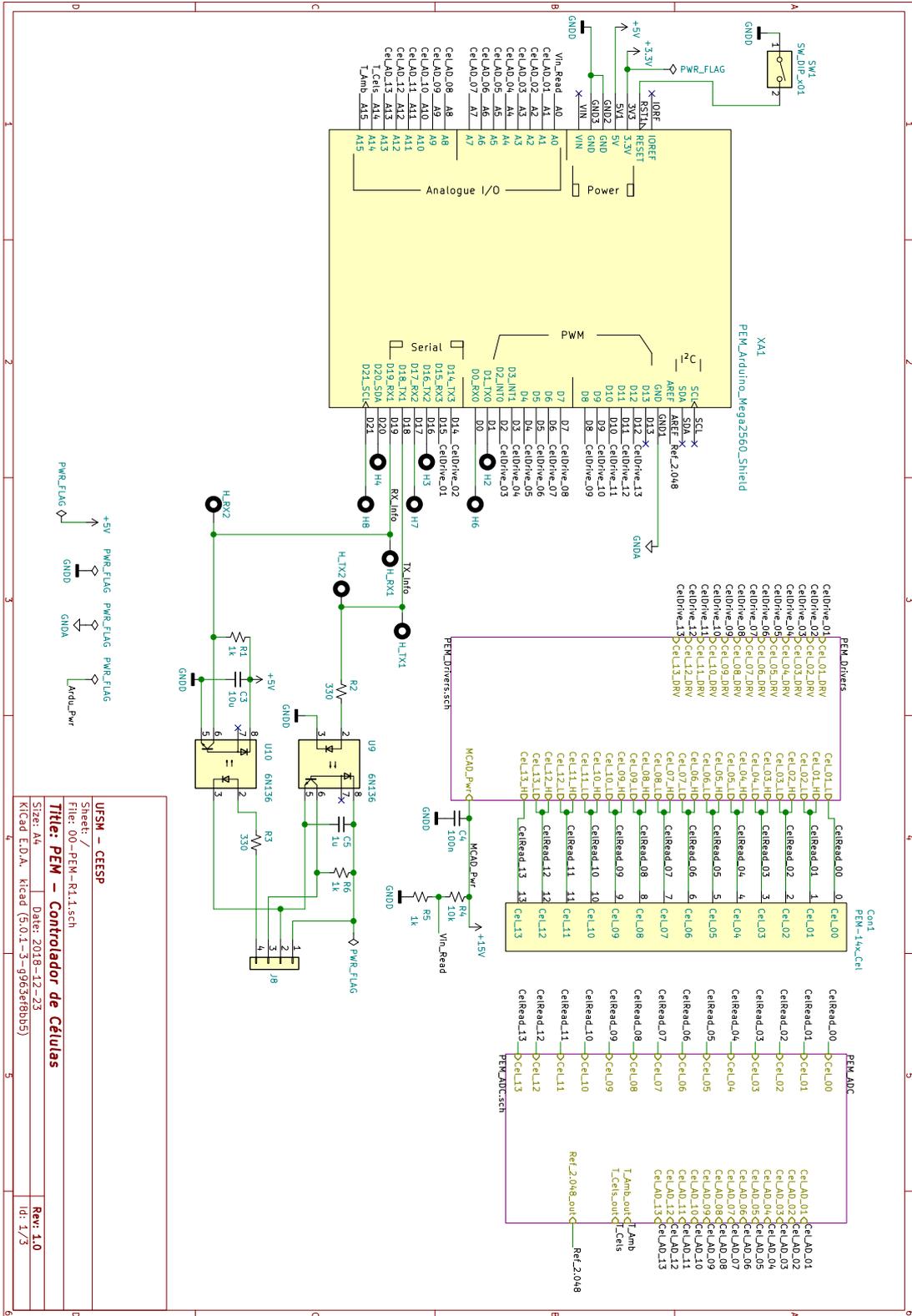
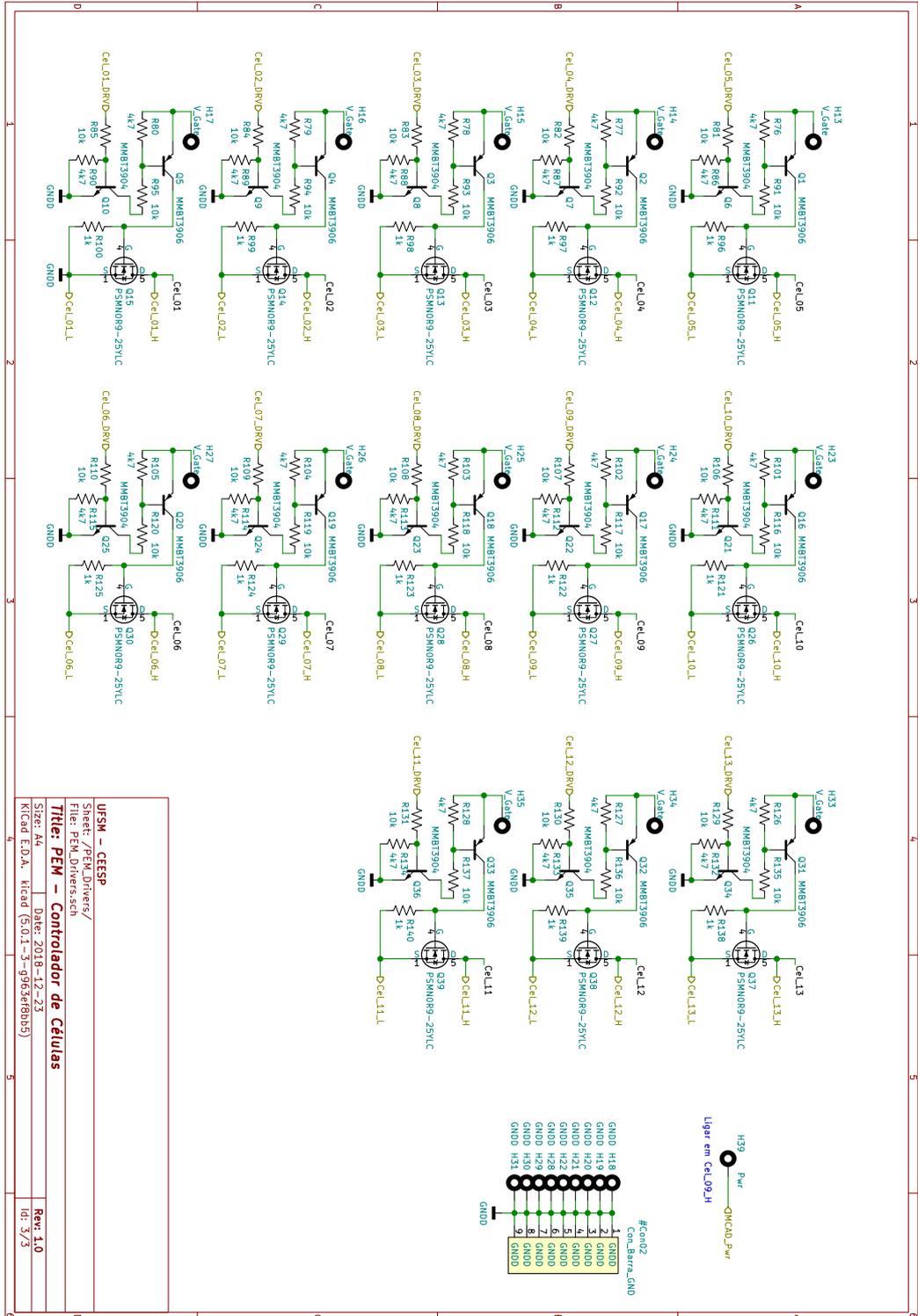


Figura A. 8 – Circuito eletrônico, folha 3/3

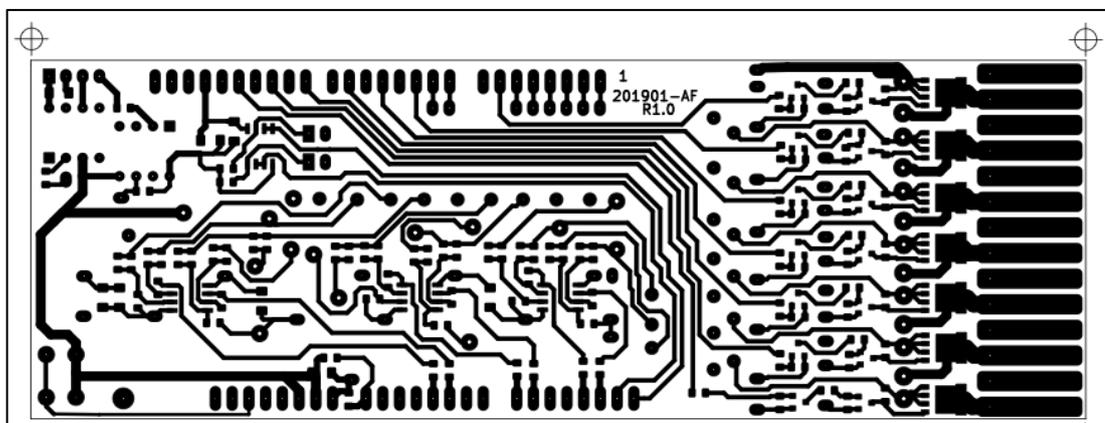


Fonte: Autor

APÊNDICE B DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DO MMACC

O requisito mecânico principal do MMACC é ter uma largura adequada para viabilizar novos módulos que possam vir a ser instalados lado a lado, em sequência, até se completar a largura total da CaC.

Figura B. 1 – Ligações de cobre numa das faces para fresagem



Fonte: Autor

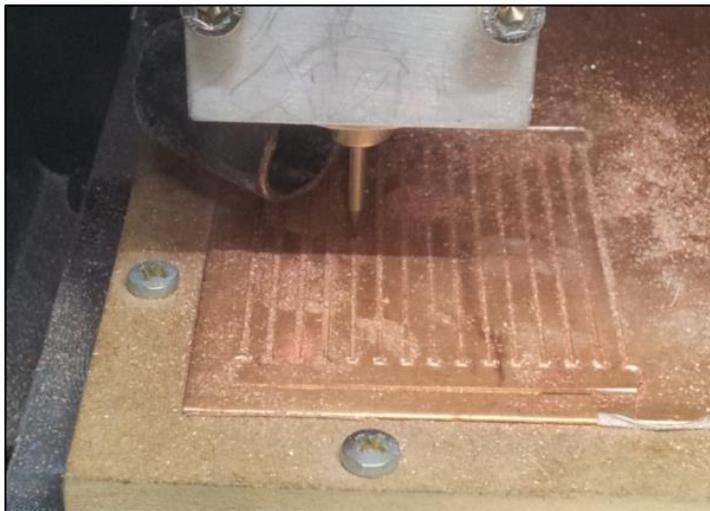
Sendo a MMACC uma placa eletrônica do tipo Shield para Arduino Mega foi necessário dimensionar uma placa que permitisse o encaixe mecânico, o que resulta no segundo fator dimensional de largura mínima. A conjunção destes dois fatores impossibilita o preenchimento de toda a pilha CaC existente no laboratório H2 do CEESP/UFSM, com módulos que utilizam o Arduino Mega. Isso se deve ao fato de que estão implantados 14 contatos, o que com seis módulos resulta em 84 pontos de conexão. Logo, se necessário poderá ser projetada uma segunda versão do MMACC, agora com 13 contatos, o que vai implicar na escolha de um novo módulo Arduino, com largura menor. Também existe a possibilidade de se evitar uma nova modificação do projeto fazendo um ajuste mecânico no sexto módulo, serrando um recorte no conector vai encaixar na CaC. Nesta opção não deverão ser montados todos os componentes deste último módulo.

No protótipo fabricado para esta dissertação, existem transistores de chaveamento de corrente que precisam dissipar calor. Com a adequação do circuito eletrônico ao dimensional

mecânico, o espaço de dissipação fica reduzido. Procura-se evitar a elevação da temperatura, utilizando os próprios contatos de cobre como condutores de calor do circuito dos MOSFETs, até as células PEM. Ali o calor é absorvido pela célula e não representa fator significativo, pois a área de dissipação é muito grande. Estes contatos foram parcialmente fresados a partir de uma chapa de cobre com 0,8 mm de espessura. Esta solução se mostrou conveniente. Anteriormente, foi realizada uma pesquisa de fornecedores deste serviço que apontou para a necessidade de corte por água, mas as empresas da região pesquisada não ofereciam precisão de corte adequada para o dimensional deste grupo de contatos.

A máquina utilizada foi a fresadora de circuitos impressos localizada no laboratório do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC)–UFSM. O processo realizado pela máquina permitiu obter um conjunto de contatos que mantêm o alinhamento entre si, o que foi fundamental para facilitar a montagem final.

Figura B. 2 – Fresagem do contato elétrico PEM



Fonte: Autor

Depois da marcação na fresa foi feito um acabamento manual da peça para deixar todos os contatos conformados corretamente. Por fim, foi construído um molde para aplicar massa de calafetar automotiva e assim, construir um bloco sólido para sustentação mecânica dos contatos e manter o alinhamento. Somente depois da soldagem na placa de circuito impresso que foram removidas as guias de alinhamento dos contatos de cobre.

A função dos contatos de cobre é a de fazer a ligação da placa do circuito eletrônico com a CaC, conectando os contatos de cobre na superfície do grafite da CaC. Estes contatos de cobre também são responsáveis por conduzir o calor da região dos MOSFETs até o grafite, onde será dissipado.

Figura B. 3 – Molde para massa de calafetar



Fonte: Autor

Figura B. 4 – Contato PEM

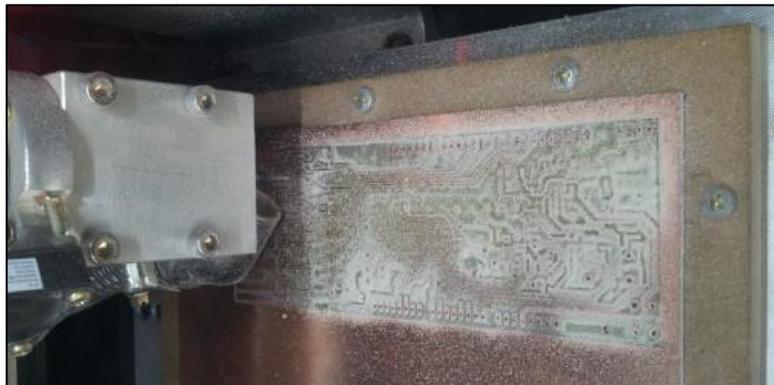


Fonte: Autor

Fabricação da placa e montagem

A placa de circuito impresso escolhida para a fabricação foi a que tem uma espessura de cobre de uma onça. Tendo o dobro da espessura da usualmente empregada é melhor para fazer a transferência de calor dos MOSFETs e fica mais robusta para fresagem de trilhas estreitas.

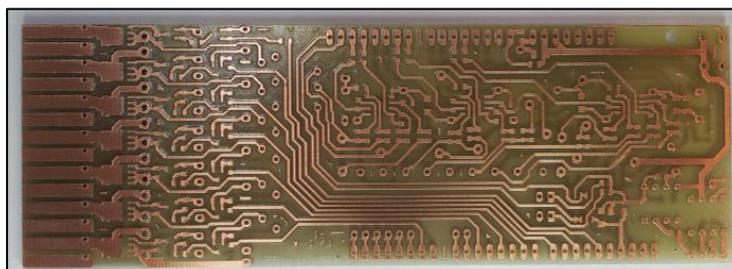
Figura B. 5 – PCI sendo fresada



Fonte: Autor

Uma vez concluída a fresagem, a placa foi logo envernizada para evitar a oxidação do cobre, conforme mostra a Figura B. 6.

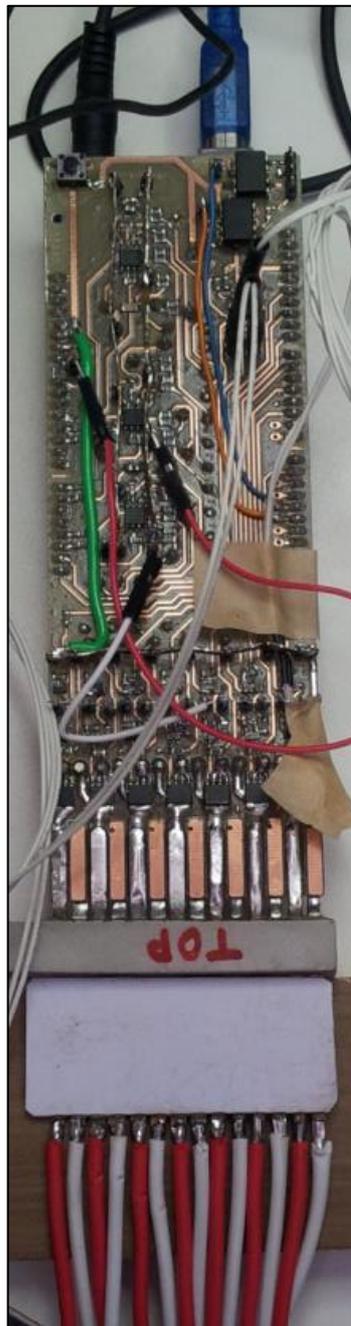
Figura B. 6 – PCI concluída e envernizada



Fonte: Autor

O passo seguinte foi a montagem de todos os componentes eletrônicos e o início dos testes para verificação do funcionamento, o que pode ser observado na Figura B. 7. Neste protótipo, foi instalado um sensor de temperatura diretamente sobre um dos MOSFETs. Também foi configurada a fonte de alimentação dos *drivers* que acionam o *gate* dos MOSFETs. Fios foram soldados na face externa dos contatos da CaC para conexão ao simulador ôhmico.

Figura B. 7 – Placa montada pronta para testes



APÊNDICE C FONTE DO SOFTWARE PARA MÓDULO ARDUINO

```

1  /*
2      Programa de Testes da Placa PEM-R1.x
3      Data: 201901
4      Autor: Auri Flach
5
6      Revisoes de Software
7      R1.0 - apenas testes basicos
8      R1.1 - implementado diagrama de estados
9  */
10
11 /* -----
12             Prototipo de funcoes
13 -----
14 */
15
16 void atualiza_array_entradas_analogicas(void);
17 void calcula_infos_das_celulas(void);
18 void ler_entradas_analogicas(void);
19 void imprime_infos_entradas_analogicas(void);
20 void inicializa_pinos(void);
21 int  Media_Leituras_AD(int  ADC_Channel,  int  Num_Leituras,  int
Delay_Entre_leituras_us);
22 int  Manipula_Celula_PEM(int Cel_Write_num, int tempo_on, int duracao);
23
24
25
26 // codigos para erros
27 enum oper_erros { SEM_ERRO = 0, ERRO_CEL_FORA_DA_FAIXA};
28
29 // Tarefas que podem ser executadas
30 enum  TArefas_cmds  {  TA_ADC_READ  =  0,  TA_PRINT_VALUES,
TA_ANALIZE_PEM_READINGS, TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME, \
31             TA_DIRECT_SHORT_CKT, TA_DO_NOTHING \
32             };
33
34 // -----

```

```

35 //          Pinos para manipular celulas PEM
36 //
37 #define CELDRIVE_01_pin    15
38 #define CELDRIVE_02_pin    14
39 #define CELDRIVE_03_pin    2
40 #define CELDRIVE_04_pin    3
41 #define CELDRIVE_05_pin    4
42 #define CELDRIVE_06_pin    5
43 #define CELDRIVE_07_pin    6
44 #define CELDRIVE_08_pin    7
45 #define CELDRIVE_09_pin    8
46 #define CELDRIVE_10_pin    9
47 #define CELDRIVE_11_pin    10
48 #define CELDRIVE_12_pin    11
49 #define CELDRIVE_13_pin    12
50
51 #define MAX_NUMBER_OF_CELLS 13
52 const int CelDrive_pin_Array[] = {CELDRIVE_01_pin, CELDRIVE_02_pin,
CELDRIVE_03_pin, CELDRIVE_04_pin, CELDRIVE_05_pin, \
53                                     CELDRIVE_06_pin, CELDRIVE_07_pin,
CELDRIVE_08_pin, CELDRIVE_09_pin, CELDRIVE_10_pin, \
54                                     CELDRIVE_11_pin, CELDRIVE_12_pin,
CELDRIVE_13_pin \
55                                     };
56
57
58 /* -----
59 Monitoramento das Celulas
60 Codigos para Status da Celula
61 SCKT    = Short Circuit
62 PWM_A = PWM COM rampa_up de 500 us + 1 ms (ON) + 1 ms (OFF)
63 PWM_B =
64 PWM_C =
65 PWM_D =
66
67 */
68
69 enum CELL_Status_Codes {CELL_GOOD = 10, CELL_STATUS_FALHA_PEQUENA = 20,
CELL_STATUS_FALHA_MEDIA = 100, CELL_STATUS_FALHA_GRAVE = 500};
70 // Percentuais de PWM

```

```

71 enum CELLS_PWM_Modes {CELL_DRIVE_OFF = 0, CELL_DRIVE_ON, CELL_PWM_5 =
50, CELL_PWM_10 = 100, CELL_PWM_20 = 200, CELL_PWM_50 = 500};
72 enum CELLS_PWM_TEMPOS {CELL_PWM_DURA_0s1 = 100, CELL_PWM_DURA_0s2 = 200,
CELL_PWM_DURA_0s5 = 500, \
73             CELL_PWM_DURA_1s = 1000, CELL_PWM_DURA_2s = 2000,
CELL_PWM_DURA_5s = 5000, CELL_PWM_DURA_10s = 10000\
74             };
75
76 #define CELL_TEMPO_DE_PWM          20
77 #define CELLS_NENHUMA_EM_ANALISE  0
78 // Período do PWM ajustado para 1 ms
79 #define PWM_MANUAL_PERIODO        1000
80
81 /* -----
82     Pinos para o ADC
83
84
85 */
86
87 // Pino para voltagem da fonte
88 #define VCC_READ_pin              A0
89 // Pinos para voltagem das células
90 #define CEL_AD_01_pin             A1
91 #define CEL_AD_02_pin             A2
92 #define CEL_AD_03_pin             A3
93 #define CEL_AD_04_pin             A4
94 #define CEL_AD_05_pin             A5
95 #define CEL_AD_06_pin             A6
96 #define CEL_AD_07_pin             A7
97 #define CEL_AD_08_pin             A8
98 #define CEL_AD_09_pin             A9
99 #define CEL_AD_10_pin             A10
100 #define CEL_AD_11_pin             A11
101 #define CEL_AD_12_pin             A12
102 #define CEL_AD_13_pin             A13
103 // Pinos para leitura de temperaturas
104 #define TEMPER_CELLS_pin          A14
105 #define TEMPER_AMB_pin            A15
106
107 #define CELLS_FISRT_CHANNEL        1
108 #define CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS 13

```

100

```
109 #define ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS      16
110 const int ADC_pin_Array[] = {VCC_READ_pin, CEL_AD_01_pin, CEL_AD_02_pin,
111                               CEL_AD_03_pin, CEL_AD_04_pin, CEL_AD_05_pin, \
112                               CEL_AD_06_pin, CEL_AD_07_pin, CEL_AD_08_pin,
113                               CEL_AD_09_pin, CEL_AD_10_pin,          \
114                               CEL_AD_11_pin, CEL_AD_12_pin, CEL_AD_13_pin,
115                               TEMPER_CELS_pin, TEMPER_AMB_pin      \
116                               };
117
118 // Configuracao do numero de leituras do ADC
119 #define NUM_LEITURAS_ADC                5
120 #define DELAYus_LEITURAS_ADC            50
121 #define FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT      9
122
123 // ADC_Vals_Read [] = {ADC_valor_lido bruto}
124 int ADC_Vals_Read[ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS];
125
126 // ADC_Converted_Vals [] = {ADC_valor_convertido,
127 // multiplicador_de_retirada_do_erro}
128 float ADC_Converted_Vals[ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS];
129
130 // ADC_Vals_Read [] = {ADC_valor_lido bruto}
131 // Tabela montanda mendido valores adquiridos sem calibracao contra
132 // medidas do Fluke 189.
133 const float ADC_Val_Calibration[ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS] = {1.0,
134 1.014316, 1.007096, 1.014545, 1.003631, 1.031009, 1.027400, 0.996924, \
135 0.941429,
136 1.005980, 0.994455, 0.969537, 0.971250, 0.996004, 1.0, 1.0
137 };
138
139 int CELLS_Acao[CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS];
140
141 int CELLS_Media_ADC;
142 float CELLS_Media_volts, CELLS_variancia, CELLS_desvio_padrao;
143
144 // -----
145 // Pinos da serial 1
146 //
147 #define TX_INFO_TX1_pin      18
```

```

143 #define RX_INFO_RX1_pin      19
144
145 /* -----
--
146 ----- Escala para Referencia de tensao (VREF) -----
---
147
148
149
150     2.048/1024 = 0.002 (valor teorico)
151     2.0513/1024 = 0.00200322265625 (valor medido)
152
153 */
154 // Valor ideal, mas foi usado o valor medido, ja calculado diretamente
na planilha
155 #define ADC_TO_VOLTS_MAP      0.002
156
157
158 /* -----
----- Parametros do ADC -----
159
(Medidos com fluke 189)
160
ADC_STEP (V/step) = Num_steps/VRef = 1024/2.0514
161
162
163 */
164
165
166 /* -----
----- Escala para Vin -----
167
Vin (V)          = 14.982          ; Valor da entrada de tensao
de alimentacao (Vin)
168
V_ADCin (V)     = 1.3504          ; Do divisor resistivo, o ADC
recebe X volts
169
Vin_/V_ADCin = 11.094490521327 ; Fator do divisor resistivo
170
-----
171
ADC_VCC_TO_VOLTS_SCALE = Vin_/V_ADCin / ADC_STEP ;Converte
ADC para volts
172
-----
173
Conferindo...
174
ADC (Read)          = 674 * ADC_VCC_TO_VOLTS_SCALE
175
ADC_to_Vin_Convert (V) = 14.980
176
177

```

102

```
178 */
179 // Ajustes de escalas do divisor resistivo na medicao de Vin:
180 // Divisor Resistivo: Vin(Volts)/V_ADCin(Volts) = 11.018491341356 (medido
com fluke 189)
181
182 #define ADC_VCC_TO_VOLTS_SCALE      0.022225818218213
183
184
185 /*      -----
186      ----- Escala para Tensao das Celulas PEM -----
187 */
188
189 #define ADC_TO_PEM_VOLTS_SCALE      0.001100046838264
190
191
192 /*      -----
193      ----- Diversos -----
194 */
195 // Rup = 10k, Rlow = 1k
196 #define VIN_CALIBRATE_VAL
197 #define T_ZERO_GRAUS      1000
198 #define T_25_GRAUS      431
199 // Variaveis diversas
200 int tarefa_atual, ta_anterior;
201 volatile int CEL_Number;
202
203
204
205 //-----
206 // Variaveis usadas para contagem de tempo
207 unsigned long conta_millis;
208 // Define o tempo basico do loop
209 #define BASE_TIME      1
210 //
211 // #define LOOP_TIME      BASE_TIME * 1000
212 // Instante de fazer a leitura do ADC
213 #define ADC_READ_MOMENT      BASE_TIME * 2000
214 unsigned int time_to_read_ADC, time_to_print;
215
216 /*-----
217      Setup()
```

```

218 -----
219 */
220 void setup() {
221   analogReference(EXTERNAL);
222   inicializa_pinos();
223   Serial.begin(9600);
224   Serial.flush();
225   Serial.println(F("_____"));
226   Serial.println(F("_____ INICIO _____"));
227   CEL_Number = 0;
228   tarefa_atual      = TA_DO_NOTHING;
229   ta_anterior       = TA_DO_NOTHING;
230   time_to_read_ADC  = 0;
231   //time_to_print    = 0;
232   conta_millis = millis();
233 }
234
235 /*-----
236           Loop()
237 -----
238 */
239 void loop() {
240   int i, tmp;
241   static int CEL_em_analise;
242
243
244   if (abs(micros() - conta_millis) >= BASE_TIME) {
245     conta_millis = micros();
246     time_to_read_ADC++;
247   }
248   switch (tarefa_atual) {
249     case TA_ADC_READ:
250       atualiza_array_entradas_analogicas();
251       calcula_infos_das_celulas();
252       tarefa_atual = TA_PRINT_VALUES;
253       break;
254     case TA_PRINT_VALUES:
255       imprime_infos_entradas_analogicas();
256       //      if (CEL_em_analise == CELLS_NENHUMA_EM_ANALISE) {
257       //        CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
258       //        tarefa_atual = TA_ANALIZE_PEM_READINGS;

```

```

259     //     }
260     //     else {
261         //         tarefa_atual = TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME;
262     //     }
263     CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
264     tarefa_atual = TA_ANALIZE_PEM_READINGS;
265     break;
266     case TA_ANALIZE_PEM_READINGS:
267         //             Serial.println("Cel_Status " +
String(CELLS_Acao[CEL_em_analise], DEC));
268         //         Serial.println(CEL_em_analise);
269         if (CEL_em_analise > CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS) {
270             // Analise completa
271             for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL ; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS;
i++) {
272                 Manipula_Celula_PEM(CEL_em_analise, CELL_DRIVE_OFF, 0);
273             }
274             CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
275             tarefa_atual = TA_DO_NOTHING;
276         }
277         switch (CELLS_Acao[CEL_em_analise]) {
278             case CELL_GOOD:
279                 CEL_em_analise++;
280                 break;
281             case CELL_STATUS_FALHA_PEQUENA:
282                 Manipula_Celula_PEM((CEL_em_analise), CELL_PWM_5,
CELL_PWM_DURA_0s1);
283                 //Serial.println("INI PWM5 " + String(CEL_em_analise, DEC));
284                 tarefa_atual = TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME;
285                 break;
286             case CELL_STATUS_FALHA_MEDIA:
287                 //Manipula_Celula_PEM((CEL_em_analise), CELL_PWM_10);
288                 Manipula_Celula_PEM((CEL_em_analise), CELL_PWM_20,
CELL_PWM_DURA_0s5);
289                 //Serial.println("INI PWM10 " + String(CEL_em_analise, DEC));
290                 tarefa_atual = TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME;
291                 break;
292             case CELL_STATUS_FALHA_GRAVE:
293                 Manipula_Celula_PEM((CEL_em_analise), CELL_PWM_50,
CELL_PWM_DURA_5s);
294                 //Serial.println("INI PWM100 " + String(CEL_em_analise, DEC));

```

```

295         tarefa_atual = TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME;
296         break;
297     default:
298         CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
299         tarefa_atual = TA_DO_NOTHING;
300         break;
301     }
302     //         if ((i > CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS) && (CEL_em_analise
< CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS)) {
303         //             // Analise completa
304         //             CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
305         //             tarefa_atual = TA_DO_NOTHING;
306         //         }
307         break;
308     case TA_WAIT_SHORT_CKT_TIME:
309         //Serial.println("Fim PWM " + String(CEL_em_analise, DEC));
310         Manipula_Celula_PEM(CEL_em_analise, CELL_DRIVE_OFF, 0);
311         //Serial.println("Fim PWM " + String(CEL_em_analise, DEC));
312         CEL_em_analise++;
313         tarefa_atual = TA_ANALIZE_PEM_READINGS;
314         break;
315     case TA_DIRECT_SHORT_CKT:
316         // Tarefa para manipulacao direta de curtos na celula
317         if (CEL_Number > 0) { // Quando CEL_Number
== 0, nada para desligar
318             Manipula_Celula_PEM(++CEL_Number, CELL_DRIVE_OFF, 0);
319             if (CEL_Number >= MAX_NUMBER_OF_CELLS)
320                 CEL_Number = 0;
321         }
322         if (++CEL_Number > 0) { // Quando CEL_Number ==
0, ligamos a celula 1
323             Manipula_Celula_PEM(++CEL_Number, CELL_DRIVE_ON, 0);
324         }
325         Serial.println(F("_____"));
326         tarefa_atual = TA_DO_NOTHING;
327         break;
328     case TA_DO_NOTHING:
329         if (time_to_read_ADC >= ADC_READ_MOMENT) {
330             time_to_read_ADC = 0;
331             tarefa_atual = TA_ADC_READ;
332         }

```

```
333     break;
334     default:
335         CEL_em_analise = CELLS_FISRT_CHANNEL;
336         tarefa_atual = TA_DO_NOTHING;
337         // Aqui pode ser gerado um informe de erro.
338         break;
339 }
340 }
341
342
343 /*      -----
344      ----- Manipula_Celula_PEM -----
345
346     PWM feito em SW porque nem todas as saida tem capacidade
347
348     Cel_num = Qual célula acionar o curto (1 a 13)
349
350 */
351 int Manipula_Celula_PEM(int Cel_Write_num, int tempo_on, int duracao)
352 {
353     int i;
354
355     if ((Cel_Write_num > MAX_NUMBER_OF_CELLS) || ((--Cel_Write_num) < 0)
|| (tempo_on >= PWM_MANUAL_PERIODO)) {
356         return (ERRO_CEL_FORA_DA_FAIXA);
357     }
358
359     if (tempo_on == CELL_DRIVE_OFF) {
360         digitalWrite(CelDrive_pin_Array[Cel_Write_num], CELL_DRIVE_OFF);
361     }
362     else {
363         // Faz PWM manual porque nem todos os pinos tem capacidade
364         for (i = 0; i < duracao; i++) {
365             digitalWrite(CelDrive_pin_Array[Cel_Write_num], CELL_DRIVE_ON);
366             delayMicroseconds(tempo_on);
367             digitalWrite(CelDrive_pin_Array[Cel_Write_num], CELL_DRIVE_OFF);
368             delayMicroseconds(PWM_MANUAL_PERIODO - tempo_on);
369         }
370     }
371     return (SEM_ERRO);
372 }
```

```

373
374 /*      -----
375          CALCULA
376          - media das voltagens entre celulas
377          - desvio padrao
378          - celulas divergentes
379
380
381 */
382 void calcula_infos_das_celulas(void)
383 {
384     int i;
385     float tmp;
386     CELLS_Media_ADC    = 0;
387     CELLS_Media_volts = 0;
388     CELLS_variancia    = 0;
389
390     for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++)
391     {
392         CELLS_Media_ADC += ADC_Vals_Read[i];
393         CELLS_Media_volts += ADC_Converted_Vals[i];
394     }
395     //Serial.print(String(F("media_soma = ")) + String(CELLS_Media_volts,
396     DEC));
397     //
398     CELLS_Media_ADC    /= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS;
399     CELLS_Media_volts /= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS;
400     //
401     for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++)
402     {
403         CELLS_variancia += pow(ADC_Converted_Vals[i] - CELLS_Media_volts, 2);
404     }
405     // Como estamos calculando sobre toda a amostra, entao dividimos por
406     n.
407     CELLS_variancia /= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS;
408     CELLS_desvio_padrao = sqrt(CELLS_variancia);           // Cálculo
409     do desvio padrão.
410     //
411     for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++)
412     {
413         tmp = ADC_Converted_Vals[i] - CELLS_Media_volts;

```

108

```
408     if (tmp < 0) {
409         // Tensao da celulas abaixo da media
410         tmp = abs(tmp);
411         if (tmp < CELLS_desvio_padrao) {
412             // Celula dentro da faixa de 1 desvio-padrao
413             CELLS_Acao[i] = CELL_GOOD;           // Marca como boa se a celula
ficou dentro do desvio padrao
414         }
415         else {
416             if (tmp < (2 * CELLS_desvio_padrao)) {
417                 // Celula dentro da faixa de 2 desvio-padrao
418                 CELLS_Acao[i] = CELL_STATUS_FALHA_PEQUENA;
419             }
420             else {
421                 // // Celula alem da faixa de 2 desvio-padrao
422                 CELLS_Acao[i] = CELL_STATUS_FALHA_MEDIA;
423             }
424         }
425     }
426     else {
427         // Celulas com tensao acima da media estao boas
428         CELLS_Acao[i] = CELL_GOOD;           // Marca como boa se a celula
ficou dentro do desvio padrao
429     }
430 }
431 }
432
433
434 /*      -----
435             IMPRIME os valores das entradas analogicas
436
437
438 */
439 void imprime_infos_entradas_analogicas(void)
440 {
441     float adc_Converted;
442     volatile int i = 0;
443
444     Serial.println(F(" "));
445     Serial.print(String(F("VIN (ADC)  \t")) + String(ADC_Vals_Read[0],
DEC));
```

```

446
447     Serial.println(String(F("\t\t VIN (V) \t")) +
String(ADC_Converted_Vals[i], FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT));
448 //
449 for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++)
{
450     Serial.print(String(F("CEL_ADC")) + String(i, DEC) + String(F("
\t")) + String(ADC_Vals_Read[i], DEC));
451     Serial.print(String(F("\t\t CEL (V) \t")) +
String(ADC_Converted_Vals[i], FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT));
452     Serial.println(String(F("\t Status \t")) + CELLS_Acao[i]);
453 }
454 //
455     Serial.print(String(F("T_CELS (ADC) \t")) + String(ADC_Vals_Read[i],
DEC));
456 // Imprime float com duas casas decimais
457     Serial.println(String(F("\t\t T_CELS (°C)\t")) +
String(ADC_Converted_Vals[i], 2));
458 //
459     Serial.print(String(F("T_Amb (ADC) \t")) + String(ADC_Vals_Read[++i],
DEC));
460     Serial.println(String(F("\t\t T_Amb (°C)\t")) +
String(ADC_Converted_Vals[i], 2));
461 //
462     Serial.print(String(F("\t\t\t\t\tMedia (ADC) \t")) +
String(CELLS_Media_ADC, DEC));
463     Serial.println(String(F("\t\t Media (V)\t")) +
String(CELLS_Media_volts, FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT));
464 //
465     Serial.print(String(F("\t\t\t\t\tVariancia \t")) +
String(CELLS_variancia, 5));
466     Serial.println(String(F("\t StDev \t")) + String(CELLS_desvio_padrao,
4));
467 //
468 }
469
470
471 /* -----
472     Funcao para entradas analogicas e guardar num vetor
473

```

```

474         - Leitura da tensão da células PEM em valores brutos, apenas
do ADC
475         - Converte as leituras brutas para unidades
476
477 */
478 void atualiza_array_entradas_analogicas(void)
479 {
480     int i = 0;
481
482     ADC_Vals_Read[i] = Media_Leituras_AD(ADC_pin_Array[i],
NUM_LEITURAS_ADC, DELAYus_LEITURAS_ADC);
483     // Calcula o valor de tensão da célula, calibra e faz a média com o
anterior.
484     ADC_Converted_Vals[i] = (ADC_Converted_Vals[i] + (ADC_Vals_Read[i] *
ADC_VCC_TO_VOLTS_SCALE * ADC_Val_Calibration[i])) / 2;
485     //
486     for (i = CELLS_FISRT_CHANNEL ; i <= CELLS_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++)
{
487         ADC_Vals_Read[i] = Media_Leituras_AD(ADC_pin_Array[i],
NUM_LEITURAS_ADC, DELAYus_LEITURAS_ADC);
488         // Calcula o valor de tensão da célula, calibra e faz a média com o
anterior.
489         ADC_Converted_Vals[i] = (ADC_Converted_Vals[i] + (ADC_Vals_Read[i] *
ADC_TO_PEM_VOLTS_SCALE * ADC_Val_Calibration[i])) / 2;
490     }
491     //
492     ADC_Vals_Read[i] = Media_Leituras_AD(ADC_pin_Array[i],
NUM_LEITURAS_ADC, DELAYus_LEITURAS_ADC);
493     // Da equação da reta calculada na planilha
494     ADC_Converted_Vals[i] = (ADC_Converted_Vals[i] + 43.9367 -
(ADC_Vals_Read[i] * 0.043936731107206)) / 2;
495     //ADC_Converted_Vals[i] = 43.9367 - (ADC_Vals_Read[i] *
0.043936731107206) * ADC_Val_Calibration[i];
496     //
497     ADC_Vals_Read[i] = Media_Leituras_AD(ADC_pin_Array[++i],
NUM_LEITURAS_ADC, DELAYus_LEITURAS_ADC);
498     ADC_Converted_Vals[i] = (ADC_Converted_Vals[i] + 43.9367 -
(ADC_Vals_Read[i] * 0.043936731107206)) / 2;
499     //ADC_Converted_Vals[i] = 43.9367 - (ADC_Vals_Read[i] *
0.043936731107206) * ADC_Val_Calibration[i];
500 }

```

```

501
502
503
504 /*      -----
505          ----- Inicializa todos os pinos -----
506
507 */
508 void inicializa_pinos(void)
509 {
510     int i;
511
512     for (i = 0; i < MAX_NUMBER_OF_CELLS; i++) {
513         pinMode(CelDrive_pin_Array[i], OUTPUT);
514         digitalWrite(CelDrive_pin_Array[i], CELL_DRIVE_OFF);
515     }
516
517     // Inicializa pinos do ADC como entradas
518     for (i = 0; i < ADC_MAX_NUMBER_OF_CHANNELS; i++) {
519         pinMode(ADC_pin_Array[i], INPUT);
520     }
521 }
522
523
524 /*      -----
525          - Faz NUM_LEITURAS_ADC do ADC e faz a media das medicoes de
valores centrais
526          - Retorna a media de NUM_LEITURAS_ADC realizadas
527
528 */
529 int  Media_Leituras_AD(int  ADC_Channel,  int  Num_Leituras,  int
Delay_Entre_leituras_us)
530 {
531     Num_Leituras += 2;      //Adquire duas amostras a mais para depois
descartar as duas piores
532     int tmp, Cont = 0;
533     bool Ordenar_Vetor = true;
534     int Aux, Cont_Anterir;
535     long Acumulador = 0;
536     int *Leituras = new int[Num_Leituras]; //Cria o vetor que irá salvar
as medições
537

```

```
538   Leituras[Cont++] = analogRead(ADC_Channel);           // Faz a primeira
leitura
539   if (Num_Leituras <= 1) {
540     tmp = Leituras[Cont];
541     delete[] Leituras;
542     return (tmp);
543   }
544   for (Cont; Cont < Num_Leituras; Cont++) {
545     if (Delay_Entre_leituras_us > 0) {
546       delayMicroseconds(Delay_Entre_leituras_us); // Aguarda um tempo,
se assim desejado
547     }
548     Leituras[Cont] = analogRead(ADC_Channel);           //Faz a proxima leitura
549   }
550   // Metodo de ordenacao booble
551   while (Ordenar_Vetor) {
552     Cont_Anterir = 0;
553     Ordenar_Vetor = false;
554     for (Cont = 1; Cont < Num_Leituras; Cont++) {
555       if (Leituras[Cont_Anterir] > Leituras[Cont]) {
556         Aux = Leituras[Cont_Anterir];
557         Leituras[Cont_Anterir] = Leituras[Cont];
558         Leituras[Cont] = Aux;
559         Cont_Anterir = Cont;
560         Ordenar_Vetor = true;
561       }
562       else {
563         Cont_Anterir++;
564       }
565     }
566   }
567   Num_Leituras -= 2;
568   // Faz a media com as leituras centrais, Descartando o menor e o maior
valor adquirido.
569   for (Cont = 1; Cont <= Num_Leituras; Cont++)
570     Acumulador += Leituras[Cont];
571   Acumulador = Acumulador / Num_Leituras;
572   delete[] Leituras;
573   return Acumulador;
574 }
575
```

```

576
577 /* -----
578     Funcao de teste
579     - ler entradas analogicas e imprimir os valores
580
581 */
582 // Configuracao do numero de leituras do ADC
583 #define NUM_LEITURAS_ADC          5
584 #define DELAYus_LEITURAS_ADC     50
585 #define FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT  9
586
587 void ler_entradas_analogicas(void)
588 {
589     int adc, i;
590     float adc_Converted;
591
592     adc = Media_Leituras_AD(VCC_READ_pin, NUM_LEITURAS_ADC,
593 DELAYus_LEITURAS_ADC);
594     Serial.print(String(F("VIN (ADC) = \t")) + String(adc, DEC));
595     adc_Converted = ((float) adc) * ADC_VCC_TO_VOLTS_SCALE;
596     Serial.println(String(F("\t\t VIN (V) = \t")) + String(adc_Converted,
597 FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT));
598     //delay(10);
599     //
600     // Leitura da tensão da celulas PEM
601     for (i = 1; i < 14; i++) {
602         adc = Media_Leituras_AD(ADC_pin_Array[i], NUM_LEITURAS_ADC,
603 DELAYus_LEITURAS_ADC);
604         //adc = analogRead(ADC_pin_Array[i]);
605         Serial.print(String(F("CEL_ADC")) + String(i, DEC) + String(F(" =
606 \t")) + String(adc, DEC));
607         //x = adc * ADC_TO_VOLTS_MAP * OPAMPs_SCALE;           // Calcula o valor
608 de tensao da celula
609         adc_Converted = adc * ADC_TO_PEM_VOLTS_SCALE;           // Calcula o
610 valor de tensao da celula
611         Serial.println(String(F(" \t\t CEL (V) =\t")) + String(adc_Converted,
612 FLOAT_DECIMAL_PLACES_PRINT));
613         //delay(10);
614     }
615     adc = Media_Leituras_AD(TEMPER_CELS_pin, NUM_LEITURAS_ADC,
616 DELAYus_LEITURAS_ADC);

```

114

```
609 Serial.print(String(F("TEMPER_CELS (ADC) =\t")) + String adc, DEC));
610 //
611 // Da equacao da reta calculada na planilha
612 adc_Converted = 43.9367 - (adc * 0.043936731107206);
613 Serial.println(String(F("\t TEMPER_CELS (°C) =\t")) +
String(adc_Converted, 2));
614 //
615 adc = Media_Leituras_AD(TEMPER_AMB_pin, NUM_LEITURAS_ADC,
DELAYus_LEITURAS_ADC);
616 //adc = analogRead(TEMPER_AMB_pin);
617 Serial.print(String(F("TEMPER_AMB (ADC) =\t")) + String(adc, DEC));
618 //
619 // Da equacao da reta calculada na planilha
620 adc_Converted = 43.9367 - (adc * 0.043936731107206);
621 Serial.println(String(F("\t TEMPER_AMB (°C) =\t")) +
String(adc_Converted, 2));
622 }
```


ANEXOS

Este anexo descreve alguns dos componentes principais da planta para estudos de geração de energia usando hidrogênio tal como instalada no laboratório H2 do CEESP/UFSM, foi elaborado a partir dos estudos de Frank Gonzatti em 2017, realizados em seu processo de qualificação para a tese de doutorado iniciando na página 107.

ANEXO A COMPONENTES DO LABORATÓRIO H2 – CEESP/UFSM

Este anexo especifica tecnicamente os componentes do protótipo da planta armazenadora de energia utilizado nos fundamentos práticos dos capítulos para modelagem, simulação e controle.

ANEXO A.1 ELETROLISADOR

O protótipo de armazenador de energia usando hidrogênio do CEESP/UFSM é composto por um eletrolisador alcalino, modelo comercial HP da empresa Italiana Piel-Mcphy, que pode ser visualizado na Figura A.1 e suas especificações na Tabela A.1.

Figura A.1 – Eletrolisador alcalino modelo comercial HP



Tabela A.1 – Principais especificações do eletrolisador

Especificações	
Pressão de trabalho	até 15 barg
Produção máxima de hidrogênio	400 NL/h
Produção máxima de oxigênio	200 NL/h
Pureza do hidrogênio	99,5 + 0,2 %
Alimentação	220 V / 60 Hz
Consumo máximo de energia elétrica	3kWh
Consumo máximo de água	0,4 L/h
Número de cátodos e ânodos	30

Fonte: Piel/Mcphy.

Conforme as especificações do fabricante das CaC, a pureza mínima do hidrogênio deve ser de 99,995%. Segundo as especificações técnicas descritas na Tabela A.1, o eletrolisador gera hidrogênio apenas com pureza de 99,5%. Para se elevar o grau de pureza do hidrogênio e assim garantir o bom funcionamento e durabilidade da célula a combustível, o eletrolisador foi dotado de um purificador de hidrogênio na sua saída, elevando assim o grau de pureza do hidrogênio para 99,999%. O módulo purificador pode ser visto na Figura A.2.

Figura A.2 – Purificador de hidrogênio



Fonte: Gonzatti (2015).

Para reduzir a quantidade dos minérios contidos da água de eletrólise, a planta conta com um desmineralizador modelo comercial OSMODEMI 8 com capacidade de processar até 8 L/h, mostrado na Figura A.3.

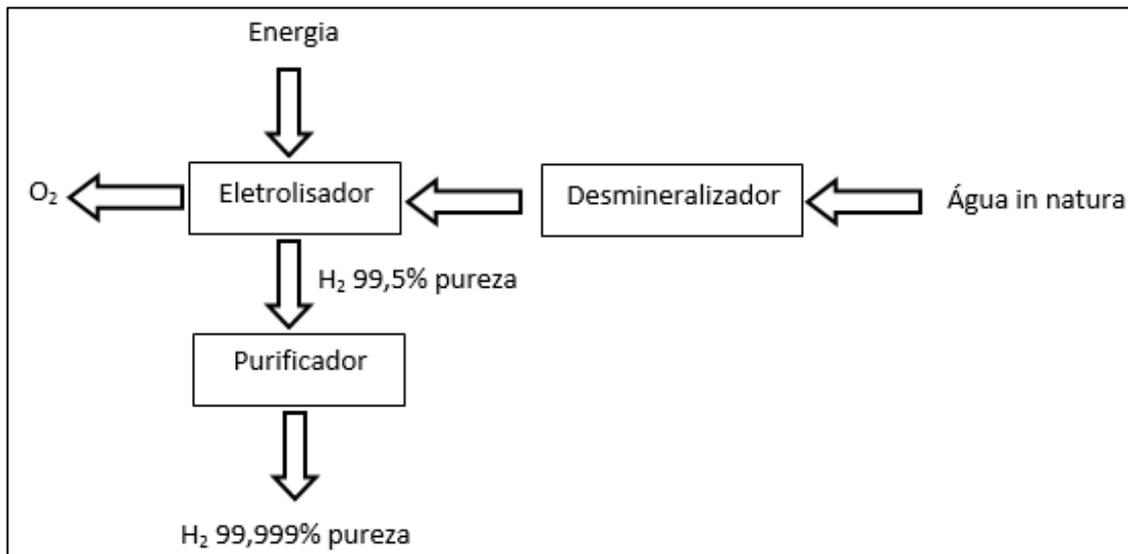
Figura A.3 – Desmineralizador utilizado no protótipo



Fonte: Gonzatti (2015).

Os equipamentos, que formam o sistema de geração de hidrogênio, aptos para gerar hidrogênio a ser armazenado ou consumido pela CaC, foram montados conforme o esquema da Figura A.4.

Figura A.4 – Esquema da montagem do gerador de hidrogênio

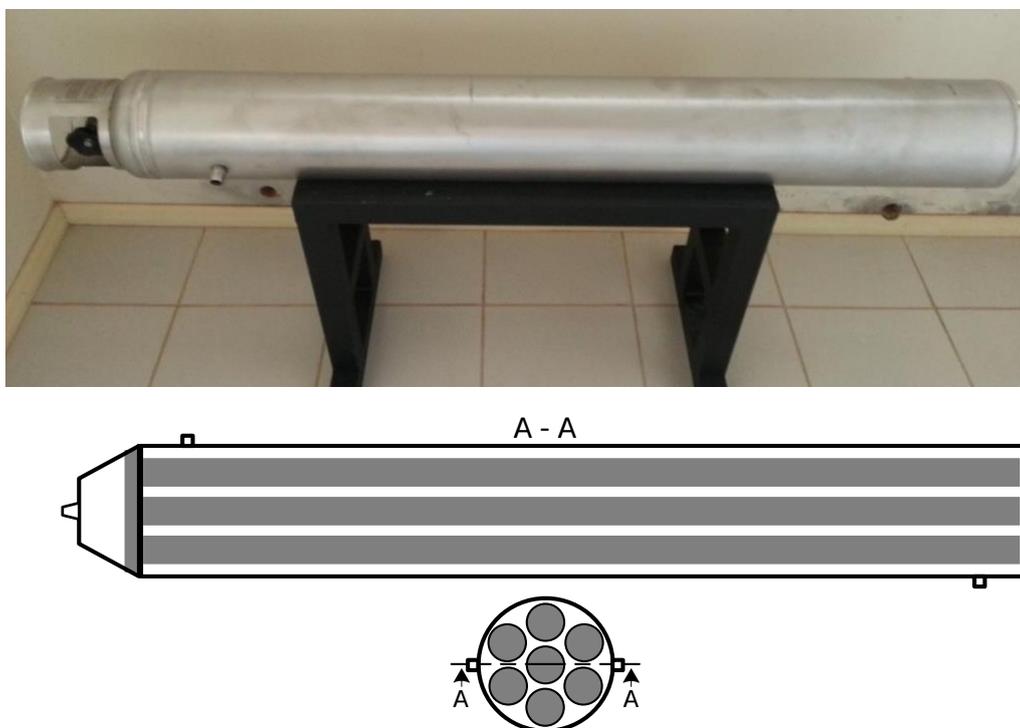


Fonte: Gonzatti (2015).

ANEXO A.2 – CILINDRO COM LIGA DE HIDRETO METÁLICO

O cilindro com a liga de hidreto metálico utilizado na planta é o modelo HBond-7000L composto de uma liga com 32,1% de Lantânio mais Cério e 67% de Níquel (LaCe)Ni₅. Internamente, um cilindro de 16,8 cm de diâmetro possui internamente sete cilindros menores, de 5 cm cada um, que contêm a liga metálica, conforme a Figura A.5. O restante do volume do cilindro é destinado à circulação de água para trocas térmicas nos processos de adsorção ou dessorção de hidrogênio.

Figura A.5 – Cilindro com liga de hidreto metálico HBond-7000L



Fonte: Gonzatti (2015).

Algumas especificações técnicas desse cilindro são apresentadas na Tabela A.2. Estes dados estão sendo utilizados para fins de operação e controle.

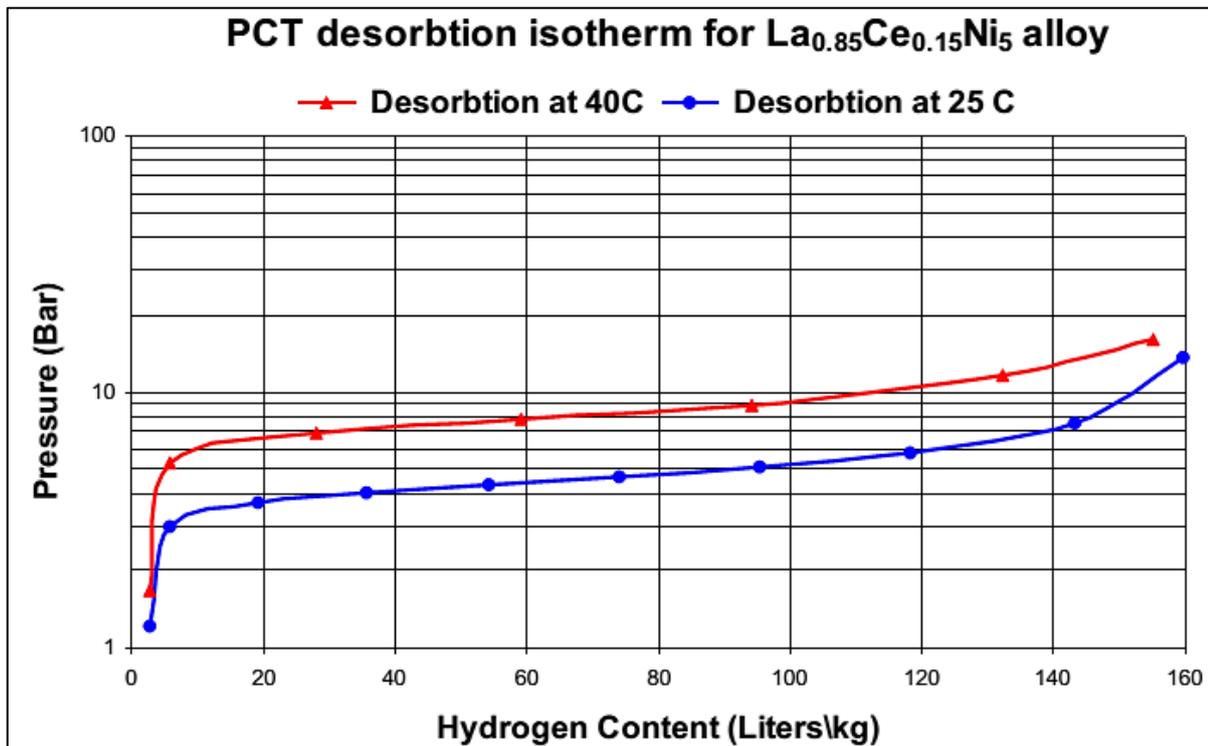
Tabela A.2 – Principais especificações da liga de hidreto metálico utilizada

Descrição	Especificação
Composição química	(LaCe)Ni ₅
Pressão de carga	≤ 15 bar
Temperatura de carga	20 a 25°C
Pressão de descarga	2 a 10 bar
Temperatura de descarga	10 a 30°C
Pureza mínima do H ₂	99,9%
Capacidade de armazenamento de H ₂	7140 L (0,64 kg)
Massa de (LaCe)Ni ₅	46 kg

Fonte: LabTech.

Para a operação e simulação do MH é necessário conhecer as curvas isotérmicas PCT que fornecem a pressão para dada quantidade de hidrogênio armazenado a determinada temperatura. Para a liga metálica utilizada, as curvas PCT estão descritas na Figura A.6.

Figura A.6 – Curva isotérmica PCT da liga de hidreto metálico utilizada



Fonte: LabTech.

ANEXO A.3 – PILHA DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL

O módulo gerador que compõe o protótipo é o GreenHub Powerbox 3000, da empresa italiana Horizon Fuel Cells Technologies contendo a pilha H-3000 produzido pela mesma empresa e que é mostrado na Figura A.7.

Figura A.7 – Módulo GreenHub Powerbox 3000



Fonte: Gonzatti (2015).

Este módulo já vem dotado com alguns dos controles básicos da pilha CaC como: temperatura, pressão de entrada dos reagentes, curto-circuito para reestabelecer a tensão e dispositivos de proteção do módulo. O módulo também possui um conversor que fornece uma tensão de 220V/60Hz. As características do módulo estão descritas na tabela A.3.

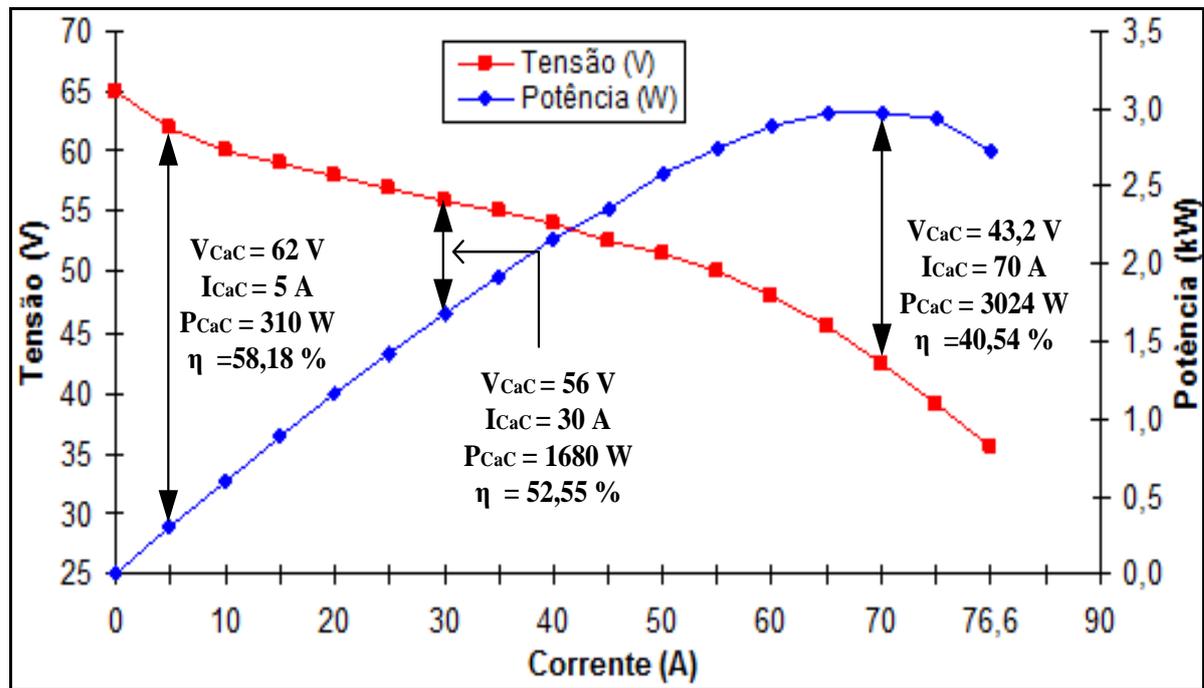
Tabela A.3 – Dados da pilha e do módulo

Descrição	Especificação
Modelo comercial	H-3000
Tipo de célula a combustível	PEM
Números de células da pilha	72
Potência máxima de pico	3000 W
Tensão máxima da pilha	65 V
Potência nominal	2550 W
Potência máxima de pico (por 30 segundos)	2600 W
Potência máxima de pico (por 5 segundos)	2700 W
Pressão do hidrogênio na entrada da pilha	0,45 bar a 0,55 bar
Pressão do hidrogênio na entrada do módulo	7 a 10 bar
Desempenho da CaC	43,2 V @ 70 A
Reagentes	Hidrogênio e ar atmosférico
Temperatura externa	5 a 30 °C
Umidade externa relativa	0 a 80%, sem condensação
Temperatura máxima da pilha	65 °C
Pureza do hidrogênio	>= 99,995 %
Umidificação	Auto-umidificada
Resfriamento	Ar (ventilador)
Consumo máximo de hidrogênio	42 L/min
Tempo de inicialização (Start-up)	<= 30 seg. a temperatura ambiente
Eficiência da pilha	40 % @ 43,2 V
Desligamento tensão baixa	36 V
Desligamento na máxima corrente	90 A
Desligamento temperatura alta	65°C
Calor máximo na saída de ar	2550 W

Fonte: Horizon Fuel Cells Technologies.

Tomando por base os dados fornecidos pelo fabricante, foi plotada a curva de polarização e de potência da pilha, que estão descritas na Figura A.8.

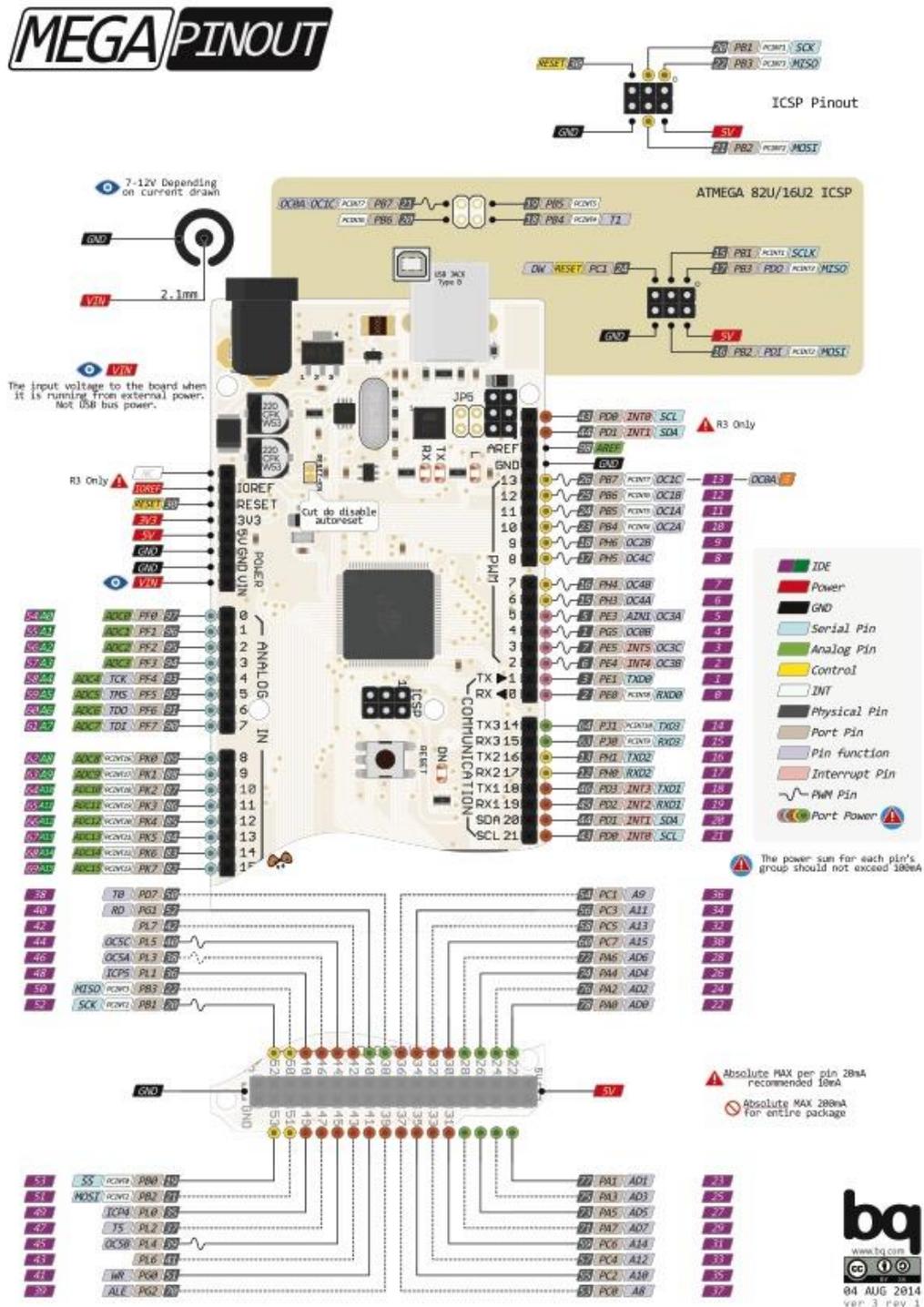
Figura A.8 – Potência, rendimento e tensão em função da corrente da CaC



Fonte: Horizon Fuel Cells Technologies.

ANEXO B ESPECIFICAÇÃO DE COMPONENTES

Figura B.1 – Funcionalidades dos pinos do Arduino Mega



Fonte: <http://diwo.bq.com/pinout-mega/>

Figura B.2 – Características principais do microcontrolador



Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 × 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
 - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 64K/128K/256KBytes of In-System Self-Programmable Flash
 - 4Kbytes EEPROM
 - 8Kbytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles:10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
 - Endurance: Up to 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch™ library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix acquisition
 - Up to 64 sense channels
- JTAG (IEEE® std. 1149.1 compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare- and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four 8-bit PWM Channels
 - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Output Compare Modulator
 - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 54/86 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFN/MLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/Fully Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 500µA
 - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V

Figura B.3 – Especificação do MOSFET



PSMN0R9-25YLC

N-channel 25 V 0.99 mΩ logic level MOSFET in LFPACK using NextPower technology

Rev. 2 — 4 July 2011

Product data sheet

1. Product profile

1.1 General description

Logic level enhancement mode N-channel MOSFET in LFPACK package. This product is designed and qualified for use in a wide range of industrial, communications and domestic equipment.

1.2 Features and benefits

- High reliability Power SO8 package, qualified to 175°C
- Optimised for 4.5V Gate drive utilising NextPower Superjunction technology
- Ultra low QG, QGD and QOSS for high system efficiencies at low and high loads
- Ultra low R_{dson} and low parasitic inductance

1.3 Applications

- DC-to-DC converters
- Lithium-ion battery protection
- Load switching
- Power OR-ing
- Server power supplies
- Sync rectifier

1.4 Quick reference data

Table 1. Quick reference data

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
V _{DS}	drain-source voltage	25 °C ≤ T _j ≤ 175 °C	-	-	25	V
I _D	drain current	T _{mb} = 25 °C; see Figure 1	0	-	100	A
P _{tot}	total power dissipation	T _{mb} = 25 °C; see Figure 2	-	-	272	W
T _j	junction temperature		-55	-	175	°C
Static characteristics						
R _{DSon}	drain-source on-state resistance	V _{GS} = 4.5 V; I _D = 25 A; T _j = 25 °C; see Figure 12	-	0.95	1.25	mΩ
		V _{GS} = 10 V; I _D = 25 A; T _j = 25 °C; see Figure 12	-	0.75	0.99	mΩ

nexperia

Figura B.4 – Especificação do AD820



Single-Supply, Rail-to-Rail, Low Power, FET Input Op Amp

AD820

FEATURES

True single-supply operation

Output swings rail-to-rail

Input voltage range extends below ground

Single-supply capability from 5 V to 30 V

Dual-supply capability from ± 2.5 V to ± 15 V

Excellent load drive

Capacitive load drive up to 350 pF

Minimum output current of 15 mA

Excellent ac performance for low power

800 μ A maximum quiescent current

Unity-gain bandwidth: 1.8 MHz

Slew rate of 3 V/ μ s

Excellent dc performance

800 μ V maximum input offset voltage

2 μ V/ $^{\circ}$ C typical offset voltage drift

25 pA maximum input bias current

Low noise: 13 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 kHz

APPLICATIONS

Battery-powered precision instrumentation

Photodiode preamps

Active filters

12-bit to 14-bit data acquisition systems

Medical instrumentation

Low power references and regulators

GENERAL DESCRIPTION

The AD820 is a precision, low power FET input op amp that can operate from a single supply of 5 V to 36 V, or dual supplies of ± 2.5 V to ± 18 V. It has true single-supply capability, with an input voltage range extending below the negative rail, allowing the AD820 to accommodate input signals below ground in the single-supply mode. Output voltage swing extends to within 10 mV of each rail, providing the maximum output dynamic range.

Offset voltage of 800 μ V maximum, offset voltage drift of 2 μ V/ $^{\circ}$ C, typical input bias currents below 25 pA, and low input voltage noise provide dc precision with source impedances up to 1 G Ω . 1.8 MHz unity gain bandwidth, -93 dB THD at 10 kHz, and 3 V/ μ s slew rate are provided for a low supply current of 800 μ A. The AD820 drives up to 350 pF of direct capacitive load and provides a minimum output current of 15 mA. This allows the amplifier to handle a wide range of load conditions. This combination of ac and dc performance, plus the outstanding load drive capability, results in an exceptionally versatile amplifier for the single-supply user.

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

PIN CONFIGURATIONS

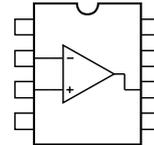


Figure 1. 8-Lead PDIP

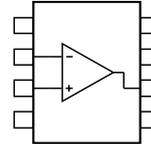


Figure 2. 8-Lead SOIC_N and 8-Lead MSOP

The AD820 is available in two performance grades. The A and B grades are rated over the industrial temperature range of -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$. The AD820 is offered in three 8-lead package options: plastic DIP (PDIP), surface mount (SOIC) and (MSOP).

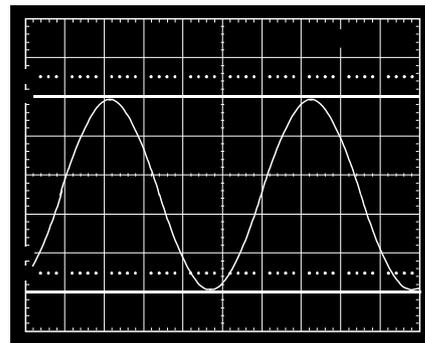


Figure 3. Gain-of-2 Amplifier; $V_s = 5$ V, 0 V, $V_{in} = 2.5$ V Sine Centered at 1.25 V

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©1996–2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.