

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Diogo Franchi

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO E O  
MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE UMA PILHA DE  
CAC/PEM UTILIZANDO SENSOR MATRICIAL INFRAVERMELHO**

Santa Maria, RS  
2018

**Diogo Franchi**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO E O  
MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE UMA PILHA DE CAC/PEM  
UTILIZANDO SENSOR MATRICIAL INFRAVERMELHO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como parte dos requisitos para obtenção do grau de bacharel em **Engenharia de Controle e Automação**.

Orientador: Prof. Dr. Frank Gonzatti

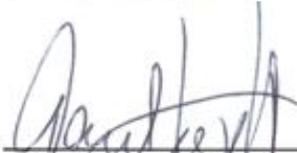
Santa Maria, RS  
2018

**Diogo Franchi**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO E O  
MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE UMA PILHA DE CAC/PEM  
UTILIZANDO SENSOR MATRICIAL INFRAVERMELHO**

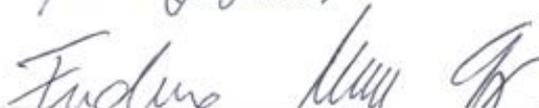
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como parte dos requisitos para obtenção do grau de bacharel em **Engenharia de Controle e Automação**.

**Aprovado em 19 de fevereiro de 2018:**



---

**Frank Gonzatti, Dr. (UFSM)**  
(Orientador)



---

**Frederico Menine Schaf, Dr. (UFSM)**



---

**Vinicius Nizolli Kuhn, Me. (IF-SUL)**

Santa Maria, RS  
2018

## **DEDICATÓRIA**

*À minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e aos santos possuo fé, em especial à N. S<sup>a</sup> do Rosário, por terem sempre iluminado meus caminhos. Ajudando-me a ter força e a não desistir nos momentos de fraquezas e dificuldades.

Aos meus pais, Osmar e Jaqueline, por todo o amor, incentivo e apoio. Sois os meus exemplos de determinação, garra e parceria.

Ao meu irmão, Édipo, pelas orientações, incentivos, zelo e amizade. Admiro-te.

Aos meus avós (*in memoriam*), Armindo e Modesta, por todo o carinho e zelo. Sou grato às boas recordações que proporcionaram.

Aos demais familiares, por rezar e torcer por mim. Obrigado pelos inúmeros momentos de descontração e afeto.

À minha namorada, Luísa Iop, pelo amor, dedicação, e principalmente compreensão nessa jornada turbulenta. Obrigado por sempre acreditar e torcer por mim.

Ao professor Frank Gonzatti, por todos os ensinamentos compartilhados, exemplo de boa vontade, e momentos de reflexão e descontração.

Aos colegas Vinicius Kuhn e Maicon Miotto, por todo o auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho, foram fundamentais. À eles e aos demais colegas do laboratório do CEESP, Fredi Ferigolo, Emerson da Silva, e Emanuel Vieira, por todas as trocas de conhecimento e momentos de descontrações. Com certeza colaboraram para o ambiente saudável e agradável de estudo.

À instituição UFSM, que torna possível o desenvolvimento pessoal e profissional de seus integrantes. Ao mesmo tempo, estendo-o ao professor Felix Farret, por disponibilizar o laboratório do CEESP para a realização deste trabalho.

À todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram e participaram desta caminhada em busca de conhecimento e aprimoramento. Sem sombra de dúvidas, todos, pelas mais diferentes maneiras, foram essenciais para esta conquista.

Não te preocupes com os que não te conhecem, mas esforça-te por seres digno de ser conhecido.

(Confúcio)

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA A MEDIÇÃO E O MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE UMA PILHA DE CaC/PEM UTILIZANDO SENSOR MATRICIAL INFRAVERMELHO

AUTOR: Diogo Franchi  
ORIENTADOR: Frank Gonzatti

Com o crescente aumento na demanda de energia elétrica, concomitante às ações que buscam minimizar a poluição do meio ambiente, busca-se apoio nas fontes de energias renováveis e limpas. Uma fonte geradora que mostra-se promissora é a célula de combustível, que unida a outros componentes, podem atuar como armazenadores de energia. Um protótipo com esta configuração foi montado no laboratório do CEESP/UFSM para fins de pesquisa e o emprego de diferentes tecnologias. Este protótipo conta com eletrolisador tipo alcalino, hidretos metálicos e células a combustível do tipo PEM. O funcionamento das CaC constitui-se basicamente de processos físico-químicos, onde a temperatura tem uma forte influência na sua operação, bem como na sua vida útil. Por isso é fundamental realizar o controle e o monitoramento da temperatura. Entretanto, este monitoramento não é trivial, uma vez que a distribuição da temperatura no perfil da pilha não é homogênea, e possuem partes de grafite, que é condutivo, ou seja, o sensor deve ser isolado para que o mesmo não curto-circuite as células. Uma solução adotada no protótipo foi a utilização de sensores termopares, devido às suas pequenas dimensões, permitindo serem inseridos nos canais das células. Porém, este sensor precisa de um condicionador de sinal individual, e se o objetivo for mapear a temperatura de toda a área da pilha, necessita-se de uma rede de termopares, que acaba elevando os custos e bloqueando o fluxo de ar nos canais que possuem os sensores. A proposta deste trabalho é o emprego de sensores infravermelhos para monitorar a temperatura da pilha de CaC do protótipo presente no CEESP. Desse modo, consegue-se obter um maior número de pontos de medições e evita-se o contato físico com a pilha. O sensor matricial infravermelho utilizado necessita de alguns tratamentos via *software* para calibrá-lo para esta aplicação específica. Os dados de temperatura do sensor, após calibrados, são exibidos na forma de uma imagem térmica em dois locais distintos: no supervisor de controle e monitoramento da planta armazenadora, e em um display junto ao gabinete da pilha de CaC. Com o uso deste sensor, obtém-se não somente a imagem térmica da pilha, que possibilita o estudo do comportamento da temperatura em toda sua extensão, mas também as temperaturas máxima e média, garantindo que a temperatura da pilha não atinja níveis críticos que possam comprometer sua vida útil ou mesmo inutilizá-la. Neste trabalho, são apresentados os componentes eletroeletrônicos utilizados, a comunicação entre eles, os códigos desenvolvidos e o projeto e dimensionamento de uma placa de circuito impresso modular e do suporte que garante a localização correta do sensor infravermelho junto ao gabinete da pilha de CaC. Por fim, são demonstrados os resultados alcançados com o uso deste sensor na pilha de CaC.

**Palavras-chave:** Célula a Combustível. Sensor infravermelho. Automação.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF A PROTOTYP FOR MEASUREMENT AND TEMPERATURE MONITORING OF A STACK CaC/PEM USING INFRARED MATRIX SENSOR

AUTHOR: Diogo Franchi  
ADVISOR: Frank Gonzatti

With the increasing increase in the demand for electric energy, together with the actions that seek to minimize pollution of the environment, seeking support in renewable and clean energy sources. A generating source that shows up promising is the fuel cell, which, together with other components, can act as energy storage. One prototype with this configuration was set up in the CEESP/UFSM laboratory for research purposes and the employ of different technologies. This prototype has an alkaline type electrolyzer, metallic hydrides and PEM type fuel cells. The operation of the CaC make up basically of physical-chemical processes, where the temperature has a high influence in its operation, as well as in its useful life. Therefore it is essential to carry out temperature control and monitoring. However, this monitoring isn't trivial, since the temperature distribution on the stack profile is not homogeneous, and it has graphite parts, which it is conductive, ie the sensor must be isolated so that it does not short-circuit the cells. One solution adopted in the prototype was the use of thermocouple sensors, due to their small dimensions, allowing it to be inserted in the channels of the cells. However, this sensor needs an individual signal conditioner, and if want to map the temperature of the whole area of the stack, a network of thermocouples is needed, which ends up raising costs and blocking the reaction airflow in the channels that have the sensors. The proposal of this work is the use of infrared sensors to monitor the temperature of the CaC stack of the prototype present in CEESP. In this way, a greater number of measuring points can be obtained and physical contact with the stack is avoided. The infrared matrix sensor used requires some treatments across software to calibrate it for this specific application. The sensor temperature data, after calibration, are displayed as a thermal image at two different locations: in the control and monitoring supervisor of the storage plant, and one display united to the CaC stack cabinet. With the use of this sensor, obtain up not only the thermal image of the stack, which allows the study of the temperature behavior throughout its length, but also the maximum and average temperatures, guaranteeing that the temperature of the stack does not reach critical levels that it can compromise its useful life or even render it unusable. In this work, are presented the electronic components used, the communication between them, the developed codes and the design and dimensioning of a modular printed circuit board and of the support that ensures the correct location of the infrared sensor united to the cabinet of the stack CaC. Finally, are demonstrate the results achieved with the use this sensor on the stack CaC.

**Keywords:** Fuel Cell. Infrared sensor. Automation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Geração de eletricidade no mundo por combustível .....	16
Figura 2.2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	16
Figura 2.3 – Operação simplificada de uma célula a combustível .....	18
Figura 2.4 – Temperatura e umidade relativa para $\lambda=2$ e $\lambda=4$ .....	21
Figura 3.1 – Principais componentes de um conversor e armazenador de energia utilizando o hidrogênio.....	23
Figura 3.2 – Energia elétrica consumida e fornecida pela planta de conversão e armazenamento de energia para 7100 L de hidrogênio.....	24
Figura 3.3 – Tela do supervisor de monitoramento e controle da CaC.....	25
Figura 3.4 – Sensores termopares acondicionados na pilha de CaC .....	27
Figura 3.5 – Ventiladores traseiros da pilha CaC para controle da temperatura.....	27
Figura 3.6 – Imagens termográficas da pilha de CaC em seis operações distintas .....	28
Figura 4.1 – Sensor de temperatura infravermelho MLX90614: (a) invólucro do sensor; (b) esquemático das conexões do sensor.....	32
Figura 4.2 – Sensor de temperatura infravermelho MLX90621: (a) invólucros para diferentes ângulos de abertura; (b) ilustração da matriz de varredura .....	33
Figura 4.3 – Vistas ortogonais do sensor AMG8833 e sua matriz de <i>pixels</i> .....	34
Figura 4.4 – Ângulo de visão do sensor AMG8833.....	34
Figura 4.5 – Esquemático de ligação como escravo no endereço alto (VDD).....	35
Figura 4.6 – Área de incidência do sensor infravermelho com o distanciamento do objeto....	36
Figura 4.7 – Objetos utilizados para aferição da temperatura e imagem térmica: (a) imagem real; (b) imagem termográfica.....	37
Figura 4.8 – Imagens térmicas aferidas pelo sensor AMG8833: (a) <i>pixel</i> sobre os objetos; (b) <i>pixel</i> parcialmente sobre os objetos.....	37
Figura 4.9 – Ajuste focal na câmera térmica TiR1 da Fluke: (a) foco regulado para o objeto; (b) objeto fora de foco .....	38
Figura 4.10 – Código gerado no <i>software</i> MATLAB® para comunicação e visualização da imagem térmica capturada pelo sensor infravermelho .....	39
Figura 4.11 – Matriz gerada a partir dos 64 <i>pixels</i> do sensor infravermelho .....	39
Figura 4.12 – Interpolação de uma matriz de 3x3 (9 pontos) para outra de 5x5 (25 pontos)....	40
Figura 4.13 – Matriz de 20x20 (400 pontos) interpolada de uma 8x8 (64 pontos).....	41
Figura 4.14 – Amplitude dos <i>pixels</i> modificadas pela sua diferença da média.....	42
Figura 4.15 – Definição dos fatores “maior” e “menor” para que os <i>pixels</i> extremos do sensor atinjam as temperaturas máximas e mínimas identificadas pela câmera térmica .....	43
Figura 4.16 – Fluxograma simplificado da metodologia para calibração do sensor .....	44
Figura 4.17 – Matriz gerada após o tratamento dos valores dos <i>pixels</i> .....	45
Figura 4.18 – Equação que representa o “fator maior” da calibragem dos dados do sensor....	46
Figura 4.19 – Equação que representa o “fator menor” da calibragem dos dados do sensor...	46
Figura 4.20 – Diferença entre as temperaturas máximas das amostras .....	47
Figura 4.21 – Diferença entre as temperaturas mínimas das amostras.....	47
Figura 4.22 – Diferença entre as temperaturas médias das amostras .....	48
Figura 4.23 – Distribuição normal das diferenças da temperatura máxima esperada e obtida	48
Figura 4.24 – Comunicação entre os componentes do sistema .....	49
Figura 4.25 – Conversor de nível lógico bidirecional .....	51
Figura 4.26 – Fluxograma da rotina implementada no ARDUINO MEGA 2560 .....	52
Figura 4.27 – Codificação dos dados para a transmissão (variação de 0,25°C).....	54

Figura 4.28 – Esquemático de ligação para o MAX232, com <i>pull-up</i> .....	55
Figura 4.29 – Conexões entre os dispositivos .....	55
Figura 4.30 – Decodificação dos dados recebidos (variação de 0,25°C).....	57
Figura 4.31 – Código desenvolvido no <i>LabVIEW</i> <sup>®</sup> para receber a temperatura média e máxima .....	58
Figura 4.32 – Código desenvolvido no <i>LabVIEW</i> <sup>®</sup> para receber os dados do sensor AMG8833 .....	58
Figura 4.33 – Tela do supervisor modificada, aba da pilha de CaC.....	59
Figura 4.34 – Escala de cores RGB escolhida para construção da imagem térmica.....	61
Figura 4.35 – Fluxograma da definição da cor (R,G,B) de um <i>pixel</i> .....	62
Figura 4.36 – Imagem térmica exibida no <i>display</i> .....	63
Figura 4.37 – Diagrama esquemático do circuito eletrônico da placa desenvolvida .....	65
Figura 4.38 – <i>Layout</i> da placa de circuito impresso modular ao ARDUINO MEGA.....	66
Figura 4.39 – Representação 3D da placa de circuito impresso desenvolvida.....	66
Figura 4.40 – Placa de circuito impresso confeccionada.....	67
Figura 4.41 – Localização do sensor diante da pilha de CaC.....	68
Figura 4.42 – Abertura na tampa do gabinete da pilha de CaC.....	68
Figura 4.43 – Dimensionamento do suporte para confecção prática.....	69
Figura 4.44 – Vistas em 3D do suporte preso à tampa do gabinete da pilha de CaC.....	70
Figura 4.45 – Suporte metálico real preso à tampa do gabinete da pilha de CaC .....	70
Figura 4.46 – Condicionamento do sensor ao suporte metálico confeccionado .....	71
Figura 4.47 – Temperaturas de operação da pilha de CaC, aferidas pelos sensores termopares e infravermelho .....	72
Figura 4.48 – Imagem térmica da pilha de CaC no <i>display</i> instalado próximo a planta.....	72
Figura 4.49 – Imagem térmica da pilha de CaC no supervisor da planta.....	73
Figura 4.50 – Gabinete da pilha de CaC com o suporte para o sensor, microcontroladores e <i>display</i> local .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo entre algumas características de CaC de acordo com seus eletrólitos .....	19
Tabela 3.1 – Principais características da pilha de CaC do tipo PEM H-3000 .....	25
Tabela 3.2 – Principais características da câmara térmica .....	29
Tabela 4.1 – Especificações das principais características do sensor AMG8833 .....	34
Tabela 4.2 – Principais características do ARDUINO MEGA 2560 .....	50
Tabela 4.3 – Principais funções da biblioteca UTFT.h .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEESP	Centro de excelência em energia e sistemas de potência
CaC	Células a combustível
PEFC	<i>Polymer exchange fuel cell</i>
PEMFC	<i>Proton exchange membrane fuel cell</i>
PEM	<i>Proton exchange membrane</i>
$\lambda$	Razão estequiométrica
SRAM	<i>Static random access memory</i>
RGB	<i>Red, green, blue</i>
USB	<i>Universal serial bus</i>
TTL	<i>Transistor-transistor logic</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1	GERAÇÃO DE ENERGIA .....	15
2.2	CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	17
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	22
<b>3</b>	<b>PLANTA DE CONVERSÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA</b> .....	23
3.1	PILHA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM .....	25
3.1.1	<b>Controle e monitoramento da temperatura da pilha de células a combustível</b> .....	26
3.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	29
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MONITORAMENTO DA TEMPERATURA</b> .....	31
4.1	SENSORES INFRAVERMELHOS .....	31
4.1.1	<b>Sensor de temperatura infravermelho MLX90614</b> .....	31
4.1.2	<b>Sensor de temperatura infravermelho MLX90621</b> .....	32
4.1.3	<b>Sensor matricial infravermelho GRID-EYE AMG8833</b> .....	33
4.2	LIMITAÇÕES DO SENSOR GRID-EYE AMG8833 .....	35
4.3	COMPENSAÇÕES PARA O SENSOR VIA <i>SOFTWARE</i> .....	38
4.3.1	<b>Interpolação</b> .....	40
4.3.2	<b>Contraste</b> .....	41
4.3.3	<b>Fator de ajuste</b> .....	42
4.3.4	<b>Validação da metodologia de calibração via <i>software</i></b> .....	47
4.4	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DOS COMPONENTES DO SISTEMA .....	49
4.4.1	<b>Desenvolvimento entre o sensor AMG8833 e o ARDUINO MEGA 2560</b> .....	50
4.4.2	<b>Desenvolvimento entre o ARDUINO MEGA 2560 e o computador</b> .....	51
4.4.3	<b>Desenvolvimento entre o ARDUINO, ligado ao sensor, e o <i>display</i></b> .....	60
4.5	PROJETO E CONSTRUÇÃO FÍSICA DOS DISPOSITIVOS .....	64
4.5.1	<b>Placa de circuito impresso</b> .....	64
4.5.2	<b>Suporte para o sensor AMG8833</b> .....	67
4.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	71
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	76
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	78
	<b>ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> ARDUINO PARA LEITURA DO SENSOR, CONDICIONAMENTO DOS DADOS E COMUNICAÇÃO</b> .....	82
	<b>ANEXO B - CÓDIGO NO MATLAB® PARA COMUNICAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DA IMAGEM TÉRMICA DO SENSOR INFRAVERMELHO</b> .....	86
	<b>ANEXO C - CÓDIGO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> ARDUINO PARA COMUNICAÇÃO, CONDICIONAMENTO DOS DADOS, ESCALA DE COR E VISUALIZAÇÃO DA IMAGEM TÉRMICA NO DISPLAY</b> .....	88
	<b>ANEXO D – PROJEÇÃO ORTOGRÁFICA DAS DIMENSÕES DO SUPORTE PRESO A TAMPA DO GABINETE DA PILHA DE CAC</b> .....	93

## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante pelo desenvolvimento tecnológico, que têm auxiliado na vida das pessoas das mais variadas formas, acarreta em um aumento no consumo de energia elétrica, sendo preocupante o modo como são convertidas as energias encontradas na natureza em energia elétrica para suprir essa demanda. Atualmente, no Brasil, a maior parte da energia elétrica gerada é advinda das usinas hídricas e térmicas, sendo que as hidrelétricas se detêm à uma grande mudança ambiental/local para a instalação e operação, e as termoelétricas pela grande poluição do ar.

Com o objetivo de diminuir o uso de fontes cujas transformações de energia são poluentes, e até mesmo de fontes com alto risco de operação (usinas nucleares), vem surgindo com grande força as aplicações de energias renováveis. Estes tipos de fontes de energias são a fotovoltaica, eólica, células a combustível (CaC), dentre outras.

As tecnologias envolvidas com as energias renováveis vêm se consolidando com o passar dos anos, de modo que já existem diversos parques em grandes escalas de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos, por exemplo. Entretanto, ainda há outros meios de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis que não estão difundidas nas mesmas proporções, como as células a combustível. Assim, mesmo que estas tecnologias já estejam consolidadas ou não, sempre há espaço para colaborar no sentido de melhorar o aproveitamento delas.

Portanto, dentro da linha de células a combustível é fundamental o monitoramento de diversas variáveis durante sua operação a fim de se obter seu melhor desempenho e garantir a segurança da mesma. Uma das grandezas físicas que mais influencia nestes dois fatos é a temperatura da célula a combustível pois a mesma afeta diretamente a umidade da membrana, podendo limitar a sua vida útil ou até mesmo inutilizar a pilha no caso de sobretemperatura.

O monitoramento da temperatura de uma pilha de CaC comumente é realizado por um único sensor, distante da pilha, que indica a temperatura interna do equipamento que a detém, ou então, dois sensores medindo a temperatura do ar de entrada e de saída da pilha. Aferir a temperatura de uma pilha de células a combustível não é trivial, visto que o contato físico pode curto-circuitar as células que são constituídas de grafite ou impedir o fluxo de ar reagente no local onde o sensor venha a ser instalado. Assim, o uso de um sensor com pequenas dimensões viabiliza a medição da temperatura de alguma região específica da pilha sem a curto-circuitar

por contato, mas conforme maior for esta pilha, maior será a rede de sensores para a medição da temperatura em todo o perfil da pilha, o que geram custos e ainda afeta no fluxo de ar nos locais de instalações dos sensores.

Este trabalho apresenta uma proposta para a medição da temperatura de uma pilha de CaC do tipo PEM com o uso de um sensor matricial infravermelho, ou seja, sem contato físico com a pilha. Assim, alminam-se os problemas relacionados ao curto-circuito por contato físico e a interferência na passagem de ar pelos canais das células.

O emprego de um sensor térmico demanda alguns procedimentos de calibração para adequá-lo à esta aplicação, os quais são abordados nesse estudo. Além da medição da temperatura ao longo da pilha é proposto o monitoramento em tempo real, ou seja, a exibição gráfica da distribuição da temperatura junto a pilha (localmente), e no sistema supervisorio da planta de conversão e armazenamento de energia (remotamente).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo realiza uma abordagem geral sobre a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, salientando a geração através de células a combustível. São abordadas uma revisão bibliográfica sobre o princípio de funcionamento das CaC's, suas classificações e as principais variáveis que influenciam na sua operação e vida útil. Entre estas variáveis é dado destaque a temperatura da CaC, que é o tema principal deste trabalho.

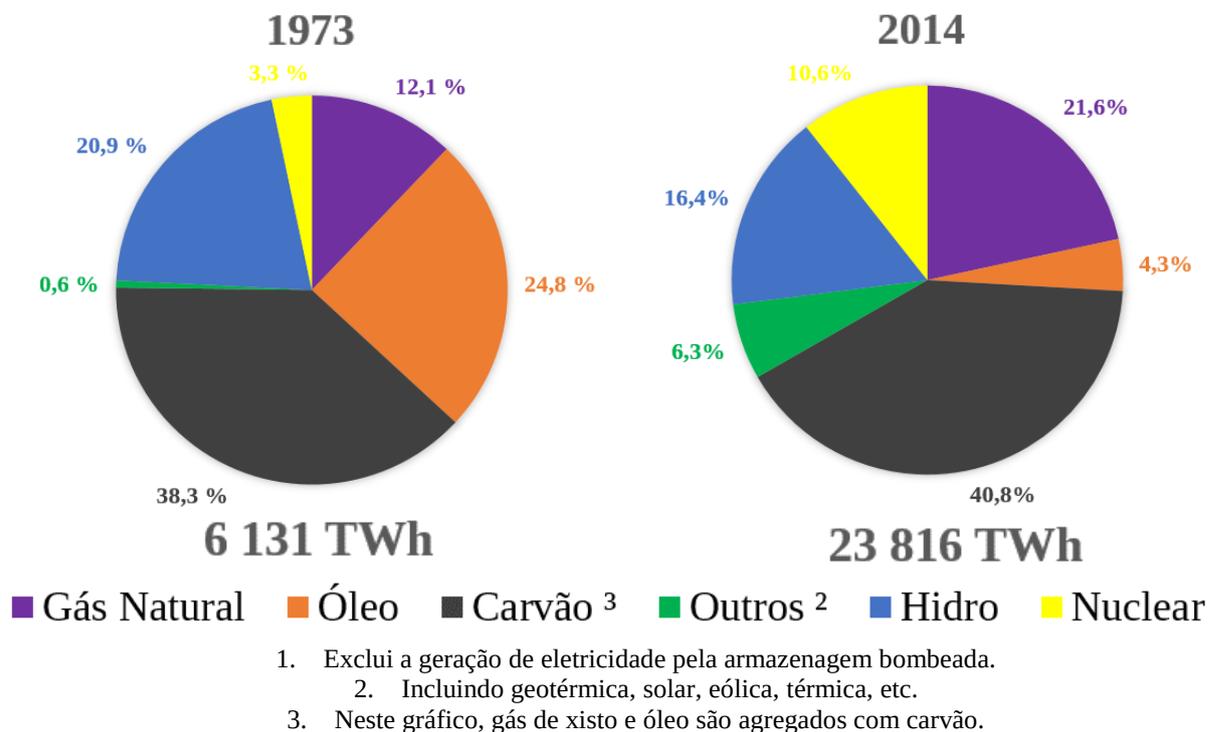
### 2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

Nas últimas décadas têm-se evidenciado uma constante busca por uma solução para minimizar a poluição ambiental, e sabe-se que parte considerável dessa degradação é decorrente dos meios utilizados para a geração de energia elétrica, como a queima de combustíveis fósseis, que liberam dióxido de carbono e ainda possuem alto custo (ANEEL, 2008). Martins, Guarnieri e Pereira (2008, p. 1) firmam que,

As fontes renováveis de energia são apresentadas como a principal alternativa para atender as demandas da sociedade com relação à qualidade e segurança do atendimento da demanda de eletricidade com a redução dos danos ambientais decorrentes do consumo de energia.

Mesmo com a tendência à implementação de fontes limpas, os gráficos da Figura 2.1 ilustram um comparativo da geração de eletricidade no mundo por tipo de combustível, nos anos de 1973 e 2014, cujos expressam que houveram uma diminuição pouco considerável na geração por combustíveis fósseis em relação às demais fontes, estando ativo aproximadamente 67% de toda geração elétrica mundial em 2014. Além disso, pode-se observar que a geração de eletricidade mais que triplicou, e como o uso de energias ditas limpas é um tanto recente, mantem-se a produção de energia elétrica poluente e cara por necessidade, mas torna-se notável a crescente presença das fontes de energia renovável na geração de energia elétrica, que passa de 0,6% (36,786 MWh) à 6,3% (1.500,408 TWh).

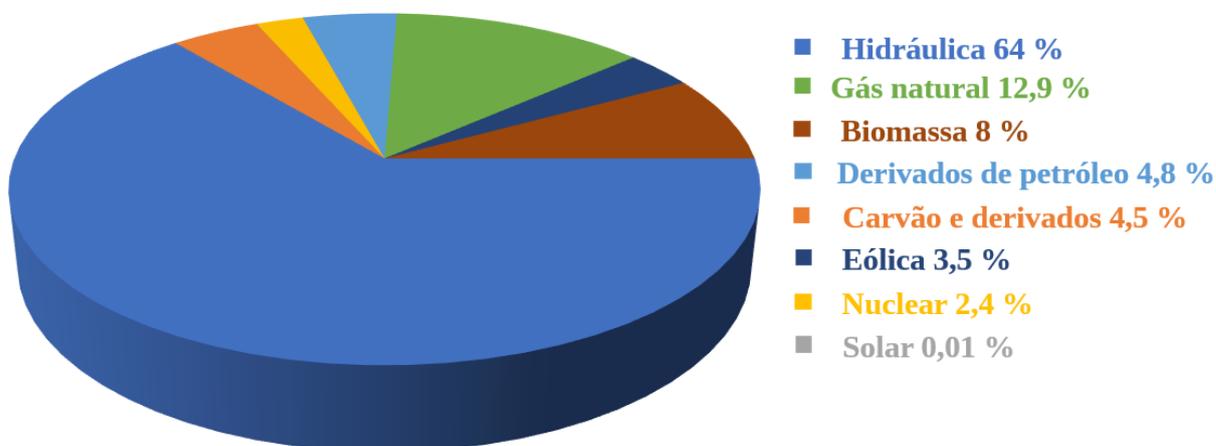
Figura 2.1 – Geração de eletricidade no mundo por combustível



Fonte: Adaptado de IEA (2016, p. 24, tradução própria).

Segundo EPE e MME (2016, p. 17), “O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 64,0% da oferta interna”. A Figura 2.2 expõe a oferta interna de energia elétrica no Brasil por cada tipo de fonte, sendo predominante as hidroelétricas.

Figura 2.2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: Adaptado de EPE e MME (2016, p. 16).

A geração hidráulica possui algumas desvantagens como, por exemplo, não ser totalmente limpa por gerar grandes impactos socioambientais (como alagamentos de grandes áreas), construções com elevados investimentos iniciais, grandes obras para a transmissão da energia elétrica da geração até a distribuição, etc. (EPE, 2016). Porém é interessante a situação do Brasil diante do cenário de energias renováveis, quando se tratam de fontes de energias intermitentes (solar e a eólica, por exemplo), possuir uma fonte de energia dita limpa que possa armazenar energia em forma de coluna d'água (barragem) e disponibilizar conforme a necessidade da rede elétrica é um elemento fundamental (EPE, 2016).

Uma aplicação clássica da importância da união das fontes intermitentes com as hidrelétricas é na geração de energia elétrica por meio da energia solar, que é promissora durante o dia, mas indisponível no período da noite, necessitando que outro meio de geração entre em ação, como as hidroelétricas. Uma aplicação semelhante é apresentada por Miotto et al. (2013) com o uso de células a combustível, onde sugere-se que no horário de pouca demanda de energia elétrica seja utilizada a energia da rede elétrica para produzir o combustível utilizado na CaC (hidrogênio) e armazená-lo para, posteriormente, no horário de ponta do consumo, gerar energia elétrica e disponibilizá-la novamente na rede elétrica.

Costa e Prates (2005, p. 7) explicam que, são consideradas fontes de energias renováveis aquelas que são disponibilizadas na natureza de forma cíclica, tais como a solar, eólica, hidroelétricas, células a combustível, dentre outras. Baitelo (2013, p. 11) complementa,

As renováveis emitem muito menos gases de efeito estufa em toda sua cadeia. Elas permitem, ainda, aproximar os centros de produção às áreas de consumo. Sistemas descentralizados de energia reduzem o custo da eletricidade e evitam o desperdício na transmissão e na distribuição.

Na literatura fica nítida a transição, das fontes de energia poluentes e finitas para as renováveis. Além disso, com a evolução da tecnologia e incentivos nesta direção, o custo inicial deve reduzir com o aumento da implementação das mesmas, sejam elas a eólica, solar, células a combustível, etc.

## 2.2 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

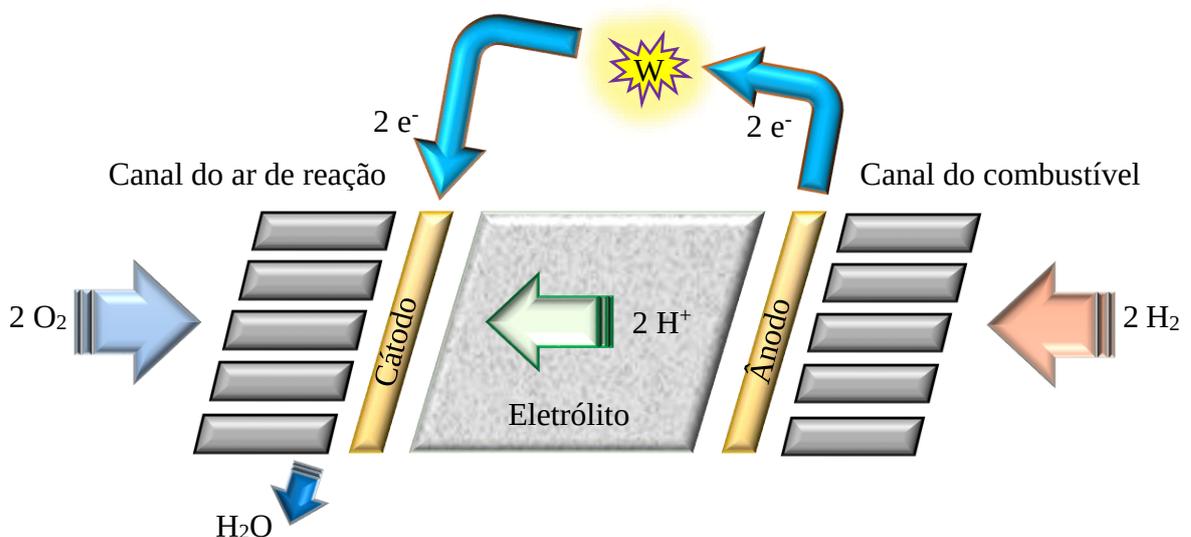
De acordo com Braga (2009), as primeiras pesquisas sobre células a combustíveis ocorreram há cerca de 180 anos, por William Grove, mas apenas nas últimas décadas é que esta tecnologia vem sendo abordada com maior atenção por universidades e centros de pesquisas, devido ao crescente desenvolvimento na área de materiais e ao forte incentivo mundial para a

redução dos impactos ambientais gerados, em boa parte, pelos meios de geração de energia elétrica e veículos a combustão. A ênfase em CaC deve-se às suas características de operação, a qual gera eletricidade, e água e calor como resíduos, sem agredir o meio ambiente (LARMINIE; DICKS, 2003, tradução própria). Além disso, elas possuem eficiência em torno de 40%, inclusive superior às das máquinas a combustão, deixando em aberto o alto potencial que esta tecnologia possui para revolucionar o mercado de geração de energia elétrica, sendo o alto custo ainda uma das principais barreiras da inclusão efetiva desta tecnologia (EPE, 2007).

Ferrigolo (2009) esclarece que uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico, que converte energia química diretamente em energia elétrica através da reação de oxi-redução entre o hidrogênio (combustível) e o oxigênio (oxidante). Braga (2009, p. 63-64) complementa, “Esta conversão ocorre por meio de duas reações eletroquímicas parciais de transferência de carga em dois eletrodos separados por um eletrólito apropriado, ou seja, a oxidação de um combustível no ânodo e a redução de um oxidante no cátodo”.

O processo descrito proporciona a circulação de elétrons do ânodo para o cátodo, através de um circuito auxiliar, podendo gerar trabalho e os subprodutos mencionados anteriormente, água e calor, conforme a Figura 2.3, e isto de forma contínua enquanto houver reagentes sendo fornecidos aos eletrodos. Larminie e Dicks (2003, p. 17, tradução própria) enfatizam que, “A implicação é que nem o eletrodo nem o eletrólito são consumidos pela operação da célula. É claro que, em todas as células de combustível, os eletrodos e os eletrólitos são degradados e estão sujeitos ao "desgaste" em seu uso, mas não são consumidos inteiramente [...]”

Figura 2.3 – Operação simplificada de uma célula a combustível



A classificação das células a combustíveis se dá, geralmente, de acordo com o eletrólito que utilizam, mas também podem ser agrupadas pelas suas temperaturas de operação (VILLULLAS; TACIANELLI; GONZÁLEZ, 2002). Na Tabela 2.1 estão elencadas as principais células a combustíveis, de acordo com seus respectivos eletrólitos, e algumas de suas características. Destaca-se que a *PEFC* também é conhecida como *PEMFC* (*Proton Exchange Membrane*), cuja é a utilizada para a realização deste trabalho.

Tabela 2.1 – Comparativo entre algumas características de CaC de acordo com seus eletrólitos

<b>Célula a Combustível</b>	<b>Denominação em inglês</b>	<b>Siglas em inglês</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>T. (°C)</b>	<b>Aplicações Potenciais</b>
Alcalina	<i>Alkaline</i>	<i>AFC</i>	Alcalino	50-200	Transporte, Espaço
Eletrólito Polimérico	<i>Polymer Electrolyte</i>	<i>PEFC</i>	Polímero	50-80	Transporte, Geração Distribuída
Metanol Direto	<i>Direct Methanol</i>	<i>DMFC</i>	Polímero (metanol direto)	60-130	Transporte, Geração Distribuída
Ácido Fosfórico	<i>Phosphoric Acid</i>	<i>PAFC</i>	Ácido Fosfórico	190-210	Cogeração, Geração Distribuída
Carbonato Fundido	<i>Molten Carbonate</i>	<i>MCFC</i>	Carbonato Fundido	630-650	Cogeração, Geração Distribuída ou Centralizada
Óxido Sólido	<i>Solid Oxide</i>	<i>SOFC</i>	Óxido Sólido	700-1000	Cogeração, Geração Distribuída ou Centralizada

Fonte: Adaptado de Chum (2002, p. 7).

A operação de uma célula a combustível requer um certo nível de controle, para garantir sua integridade e até mesmo para melhorar o seu desempenho (HAMED; AWAD; TOLBA, 2009). Riascos et al. (2006) desenvolveram um trabalho onde monitoraram algumas variáveis da CaC, como a temperatura e umidade relativa da membrana, fluxo de ar de reação, pressão do ar combustível, dentre outras, como as grandezas elétricas. Nos resultados do trabalho desenvolvido por Ferrigolo (2009) é relatado que essas variáveis mencionadas têm fortes influências na CaC, mas dentre elas são apontadas as que possuem maior relevância nas variações de eficiência, como a temperatura da membrana, seguido pelo fluxo de ar de reação e a umidade da membrana.

Os resultados do experimento de Liso et al. (2014) mostraram que o crescente aumento da temperatura da célula aumenta a tensão disponibilizada pela mesma, e assim, a potência

fornecida. Da mesma forma, Larminie e Dicks (2003) apontam que o aumento da temperatura tem um efeito benéfico sobre o desempenho da célula, pois as perdas associadas à ela são reduzidas.

Entretanto, temperaturas muito altas podem causar problemas irreversíveis na célula, devido por exemplo, ao nível muito baixo de umidade relativa na membrana decorrente desta elevada temperatura (SAYGILI; EROGLU; KINCAL, 2015). Riascos e Pereira (2009, p. 2778, tradução própria) explicam este efeito,

O desempenho das células a combustível é influenciado pelo teor de água na membrana; a condutividade da membrana é proporcional ao seu teor de água. A reação química forma água, mas quando a temperatura aumenta, o ar da reação na entrada da célula a combustível tem um efeito de secagem, isto é, a quantidade de água removida da célula a combustível é maior do que a água produzida pela reação química.

Segundo Liso et al. (2014, p. 8410, tradução própria), “Uma combinação de alta temperatura e umidade reduzida aumenta a taxa de degradação.”. Riascos e Pereira (2009, p. 2779, tradução própria) complementam,

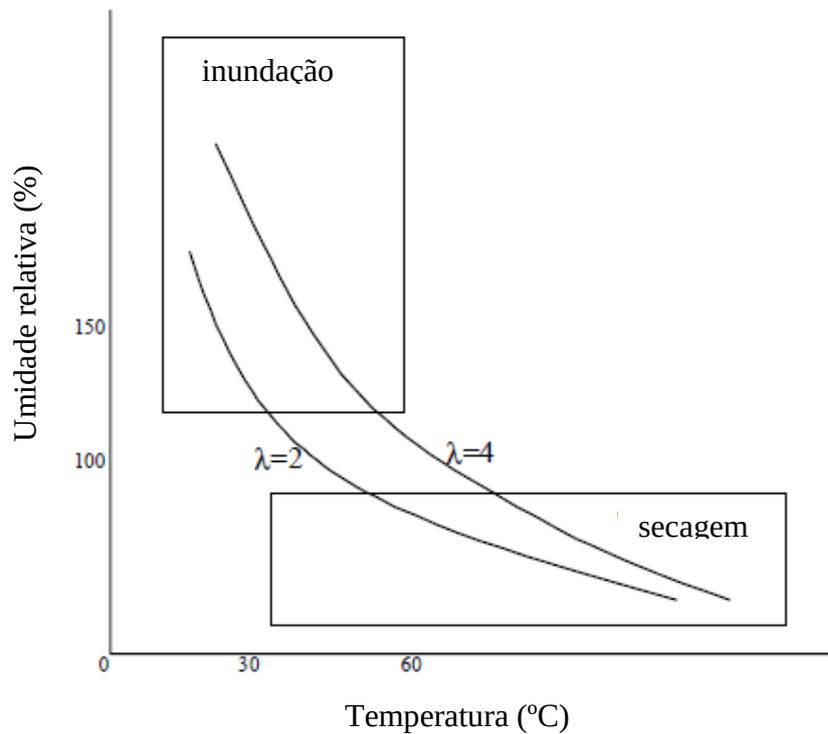
Quando a temperatura aumenta, o ar de reação tem um efeito de secagem e reduz a umidade relativa. A baixa umidade relativa pode produzir um efeito catastrófico na membrana eletrolítica de polímero, que depende não somente do alto teor de água, mas também é muito fina (e, portanto, propensa a uma secagem rápida).

Deste modo, Larminie e Dicks (2003) estabelecem uma região limite para a temperatura, de 60°C, onde ele afirma que valores acima desse ocasionarão a secagem a maiores proporções do que a produção de água pela reação eletroquímica. Em relação à umidade, Riascos e Pereira (2010, p. 140, tradução própria) abordam as implicações dela na célula,

Se a umidade relativa é muito menor do que 100%, então a membrana seca e a condutividade diminui. Por outro lado, uma umidade relativa superior a 100% produz acúmulo de água líquida nos eletrodos, que podem se inundar e bloquear os poros, dificultando a difusão do gás. O resultado dessas duas condições é uma faixa bastante estreita de condições de operações normais.

A faixa estreita para a operação em relação a umidade da membrana citada por Riascos e Pereira (2010) é mencionada por Larminie e Dicks (2003), como sendo entre 80% e 100%. Esta faixa está ilustrada na Figura 2.4, para uma razão estequiométrica ( $\lambda$ ) de 2 ou 4, devendo situar-se, preferencialmente, entre os retângulos de secagem ou inundado. A razão estequiométrica representa a razão entre o fluxo de ar injetado na pilha de células a combustível em relação ao que será consumido (mínimo), sendo dois o valor estipulado como mínimo para  $\lambda$ , visando garantir um excesso de oxigênio para reagir com todo o hidrogênio injetado (LARMINIE; DICKS, 2003).

Figura 2.4 – Temperatura e umidade relativa para  $\lambda=2$  e  $\lambda=4$



Fonte: Adaptado de Riascos et al. (2006, p. 1062).

Nas operações da CaC do tipo PEM acima de 60°C há a necessidade de umidificação extra (RIASCOS; PEREIRA, 2010). Isto acarreta em aumentar o peso e o custo em equipamentos para tal atividade (LARMINIE; DICKS, 2003). O mesmo é válido para o controle da temperatura, onde ele pode ser realizado com o aumento da quantidade do ar de reação, resfriando a pilha, para CaC de até 10 kW, já para potências acima deste valor é aconselhado o uso de refrigeração líquida (LISO et al., 2014). O aumento da quantidade do ar de reação é viável pois o requisito é um valor mínimo dele para aproveitar todo o hidrogênio munido, mas fornecer mais oxigênio não irá prejudicar a operação, neste quesito (ZENITH, 2007).

Segundo Liso et al. (2014, p. 8410, tradução própria), “As mudanças de temperatura nas pilhas de células de combustível do tipo PEM são consideravelmente maiores durante as variações de carga e têm um impacto negativo, pois geram tensões térmicas e degradação da pilha.”. Portanto, quanto mais confiáveis as leituras das temperaturas, e em mais locais da pilha, de melhor forma pode ser determinado o controle desta variável para garantir o melhor funcionamento da CaC e por mais tempo.

O problema para o monitoramento da temperatura da pilha de células a combustível encontra-se em estipular um sensor que possa aferir a temperatura sem prejudicar a operação ou mesmo a integridade das células. No trabalho de Rutes (2006) foi utilizado um sensor LM35 para a aferição da temperatura, cujo tamanho é relativamente grande para ser inserido no interior da pilha de células a combustível, e na alternativa de colocá-lo em contato com as células ele acaba por obstruir a passagem de ar naquele local. Ou seja, seu uso fica restrito a medição da temperatura externa a célula.

Na dissertação de Ferrigolo (2009) foi utilizado um sensor termopar, e no trabalho realizado por Gonzatti, Miotto e Farret (2017) foram acondicionados oito sensores termopares do tipo “K”, devido às suas pequenas dimensões físicas, , porém, eles acabam impedindo a passagem de ar de reação pelas vias onde eles estão posicionados, e dificultam a passagem de ar por onde passam as fiações para as comunicações das diferenças de potencias percebidas. Além disso, como os sensores termopares são constituídos por dois metais diferentes que, ao entrarem em contato com as CaC pode ocasionar um curto-circuito nelas, necessitando de uma isolamento elétrica no entorno deste bi-metálico para evitar o curto-circuito, visando aumentar o mínimo possível o volume do sensor devido à adição deste material isolante para que ele ainda possa ser inserido nas aletas das CaC.

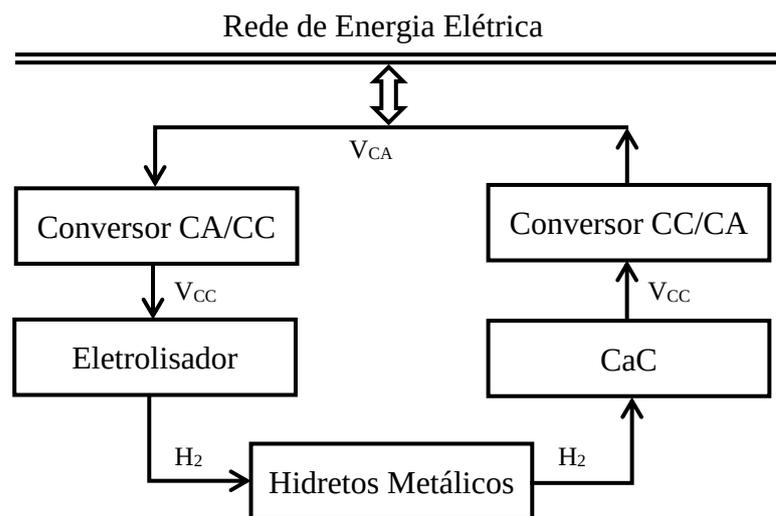
### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo fora feita uma breve revisão sobre a geração de energia elétrica no mundo e no Brasil, conduzindo para a crescente tendência da geração com as fontes de energias renováveis. Dentre os meios de geração de energia, ditas limpas, foram apresentadas as CaC's. Enfatizou-se da necessidade de um controle e monitoramento contínuo das suas variáveis, que são de suma importância para garantir tanto a integridade física da pilha de CaC, bem como buscar extrair seu melhor desempenho. Conduzindo, assim, para o foco deste trabalho, que consiste no desenvolvimento de um sistema para o monitoramento da temperatura interna de uma pilha de CaC, onde parcela deste estudo consiste em determinar alguma arquitetura que melhore o processo de medição da temperatura, de modo a obter mais pontos das regiões da pilha e sem comprometê-la.

### 3 PLANTA DE CONVERSÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Uma área de pesquisa do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), é a conversão e armazenamento de energia. Este núcleo possui uma planta armazenadora de energia, utilizando hidrogênio como vetor energético, composta basicamente por um eletrolisador alcalino, que através da eletrólise produz hidrogênio utilizando a energia elétrica da rede, um cilindro de hidretos metálicos que armazena o hidrogênio e uma pilha de células a combustível do tipo PEM que produz energia elétrica a partir do hidrogênio, conforme a circuito da Figura 3.1.

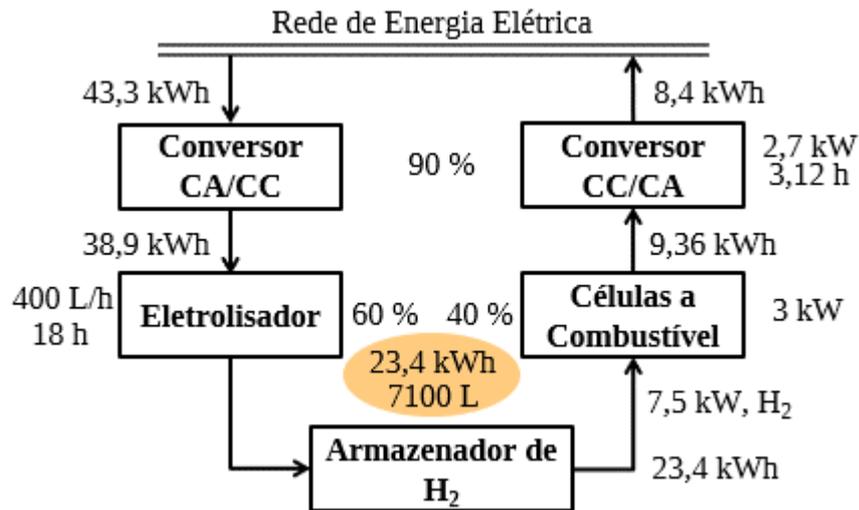
Figura 3.1 – Principais componentes de um conversor e armazenador de energia utilizando o hidrogênio



Fonte: Adaptado de Gonzatti (2017, p. 36).

Um estudo de caso realizado por Franchi et al. (2017), em que é utilizada esta planta do CEESP, concluiu que a eficiência global do sistema é de 19,44%, considerando que as eficiências do eletrolisador, do cilindro de hidretos metálicos, da pilha de CaC e de cada conversor são de 60, 100, 40 e 90%, respectivamente. Ou seja, ao consumir 43,3 kWh de energia elétrica da rede para atingir a máxima capacidade de armazenamento do cilindro de hidretos metálicos (7100 L), e utilizando todo este combustível armazenado para gerar novamente energia elétrica, será disponibilizado na rede elétrica apenas 8,4 kWh. Este processo está exemplificado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Energia elétrica consumida e fornecida pela planta de conversão e armazenamento de energia para 7100 L de hidrogênio



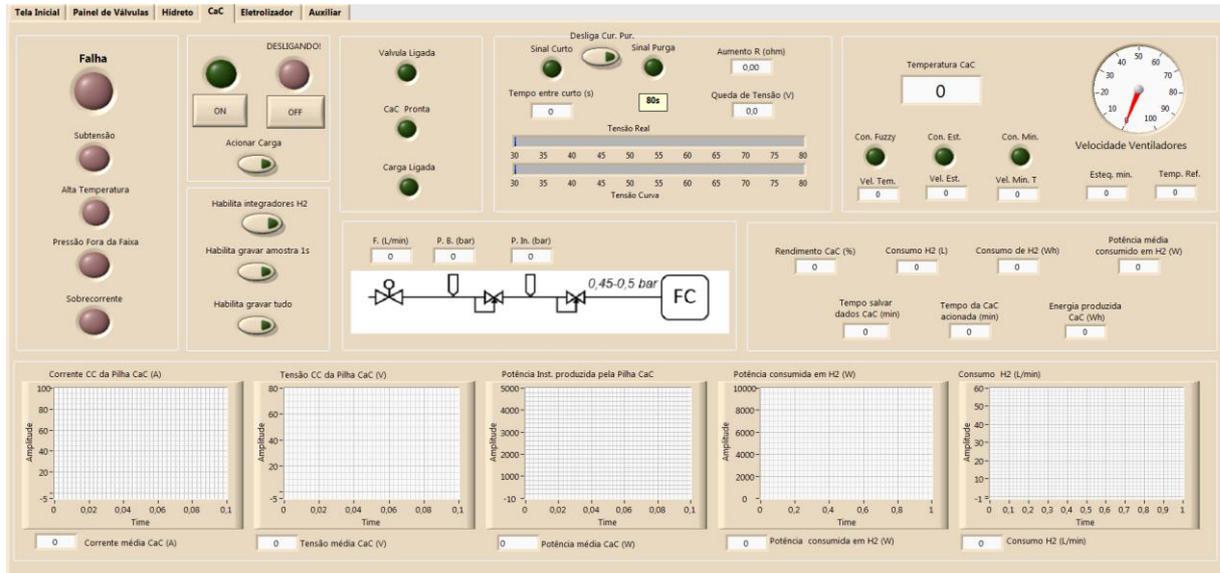
Fonte: Autor.

O principal objetivo desta planta disponível no laboratório é o seu uso para realizar testes e desenvolver novas propostas de controle e automação, visando agregar novas tecnologias, aumentar a eficiência e durabilidade dos componentes. Um dos avanços desenvolvidos na planta foi a elaboração do monitoramento e controle dela através de uma placa de aquisição de dados com o auxílio do *software* LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*).

O supervisor contém para cada componente da planta (eletrolisador, CaC, e hidreto metálicos) uma aba específica, que realizam o monitoramento e controle deles. Na aba referente a CaC, ilustrada na Figura 3.3, tem-se os comandos de abertura e fechamento de válvulas, o monitoramento da pressão do hidrogênio, da tensão e corrente gerada, do consumo de hidrogênio, da energia convertida, da eficiência, enfim, todos os sinais relativos a operação da CaC. Além de realizar a técnica de curto-circuito, purga do ânodo e o monitoramento e controle da temperatura da pilha.

Entre as diversas variáveis, a temperatura é um fator determinante para a vida útil da CaC, assim como para a sua eficiência. Com o objetivo de realizar um melhor monitoramento e controle da temperatura, este trabalho propõe um novo sistema de medição de temperatura.

Figura 3.3 – Tela do supervisor de monitoramento e controle da CaC



Fonte: Gonzatti (2017, p. 172).

### 3.1 PILHA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM

As células a combustível do tipo PEM utilizam uma combinação do combustível (hidrogênio) com o comburente (oxigênio) para produzir energia elétrica, calor e água. A pilha de CaC instalada na planta é a H-3000, do tipo PEM, produzida pela *Horizon Fuel Cell Technologies*, com dados de placa transcritos na Tabela 3.1. O seu custo de aquisição referente ao ano de 2011 foi de, aproximadamente, R\$ 40 mil reais.

Tabela 3.1 – Principais características da pilha de CaC do tipo PEM H-3000

Descrição	Especificação
Número de células na pilha	72
Potência máxima de pico (W)	3000
Performance da CaC	43,2 V @ 70 A
Reagentes	H <sub>2</sub> e ar atmosférico
Umidade relativa externa (%)	0 a 80
Máxima temperatura da pilha (°C)	65
Pureza do hidrogênio (%)	> 99,995
Umidificação	Auto umidificada
Refrigeração	Ar
Eficiência	40 % @ 43,2 V
Máximo consumo de H <sub>2</sub> (L/min)	42

Fonte: Adaptado de Horizon (2010).

Esta pilha de CaC vem com uma completa automação do sistema, controlando todas as variáveis relacionadas para uma operação segura, entretanto, disponibilizando poucas informações destas variáveis para o usuário. Como o objetivo do porte deste equipamento é o estudo e a pesquisa em torno de sua tecnologia, na tese de doutorado de Gonzatti (2017) uma das atividades desenvolvidas foi a reconstrução da automação da pilha, podendo atualmente monitorar diversas variáveis, como a pressão de entrada de hidrogênio, a temperatura, a tensão e a corrente da pilha, bem como o acionamento dos atuadores condicionados nela (MIOTTO et al., 2017).

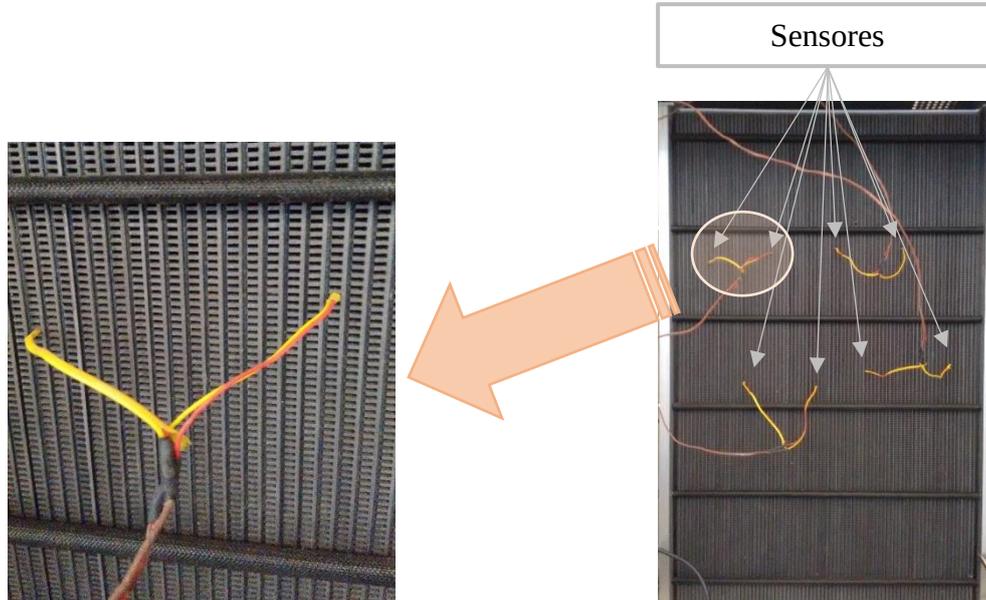
A reconstrução da automação da pilha facilita a expansão e criação de novas pesquisas do grupo, dando sequência ao trabalho já efetuado, podendo aferir, por exemplo, a tensão de cada célula da pilha, realizar o controle individual dos ventiladores do sistema de refrigeração, monitorar variáveis de diferentes formas, etc. Nesse contexto, uma das melhorias concretizadas, ainda no trabalho de Gonzatti (2017) e descritas na sessão seguinte, é em relação a temperatura da pilha, que em seu sistema original era monitorada apenas por um sensor acomodado na tampa do protótipo, afastado da pilha de CaC.

### **3.1.1 Controle e monitoramento da temperatura da pilha de células a combustível**

Um dos avanços implementados na tese de Gonzatti (2017) foi a inserção de oito sensores termopares envolvendo a região central da pilha, acondicionados nas lacunas em que o ar de reação flui, conforme a Figura 3.4, obtendo a temperatura local na pilha, e não apenas a temperatura do ambiente interno do gabinete que a detém. Foram utilizados estes tipos de sensores devido às suas pequenas dimensões físicas, propícias para o local onde foram alocados.

Os termopares geram uma mudança na diferença de potencial que emitem perante uma variação da dilatação de seus bimetálicos, ocasionada por uma variação de temperatura e, sendo esta diferença de potencial em uma magnitude baixa faz-se necessário o condicionamento deste sinal. Com o uso de oito sensores, precisa-se do mesmo número de condicionadores de sinais para obter o valor distinto de cada um deles, ou então, um único condicionador de sinais tendo nele a ligação em paralelo de todos os sensores, obtendo a média geral de todas as leituras dos termopares.

Figura 3.4 – Sensores termopares acondicionados na pilha de CaC



Fonte: Autor.

Com as leituras dos termopares pode-se realizar o controle da temperatura da pilha de CaC, atuando na velocidade dos ventiladores localizados em uma das faces da pilha, conforme a Figura 3.5. Para a pilha, em questão, foi realizado o controle baseado na *Lógica Fuzzy*, conforme descrito por Gonzatti, Miotto e Farret (2017).

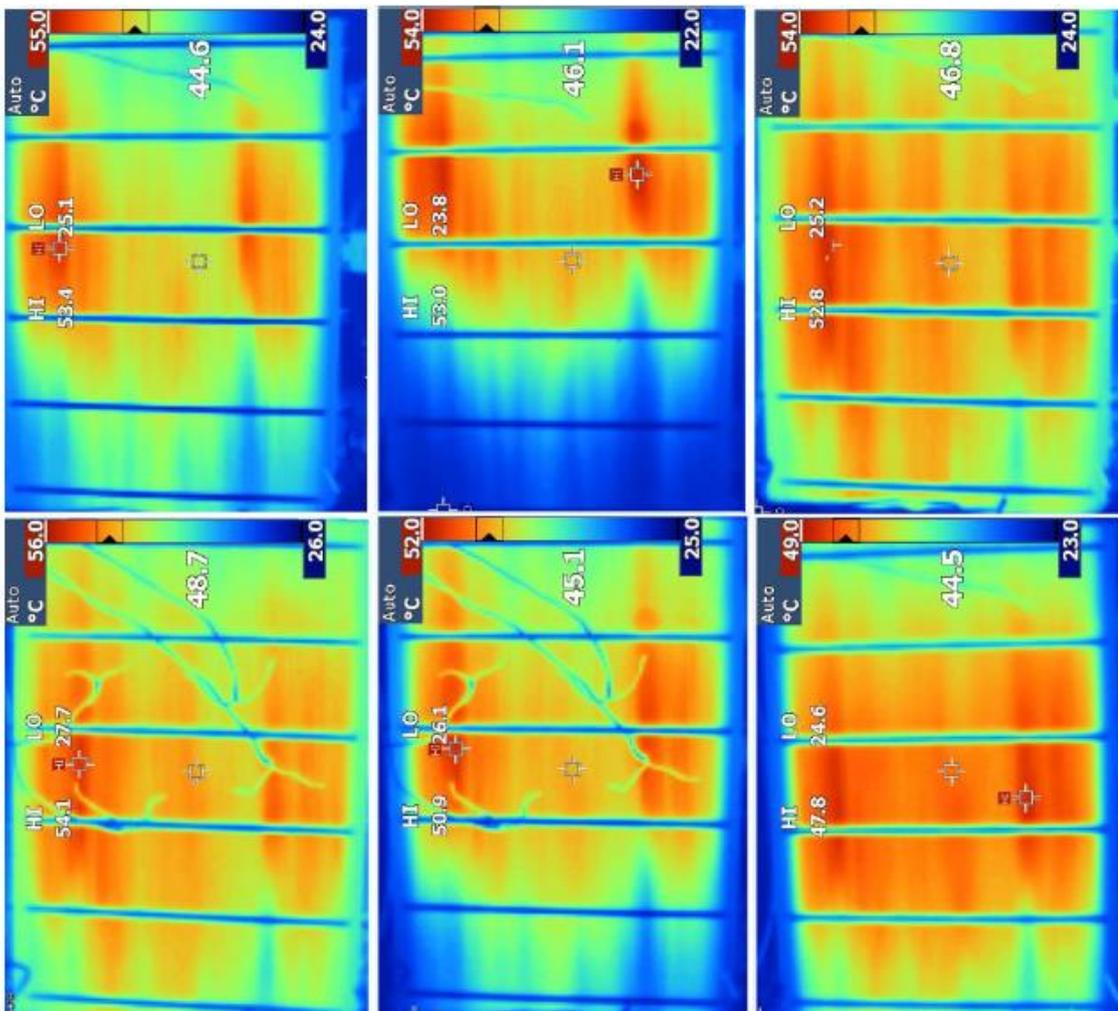
Figura 3.5 – Ventiladores traseiros da pilha CaC para controle da temperatura



Fonte: Gonzatti (2017, p. 108).

Nas imagens termográficas da Figura 3.6 estão ilustradas seis situações de operações distintas da pilha de CaC, e nelas podem ser observadas que a distribuição da temperatura na pilha não é uniforme. Isto dificulta o monitoramento da temperatura máxima que a pilha de CaC atinge a cada instante com o uso de poucos sensores, sabendo que a temperatura máxima admissível pelo fabricante da pilha de CaC é de 65°C. Entretanto, uma observação comum a todas as operações é a temperatura mais baixa presente na região inferior da pilha, concentrando-se as temperaturas mais altas e críticas nas duas extremidades laterais da pilha, da parte superior até o meio, locais os quais foram condicionados os sensores termopares.

Figura 3.6 – Imagens termográficas da pilha de CaC em seis operações distintas



Fonte: Gonzatti (2017, p. 109).

Para a operação segura da pilha com a automação agregada nela foi estipulada a temperatura média máxima interpretada pelos sensores termopares como sendo de 40°C, onde é assegurado que a temperatura máxima da pilha não ultrapasse o valor máximo permitido, e

tendo ainda uma margem de segurança considerável. Isto é sabido pois foi aferida a temperatura máxima da pilha com o monitoramento paralelo de uma câmera térmica, Tabela 3.2, durante os testes, obtendo este valor de 40°C de média dos termopares pelas máximas monitoradas com a câmera.

Tabela 3.2 – Principais características da câmera térmica

<b>Descrição</b>	<b>Especificação</b>
Fabricante / Modelo	Fluke / Ti25
Faixa de operação (°C)	-20 a 350
Precisão (%)	±2
Resolução ( <i>pixel</i> )	160 x 120
Campo de visão (°)	23 x 17
Foco	Manual

Fonte: Adaptado de Fluke (2007).

Para aumentar a confiabilidade da medição da temperatura da pilha é necessário aumentar o número de pontos de medição. Além da medição ser mais exata, pode-se monitorar as temperaturas em determinadas regiões, como médias, máximas e mínimas. Além disso, o sensor ideal não pode entrar em contato com a pilha que basicamente é constituída de grafite, material condutor, podendo assim ocasionar curto-circuito e danificá-la. E ainda, que este dispositivo não obstrua a passagem do ar de reação.

O componente que detém todos estes quesitos é um sensor análogo à câmera térmica utilizada para monitorar a temperatura da pilha, mas que, possui um valor comercial mais acessível. O componente utilizado é um sensor infravermelho, e é baseado nele que será avaliada a solução para a aplicação, de modo que as informações do mesmo sejam apresentadas no próprio gabinete da pilha de CaC (de forma local) e no supervisório de controle e monitoramento da planta de armazenamento de energia (de forma remota).

### 3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a planta de conversão e armazenamento de energia utilizando o hidrogênio como vetor energético, bem como seus componentes físicos e sistema de monitoramento e controle, explicitando a pilha de CaC do tipo PEM, a qual é objeto de estudo deste trabalho. Nas abordagens sobre a pilha, apresentou-se suas características fundamentais e o monitoramento de sua temperatura com o uso de sensores termopares. Além

disso, elucidou-se o comportamento da distribuição da temperatura pela pilha de CaC, afim de expor a importância da obtenção de maiores informações a respeito da temperatura da mesma, com o uso de algum sensor infravermelho, devido à sua característica de não necessitar de contato físico com o objeto de interesse para aferir sua temperatura.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

A primeira seção deste capítulo relata as características de três configurações de sensores infravermelhos comercializados, com ênfase no sensor GRID-EYE AMG8833 utilizado para medição da temperatura da pilha de células a combustível, apresentada neste trabalho. Além dos sensores são abordadas os desafios para o monitoramento da temperatura. Ainda neste capítulo são apresentados: a implementação prática do sistema de monitoramento de temperatura da pilha de CaC, todos os componentes eletroeletrônicos, a comunicação e os códigos implementados. Também são abordados os projetos e as construções dos aparatos físicos como a placa de circuito impresso e o suporte mecânico que acondiciona o sensor no gabinete da pilha. Por fim, apresentam-se os resultados da operação do novo protótipo para medição e monitoramento da temperatura, comparando-o com o sistema existente.

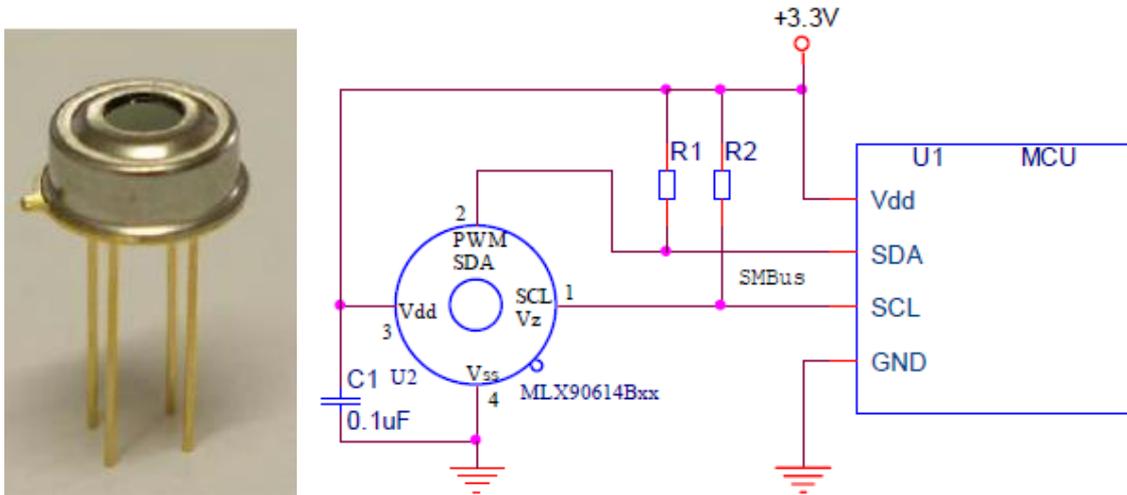
### 4.1 SENSORES INFRAVERMELHOS

Uma das grandes vantagens dos sensores infravermelhos é a medição da temperatura à distância, sem a necessidade do contato físico com o objeto a ser medido, característica importante para a aplicação em células a combustível. Dentre os produtos disponíveis no mercado atualmente, podem-se destacar três que detêm razoável custo-benefício e aplicabilidade, dois do fabricante Melexis (MLX90614 e MLX90621) e um do fabricante Panasonic (AMG8833).

#### 4.1.1 Sensor de temperatura infravermelho MLX90614

O sensor MLX90614, ilustrado na Figura 4.1, é um medidor de temperatura via infravermelho, sem contato, que possui um único *pixel* e pequena dimensão física. Ele pode ser exposto a uma temperatura de -40 até 125°C e garante sua aferição de -70 à 380°C. Sua precisão é de aproximadamente  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , para as condições de temperatura ambiente e de operação deste objeto de estudo. A faixa de alimentação é de 3,3 a 5 V, e a comunicação é via I2C (comunicação serial síncrona). As informações completas a respeito deste componente podem ser obtidas em seu *datasheet* (MELEXIS, 2009).

Figura 4.1 – Sensor de temperatura infravermelho MLX90614: (a) invólucro do sensor; (b) esquemático das conexões do sensor



(a) Invólucro do sensor.

(b) Esquemático das conexões do sensor.

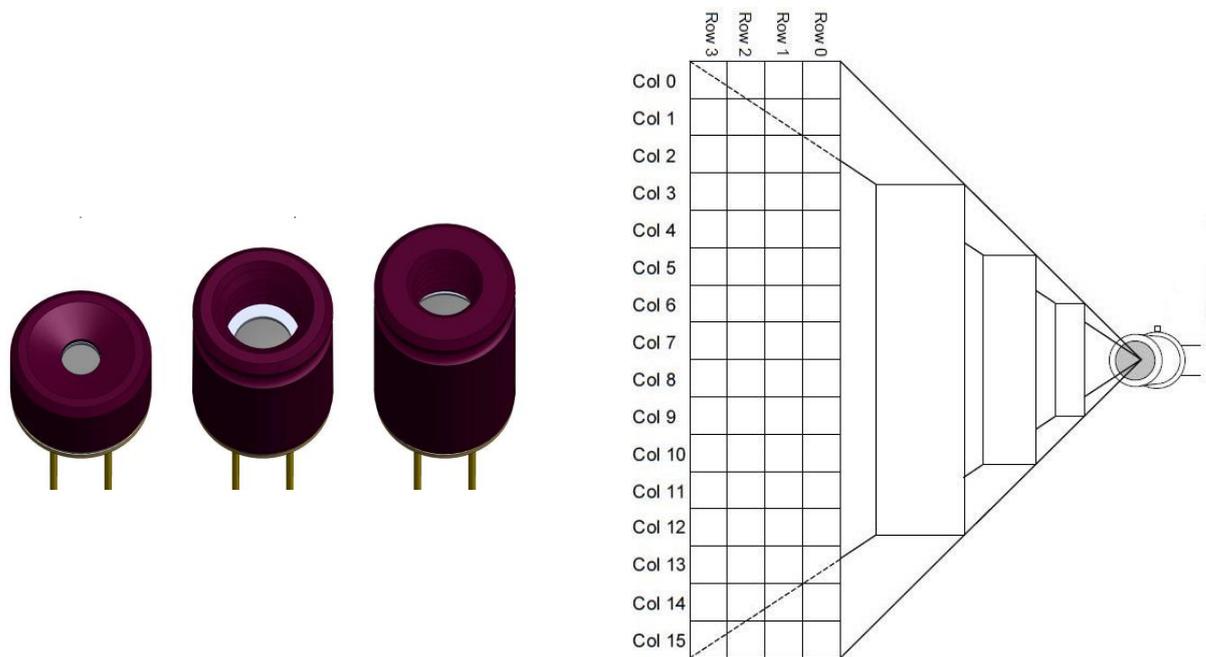
Fonte: Adaptado de Melexis (2009).

Este sensor pode ser empregado em diversas aplicações, como detecção de movimento, sistemas de controle de temperatura de impressoras, temperatura corporal, etc. O motivo pelo qual ele não foi adotado para este trabalho é por ele possuir um único *pixel*, o que demandaria vários sensores para monitorar uma maior área da pilha de CaC. Afinal, caso fosse utilizado somente um ou algumas unidades, eles forneceriam a temperatura média da área que abrangessem pela própria dinâmica de operação, se aproximando a solução adotada por Gonzatti (2017).

#### 4.1.2 Sensor de temperatura infravermelho MLX90621

Este sensor possui características semelhantes aos seus antecessores, MLX90614 por exemplo, com a principal diferença relacionada ao número de *pixels* (64), dispostos em uma matriz de 16x4 (dezesseis colunas e quatro linhas), conforme a Figura 4.2b. Em suas variantes há três possibilidades de invólucros, Figura 4.2a, cada um para diferentes ângulos de abertura. Além disso, a sua alimentação é de 2,6 V e possui comunicação I2C. Suas aplicações se estendem a *scanners* térmicos, medições de temperatura de alta precisão, dentre outras. As informações completas a respeito deste componente são encontradas em seu *datasheet* (MELEXIS, 2016).

Figura 4.2 – Sensor de temperatura infravermelho MLX90621: (a) invólucros para diferentes ângulos de abertura; (b) ilustração da matriz de varredura



(a) Invólucros para diferentes ângulos de abertura      (b) Ilustração da matriz de varredura

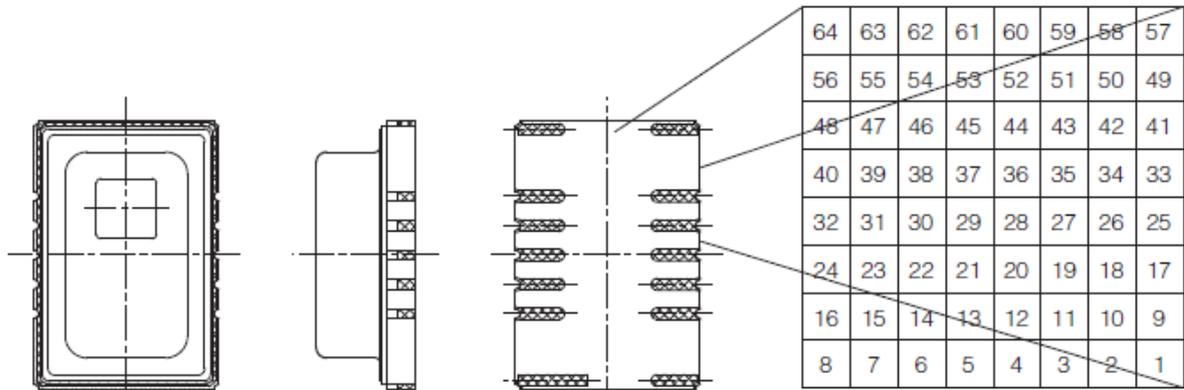
Fonte: Adaptado de Melexis (2016).

Este componente não foi utilizado neste trabalho devido a disposição de seus *pixels*. Pois, seriam necessários dois ou três sensores para conseguir capturar todo o perfil da pilha de CaC (33,5 x 52 cm), acarretando no aumento dos custos. Entretanto, para as aplicações em que este componente é adequado, ele demonstra-se como um item completo para a integração em sistemas de monitoramento de temperatura pelas suas diversas características e funcionalidades, descritas em seu *datasheet*.

#### 4.1.3 Sensor matricial infravermelho GRID-EYE AMG8833

O sensor infravermelho AMG8833 também possui 64 *pixels*, mas diferencia-se no modo como são distribuídos formando uma matriz quadrada de 8x8, conforme a Figura 4.3. Devido as dimensões físicas da pilha de CaC, este sensor apresenta-se como uma solução viável para a medição da temperatura da pilha. Na Tabela 4.1 tem-se reunidas as principais características do sensor. O campo de visão do sensor é 60° de abertura em relação ao centro do visor, Figura 4.4, tanto na vertical como na horizontal. O custo de aquisição deste componente no segundo semestre de 2017 foi de, aproximadamente, R\$ 44,00 dólares.

Figura 4.3 – Vistas ortogonais do sensor AMG8833 e sua matriz de *pixels*



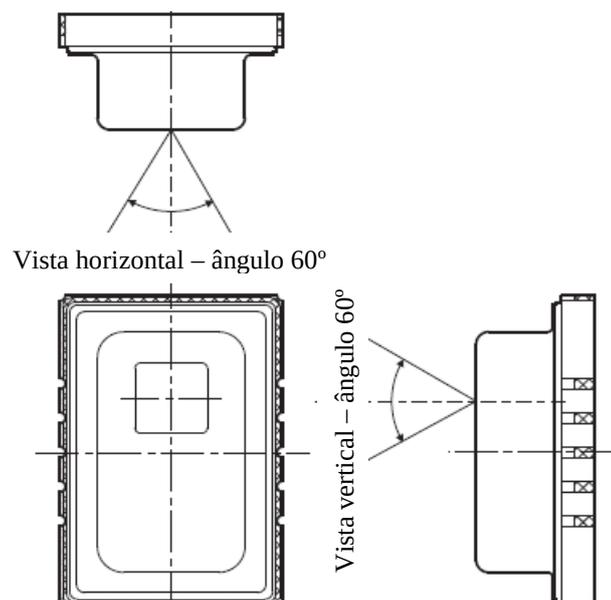
Fonte: Panasonic (2016, p. 3).

Tabela 4.1 – Especificações das principais características do sensor AMG8833

Descrição	Especificação
Tensão de alimentação (V)	3,3
Protocolo de comunicação	I2C
Taxa de captura (frames/s)	1 ou 10
Resolução (°C)	0,25
Temperatura de operação (°C)	0 a 80
Campo de visão (°)	60
Resolução do termistor (°C)	0,0625

Fonte: Adaptado de Panasonic (2011).

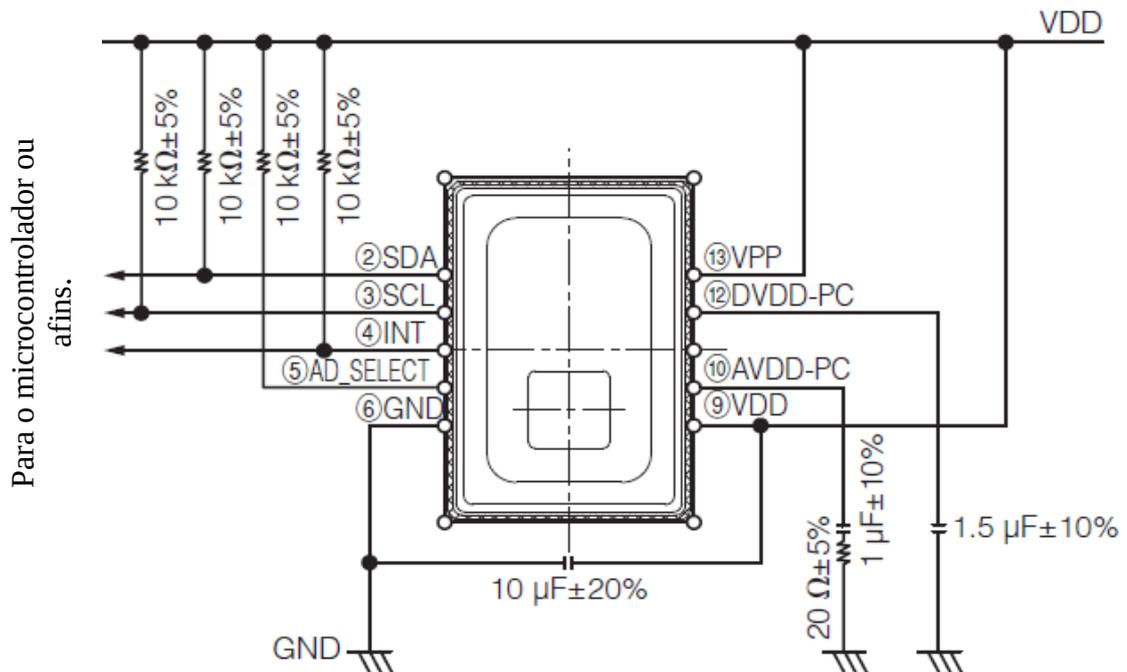
Figura 4.4 – Ângulo de visão do sensor AMG8833



Fonte: Adaptado de Panasonic (2016, p. 3).

Este sensor, pode ser utilizado aos pares no mesmo barramento I2C, Figura 4.5, endereçados como “alto” ou “baixo”. Estas seleções são realizadas nos pinos de conexão “AD\_SELECT” em “VDD” para o endereço “alto”, ou em GND para o endereço “baixo”. As informações complementares deste componente estão disponíveis no *datasheet* do produto (PANASONIC, 2016).

Figura 4.5 – Esquemático de ligação como escravo no endereço alto (VDD)



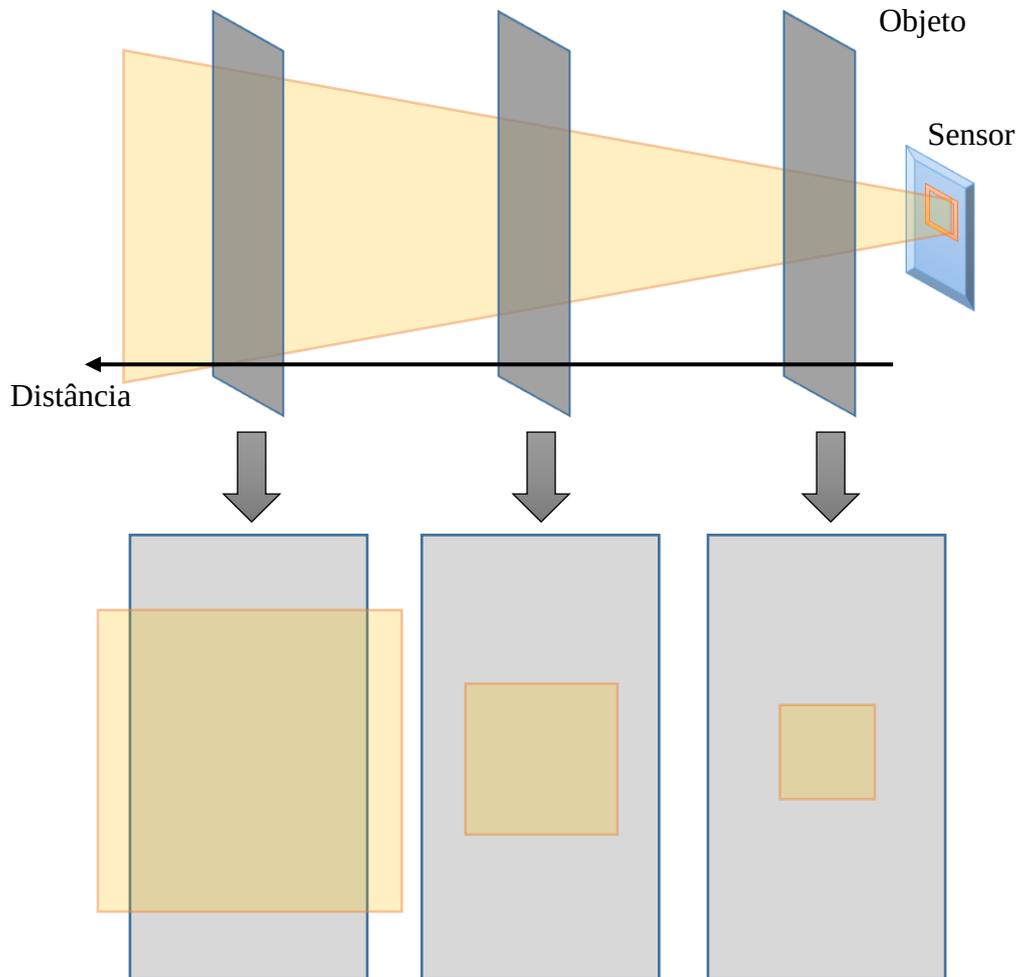
Fonte: Adaptado de Panasonic (2016, p. 4).

## 4.2 LIMITAÇÕES DO SENSOR GRID-EYE AMG8833

Supondo que se deseja realizar a medição da temperatura através de um sensor com um único *pixel*, vide Figura 4.6, e que o objeto esteja posicionado a uma distância fixa. Se o objeto for afastado, a área de abrangência do pixel aumenta proporcionalmente. Isso acontece de forma similar ao manuseio de uma lanterna.

Quando um pixel envolve uma área grande do objeto, o valor mensurado pelo sensor será a média das temperaturas contidas naquela região. No caso onde o objeto possua um tamanho pequeno, de modo que o raio gerado pela distância entre o sensor e o objeto seja algumas vezes maior que o tamanho do objeto, a temperatura constatada pelo sensor tenderá para a temperatura do ambiente no entorno do objeto em questão.

Figura 4.6 – Área de incidência do sensor infravermelho com o distanciamento do objeto



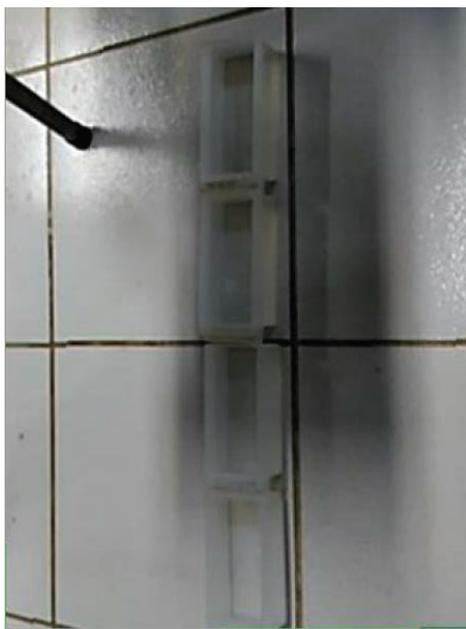
Fonte: Autor.

Outra característica constatada neste tipo de sensor é quando se tem um pequeno número de *pixels* para a aplicação. Se, por exemplo, duas regiões de temperaturas distintas forem cobertas pelo mesmo *pixel*, a temperatura apresentada será a média das temperaturas. Porém, se estas áreas forem cobertas por *pixels* distintos, serão detectadas duas regiões com temperaturas diferentes, uma maior que a outra.

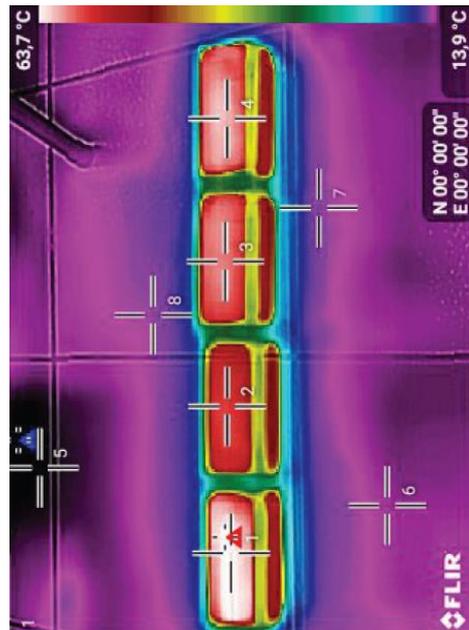
Esta característica de sua operação pode ser visualizada no experimento da Figura 4.7 e Figura 4.8, onde foram medidas as temperaturas de objetos com diferentes temperaturas. Na Figura 4.7a está apresentada a imagem real do objeto de interesse, e na Figura 4.7b apresenta-se a imagem termográfica que corresponde a medição realizada pela câmera térmica de 4800 *pixels* (60x80) da Caterpillar (2016). Ao utilizar o sensor AMG8833 para realizar a medição dos mesmos objetos, uma vez que o sensor possui apenas 64 *pixels*, quando o *pixel* cobre exatamente a área onde está localizado o objeto quente, resulta na leitura máxima de,

aproximadamente, 47°C (Figura 4.8a). Na Figura 4.8b deslocou-se o sensor lateralmente, de modo que o objeto ficasse posicionado entre duas colunas de *pixels*, ou seja, cada *pixel* está parcialmente sobre o objeto e parcialmente sobre o ambiente ao seu redor (piso). Assim, a área detectada, com maior temperatura, aumentou. Porém, a temperatura máxima medida diminuiu para, aproximadamente, 40°C.

Figura 4.7 – Objetos utilizados para aferição da temperatura e imagem térmica: (a) imagem real; (b) imagem termográfica



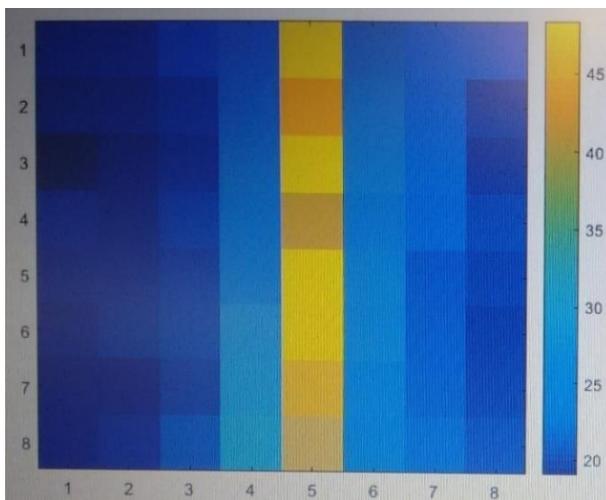
(a) Imagem real



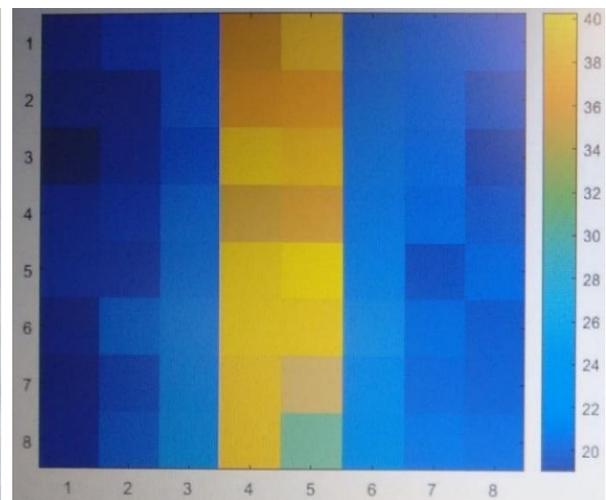
(b) Imagem termográfica

Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Imagens térmicas aferidas pelo sensor AMG8833: (a) *pixel* sobre os objetos; (b) *pixel* parcialmente sobre os objetos



(a) *Pixels* sobre os objetos



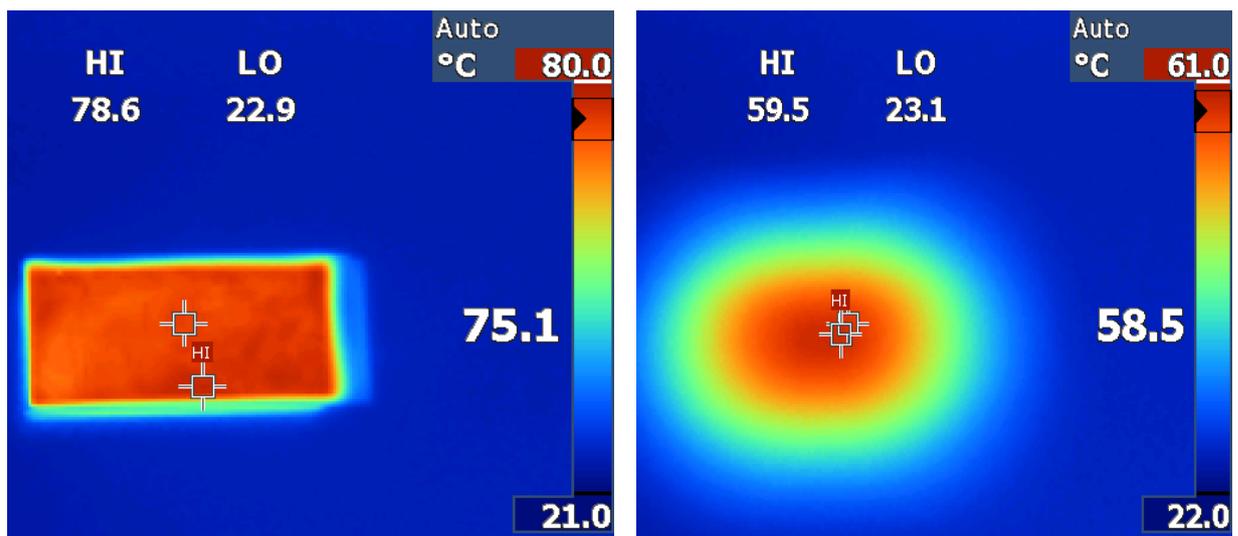
(b) *Pixels* parcialmente sobre os objetos

Fonte: Autor.

Este princípio de funcionamento pode apresentar algumas complicações quando aplicado à pilha de CaC, pois temperaturas críticas de operação podem não ser identificadas quando estão próximas de regiões com temperaturas menores, conforme a Figura 3.6. Uma solução que contorna parte desse problema é o uso de uma lente para ajustar o foco do sensor, semelhante à presente na câmera térmica da Fluke (2007), que possui ajuste focal manual.

O experimento da Figura 4.9 ilustra a importância do ajuste focal na câmera. A Figura 4.9a apresenta a imagem termográfica da câmera com o foco corretamente ajustado para o objeto, já na Figura 4.9b o objeto está fora do foco da câmera, resultando em uma medida de temperatura incorreta, que tende à temperatura do ambiente no seu entorno. Já o sensor AMG8833 não possui uma lente ajustável e nem quaisquer parâmetros de ajuste por ganhos ou algo do similar para atenuar este problema.

Figura 4.9 – Ajuste focal na câmera térmica TiR1 da Fluke: (a) foco regulado para o objeto; (b) objeto fora de foco



(a) Foco regulado para o objeto

(b) Objeto fora de foco

Fonte: Autor.

De forma a contornar as questões elencadas nesta seção, dedicou-se grande parte deste trabalho, cujos procedimentos são abordados na próxima seção.

#### 4.3 COMPENSAÇÕES PARA O SENSOR VIA *SOFTWARE*

Para a visualização das temperaturas medidas pelo sensor foi desenvolvido o código da Figura 4.10, através do *software* MATLAB®. Este é conectado ao sensor através de uma placa

de desenvolvimento ARDUINO. Inicialmente, o sensor envia os valores dos 64 pontos das temperaturas aferidas, formando a matriz 8x8 ilustrada na Figura 4.11.

Figura 4.10 – Código gerado no *software* MATLAB® para comunicação e visualização da imagem térmica capturada pelo sensor infravermelho

```

1 - clear all;
2 - clc;
3
4 - delete(instrfindall);
5 - arduino = serial('COM3','BaudRate',19200); % Configura comunicação
6 - fopen(arduino); % Começa comunicação
7
8 - while 1
9 -     for i= 0:1
10 -         Dados = fscanf(arduino,'%f'); % Lê serial
11 -     end
12
13 -     dados_f = str2num(Dados); % String para número
14 -     dados_matriz = vec2mat(dados_f,8) % Vetor para matriz 8x8
15 -     pause(0.001);
16 -     imagesc(dados_matriz); % Gráfico matricial
17 -     colorbar; % Escala de cor
18 - end
19 - fclose(arduino); % Termina comunicação

```

Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Matriz gerada a partir dos 64 *pixels* do sensor infravermelho

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	31,5	36	36	34,75	35	36,5	34,25	31
2	31,75	37,25	37,25	36	35,25	36	34,75	31,75
3	31,5	37,75	37,25	36,5	36	36,75	35,75	31,5
4	32,25	37,5	37,75	37	36,25	37,25	35,25	32,5
5	31,5	38,75	38,75	37,75	37,5	37,5	36,25	33,5
6	31,25	37,5	37,75	36,75	36,5	36,75	35,75	32
7	29,75	37,25	38,25	37	37,25	37	35,75	31,5
8	30	36	37	36,5	36,25	36	35,5	30,5

29,75 Mínimo
 38,75 Máximo

Fonte: Autor.

### 4.3.1 Interpolação

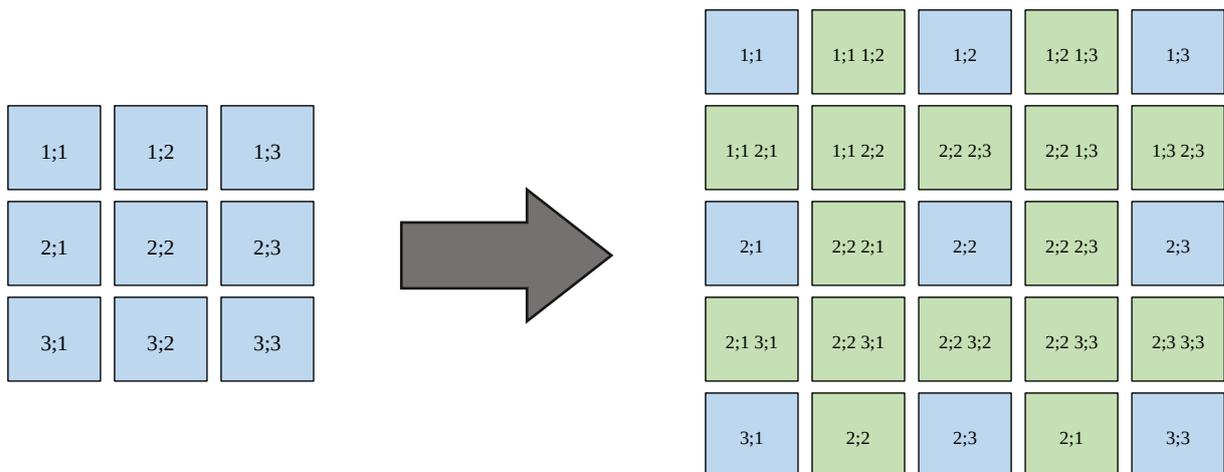
O primeiro passo para aplicar este sensor à medição da temperatura da pilha de células a combustível é aumentar o número de *pixels* via *software*, ou seja, transformar a matriz original de 8x8 em uma matriz de 20x20. Assim, obtendo maiores informações sobre as condições da temperatura de operação da pilha de CaC.

A técnica consiste em interpolar os valores da matriz, ou seja, fazer a média entre todos os *pixels* vizinhos, incluindo os superiores e inferiores, os laterais e os das diagonais. Assim, cada *pixel* se relacionando com os *pixels* vizinhos, um *pixel* é transformado em nove *pixels*.

As exceções são os *pixels* das bordas da matriz, que não possuem dois lados para interagir. Relacionando-se apenas com a lateral esquerda ou direita, assim como os *pixels* dos quatro cantos extremos da matriz, que não se relacionam com nenhum vizinho, são apenas importados para a nova matriz.

Na interpolação admite-se que a variação de um *pixel* para seus vizinhos é a mesma variação dentro de um único *pixel*, ou seja, a região do objeto que esse único *pixel* engloba tem pontos mais quentes ou frios. Essa dinâmica pode ser observada na ilustração da Figura 4.12, onde é interpolada uma matriz de 3x3 para uma de 5x5, sendo que as células com a cor azul são referentes aos *pixels* que são apenas importados para a nova matriz e as células em cor verde representam os *pixels* que são gerados pela interpolação. A mesma metodologia é aplicada para transformar a matriz de 8x8 da Figura 4.11, em uma 20x20, conforme a Figura 4.13.

Figura 4.12 – Interpolação de uma matriz de 3x3 (9 pontos) para outra de 5x5 (25 pontos)



Fonte: Autor.

Figura 4.13 – Matriz de 20x20 (400 pontos) interpolada de uma 8x8 (64 pontos)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	31,5	33,8	36,0	36,0	36,0	36,0	35,4	35,4	34,8	34,9	34,9	35,0	35,8	35,8	36,5	35,4	35,4	34,3	32,6	31,0
2	31,6	34,4	36,6	36,6	36,6	36,6	36,0	36,0	35,4	35,5	35,0	35,1	35,9	35,5	36,3	35,1	35,6	34,5	32,9	31,4
3	31,8	34,5	37,3	37,3	37,3	37,3	36,6	36,6	36,0	35,6	35,6	35,3	35,6	35,6	36,0	35,4	35,4	34,8	33,3	31,8
4	31,6	34,4	37,5	37,3	37,5	37,3	36,9	36,6	36,3	36,0	35,9	35,6	36,0	36,0	36,4	35,9	35,8	35,3	33,1	31,6
5	31,6	34,8	37,5	37,5	37,3	37,3	36,6	36,9	36,3	35,9	36,0	35,6	36,0	36,0	36,4	35,8	35,9	35,3	33,8	31,6
6	31,5	34,6	37,8	37,5	37,5	37,3	36,9	36,9	36,5	36,3	36,3	36,0	36,4	36,4	36,8	36,3	36,3	35,8	33,6	31,5
7	31,9	35,0	37,6	37,8	37,4	37,5	37,1	37,1	36,8	36,4	36,5	36,1	36,6	36,5	37,0	36,0	36,5	35,5	34,1	32,0
8	31,9	34,5	37,6	37,4	37,8	37,5	37,1	37,1	36,8	36,5	36,4	36,1	36,5	36,6	37,0	36,5	36,0	35,5	33,4	32,0
9	32,3	34,9	37,5	37,6	37,6	37,8	37,4	37,4	37,0	36,6	36,6	36,3	36,8	36,8	37,3	36,3	36,3	35,3	33,9	32,5
10	31,9	34,5	38,1	38,1	38,3	38,3	37,8	37,9	37,4	37,3	37,0	36,9	36,9	37,4	37,4	36,8	36,4	35,8	34,4	33,0
11	31,9	35,5	38,1	38,3	38,1	38,3	37,9	37,8	37,4	37,0	37,3	36,9	37,4	36,9	37,4	36,4	36,8	35,8	34,4	33,0
12	31,5	35,1	38,8	38,8	38,8	38,8	38,3	38,3	37,8	37,6	37,6	37,5	37,5	37,5	36,9	36,9	36,3	34,9	33,5	
13	31,4	35,0	38,1	38,3	38,1	38,3	37,8	37,8	37,3	37,1	37,1	37,0	37,1	37,0	37,1	36,6	36,5	36,0	34,1	32,8
14	31,4	34,5	38,1	38,1	38,3	38,3	37,8	37,8	37,3	37,1	37,1	37,0	37,0	37,1	37,1	36,5	36,6	36,0	34,6	32,8
15	31,3	34,4	37,5	37,6	37,6	37,8	37,3	37,3	36,8	36,6	36,6	36,5	36,6	36,6	36,8	36,3	36,3	35,8	33,9	32,0
16	30,5	33,6	37,4	37,9	37,5	38,0	37,4	37,5	36,9	37,0	36,8	36,9	36,8	37,0	36,9	36,3	36,4	35,8	33,6	31,8
17	30,5	34,3	37,4	37,5	37,9	38,0	37,5	37,4	36,9	36,8	37,0	36,9	37,0	36,8	36,9	36,4	36,3	35,8	33,9	31,8
18	29,8	33,5	37,3	37,8	37,8	38,3	37,6	37,6	37,0	37,1	37,1	37,3	37,1	37,1	37,0	36,4	36,4	35,8	33,6	31,5
19	29,9	33,6	36,6	37,1	37,1	37,6	37,4	37,0	36,8	36,6	36,9	36,8	36,6	36,6	36,5	36,3	35,9	35,6	33,1	31,0
20	30,0	33,0	36,0	36,5	36,5	37,0	36,8	36,8	36,5	36,4	36,4	36,3	36,1	36,1	36,0	35,8	35,8	35,5	33,0	30,5

29,75 Mínimo Máximo 38,75

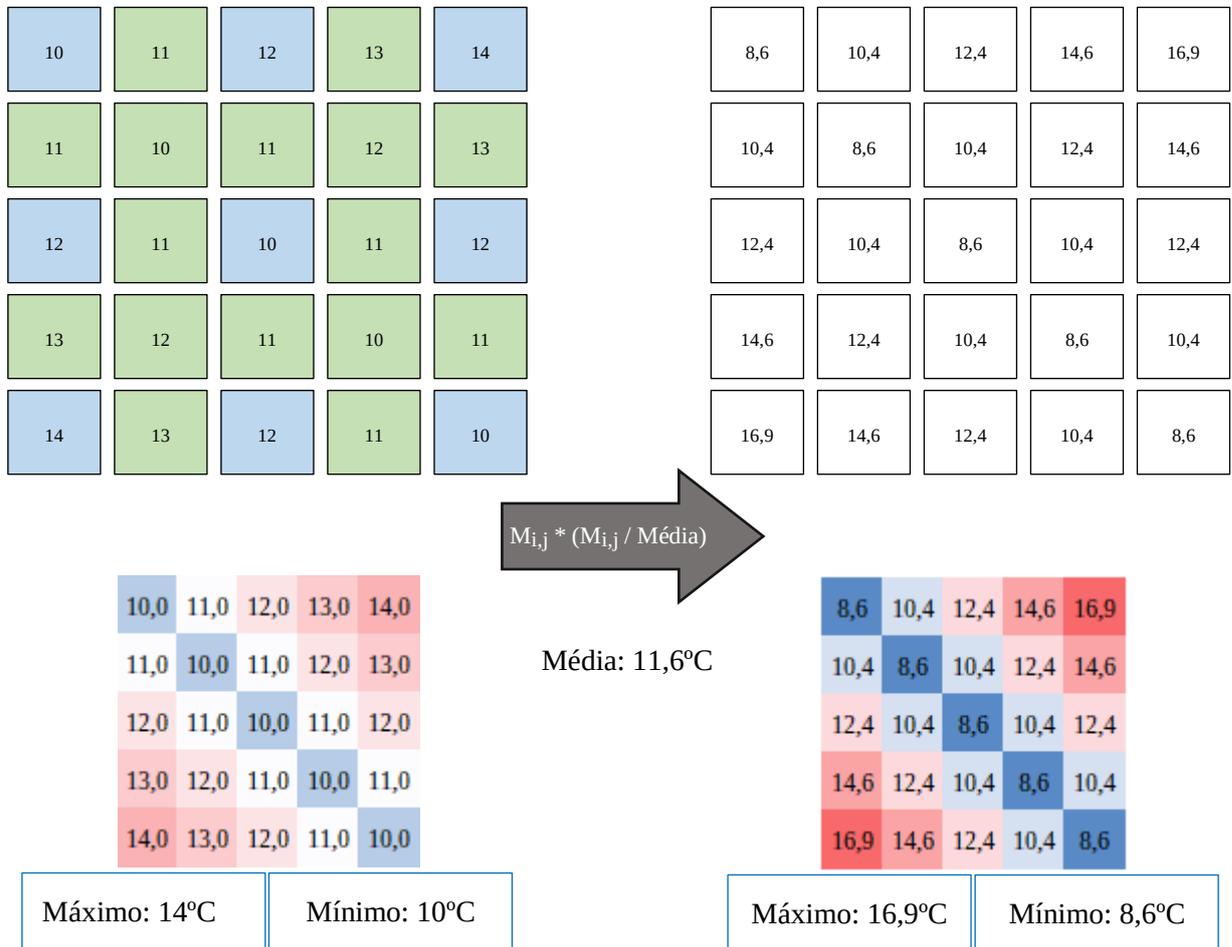
Fonte: Autor.

### 4.3.2 Contraste

Os valores dos pontos gerados ao interpolar os *pixels* não são dados novos, e sim dados com valores intermediários aos dois *pixels* vizinhos. Como as temperaturas de máxima e de mínima da câmera térmica eram significativamente maiores que as identificadas pelo sensor, a próxima etapa consiste em ajustar cada *pixel*, multiplicando-o pela diferença entre o seu valor e a média da matriz interpolada, conforme a ilustração da Figura 4.14, com o intuito de diminuir a diferença entre os valores da câmera térmica (referência) e o sensor. Ao aplicar este contraste, busca-se aumentar a diferença de cada *pixel* em relação à média, ou seja, fazer com que os pontos quentes fiquem ainda mais quentes e os frios, ainda mais frios. Esse processo faz com

que os *pixels* com valores próximos do máximo e mínimo sejam alterados em maiores proporções, e os valores dos *pixels* próximos ao valor da média sofram pouca variação.

Figura 4.14 – Amplitude dos *pixels* modificadas pela sua diferença da média



Fonte: Autor.

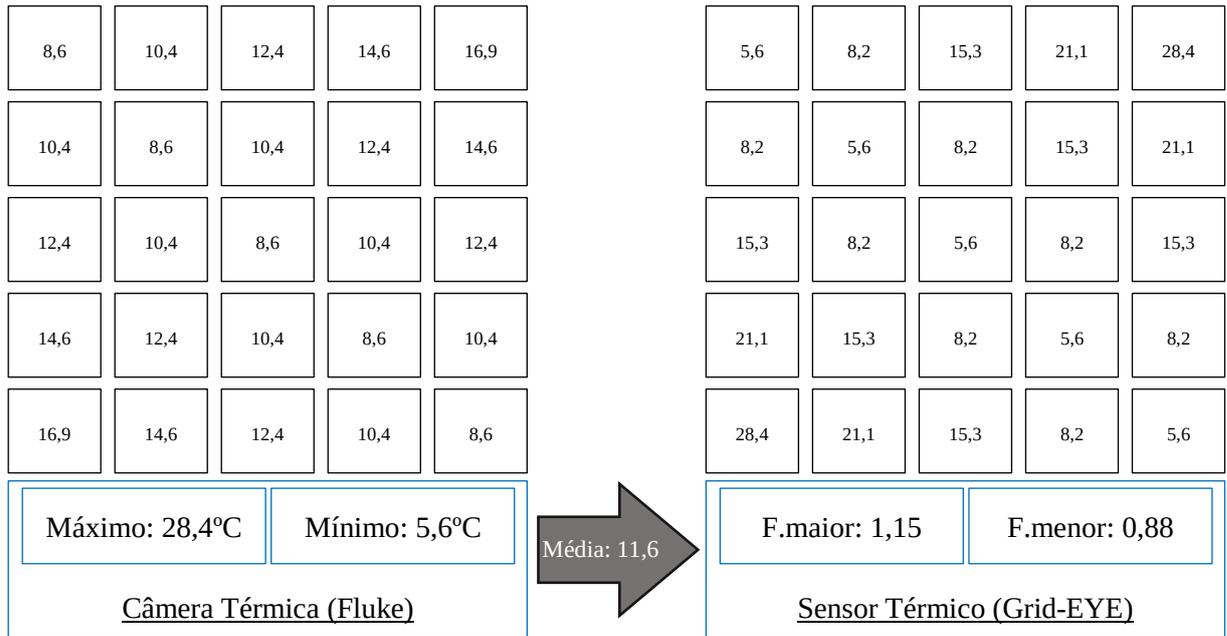
### 4.3.3 Fator de ajuste

Antes mesmo de aplicar o fator de contraste da Figura 4.14 é verificado se o valor de cada *pixel* é maior ou menor que a média total da matriz interpolada e, caso o valor do *pixel* seja maior que a média, ele é multiplicado por um fator que aumente sua amplitude ainda mais, chamado de “fator maior”, e caso seja menor, o *pixel* é multiplicado por outro fator, que diminuirá, chamado de “fator menor”. Assim, a imagem térmica do sensor aproxima-se ainda mais da imagem térmica das câmeras.

Para definir os valores dos fatores, fez-se o uso dos dados da matriz 8x8 do sensor e dos valores de temperatura máxima e mínima da câmera térmica da Fluke, de modo que a cada

amostra determina-se os fatores “maior” e “menor”, para que eles, em conjunto com o ganho de contraste, façam convergir os valores das temperaturas máxima e mínima do sensor com as da câmera térmica, conforme a Figura 4.15. Estes fatores são aplicados em todos os *pixels*, de acordo com seus valores.

Figura 4.15 – Definição dos fatores “maior” e “menor” para que os *pixels* extremos do sensor atinjam as temperaturas máximas e mínimas identificadas pela câmera térmica



Fonte: Autor.

Os procedimentos apresentados estão resumidos no fluxograma da Figura 4.16, onde a matriz inicial de *pixels* do sensor térmico apresentado na Figura 4.11 transforma-se na matriz ilustrada na Figura 4.17. Os fatores “maior” e “menor” são de 1,08535 e 0,85768, respectivamente. O máximo e mínimo da câmera térmica foram 45,3 e 5,6 °C, os quais foram obtidos após o tratamento dos valores dos *pixels* do sensor.

Os valores dos fatores “maior” e “menor” devem ser modificados no decorrer do funcionamento da pilha de CaC, ou seja, a cada leitura do sensor é necessário obter,

concomitante, os valores das temperaturas máxima e mínima através do instrumento de medição de referência (câmara térmica da Fluke) medidor padrão. Porém, esta tarefa não é viável na prática.

Para contornar esta situação, buscou-se um modelo matemático para estimar estes valores. Para isso realizou-se vários testes, em diferentes dias, condições, cargas e tempo de operação. Os valores obtidos foram comparados com o instrumento de medição de referência, totalizando 56 amostras.

Figura 4.16 – Fluxograma simplificado da metodologia para calibração do sensor

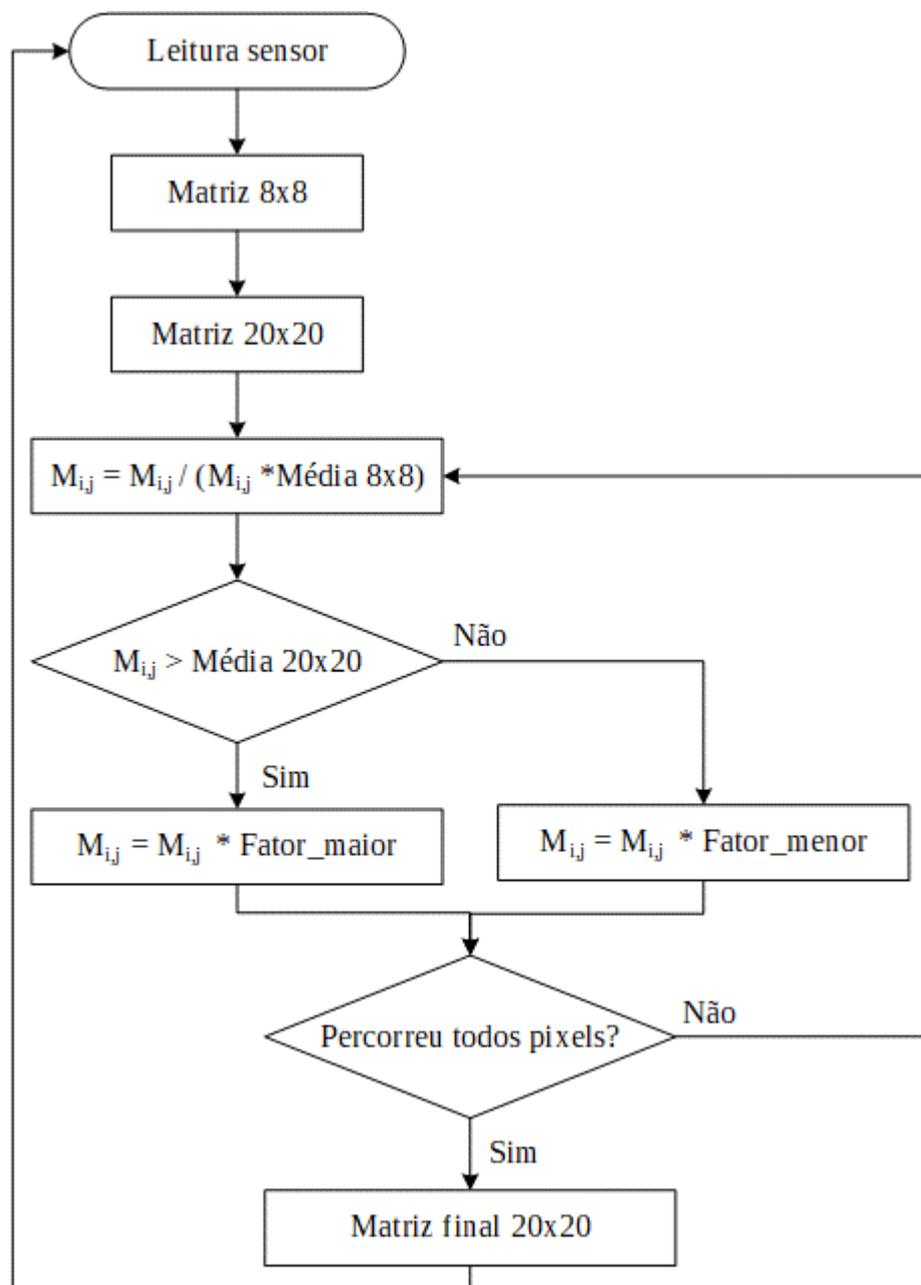


Figura 4.17 – Matriz gerada após o tratamento dos valores dos *pixels*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	23,7	27,2	39,1	39,1	39,1	39,1	29,8	29,8	28,8	29,0	29,0	29,2	30,5	30,5	40,2	29,8	29,8	28,0	25,4	22,9
2	23,8	28,2	40,5	40,5	40,5	40,5	39,1	39,1	29,8	30,0	29,2	29,4	30,7	30,0	39,6	29,4	30,3	28,4	25,8	23,5
3	24,0	28,4	41,9	41,9	41,9	41,9	40,5	40,5	39,1	30,3	30,3	29,6	30,3	30,3	39,1	29,8	29,8	28,8	26,4	24,0
4	23,8	28,2	42,4	41,9	42,4	41,9	41,0	40,5	39,6	39,1	30,7	30,3	39,1	39,1	39,9	30,7	30,5	29,6	26,2	23,8
5	23,8	28,8	42,4	42,4	41,9	41,9	40,5	41,0	39,6	30,7	39,1	30,3	39,1	39,1	39,9	30,5	30,7	29,6	27,2	23,8
6	23,7	28,6	43,0	42,4	42,4	41,9	41,0	41,0	40,2	39,6	39,6	39,1	39,9	39,9	40,7	39,6	39,6	30,5	27,0	23,7
7	24,2	29,2	42,7	43,0	42,1	42,4	41,6	41,6	40,7	39,9	40,2	39,4	40,5	40,2	41,3	39,1	40,2	30,0	27,8	24,4
8	24,2	28,4	42,7	42,1	43,0	42,4	41,6	41,6	40,7	40,2	39,9	39,4	40,2	40,5	41,3	40,2	39,1	30,0	26,6	24,4
9	24,8	29,0	42,4	42,7	42,7	43,0	42,1	42,1	41,3	40,5	40,5	39,6	40,7	40,7	41,9	39,6	39,6	29,6	27,4	25,2
10	24,2	28,4	43,9	43,9	44,1	44,1	43,0	43,3	42,1	41,9	41,3	41,0	41,0	42,1	42,1	40,7	39,9	30,5	28,2	26,0
11	24,2	30,0	43,9	44,1	43,9	44,1	43,3	43,0	42,1	41,3	41,9	41,0	42,1	41,0	42,1	39,9	40,7	30,5	28,2	26,0
12	23,7	29,4	45,3	45,3	45,3	45,3	44,1	44,1	43,0	42,7	42,7	42,4	42,4	42,4	42,4	41,0	41,0	39,6	29,0	26,8
13	23,5	29,2	43,9	44,1	43,9	44,1	43,0	43,0	41,9	41,6	41,6	41,3	41,6	41,3	41,6	40,5	40,2	39,1	27,8	25,6
14	23,5	28,4	43,9	43,9	44,1	44,1	43,0	43,0	41,9	41,6	41,6	41,3	41,3	41,6	41,6	40,2	40,5	39,1	28,6	25,6
15	23,3	28,2	42,4	42,7	42,7	43,0	41,9	41,9	40,7	40,5	40,5	40,2	40,5	40,5	40,7	39,6	39,6	30,5	27,4	24,4
16	22,2	27,0	42,1	43,3	42,4	43,6	42,1	42,4	41,0	41,3	40,7	41,0	40,7	41,3	41,0	39,6	39,9	30,5	27,0	24,0
17	22,2	28,0	42,1	42,4	43,3	43,6	42,4	42,1	41,0	40,7	41,3	41,0	41,3	40,7	41,0	39,9	39,6	30,5	27,4	24,0
18	21,1	26,8	41,9	43,0	43,0	44,1	42,7	42,7	41,3	41,6	41,6	41,9	41,6	41,6	41,3	39,9	39,9	30,5	27,0	23,7
19	21,3	27,0	40,5	41,6	41,6	42,7	42,1	41,3	40,7	40,5	41,0	40,7	40,5	40,5	40,2	39,6	30,7	30,3	26,2	22,9
20	21,5	26,0	39,1	40,2	40,2	41,3	40,7	40,7	40,2	39,9	39,9	39,6	39,4	39,4	39,1	30,5	30,5	30,0	26,0	22,2

21,10 Mínimo Máximo 45,30

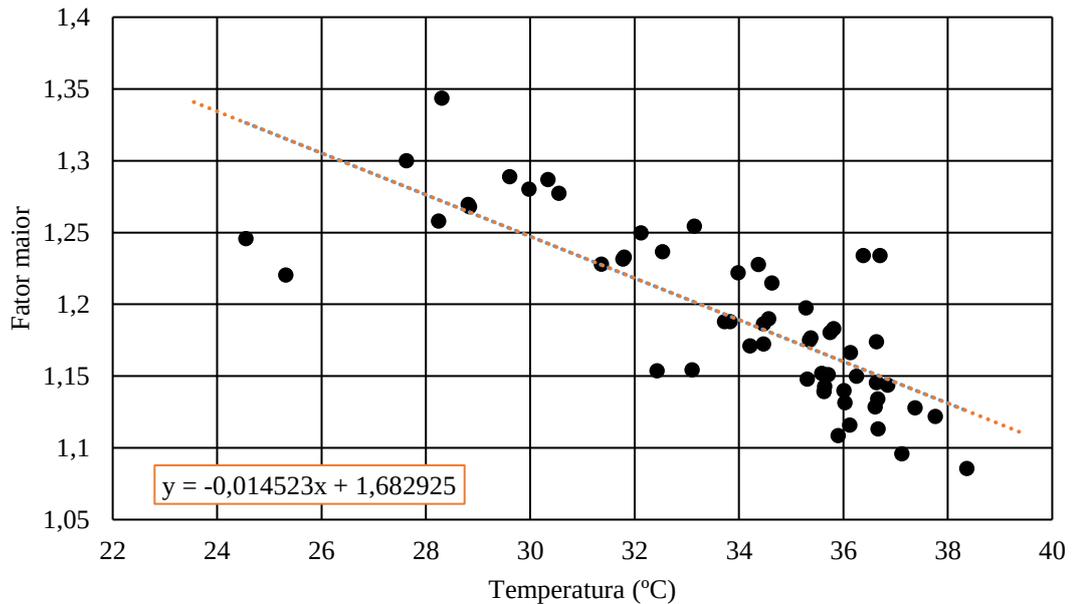
Fonte: Autor.

Analisando os dados obtidos constatou-se a correlação entre a média da matriz 8x8 com os fatores “maior” e “menor”. A Figura 4.18 e a Figura 4.19 ilustram os pontos mencionados dos fatores “maior” e “menor” e as equações utilizada para representar estes fatores durante a operação da pilha de CaC, respectivamente.

Na implementação, estipulou-se que o máximo e mínimo do “fator maior” são 1,3 e 1,0 e do “fator menor” 1,05 e 0,75. Os menores valores dos fatores foram ancorados por não conhecer o comportamento da pilha de CaC. Já os maiores valores dos fatores foram fixados tendo como base a temperatura que a pilha assume ao ser acionada ser sempre na mesma faixa, ou seja, os fatores assumiriam amplitudes que não asseguram a representatividade correta nas

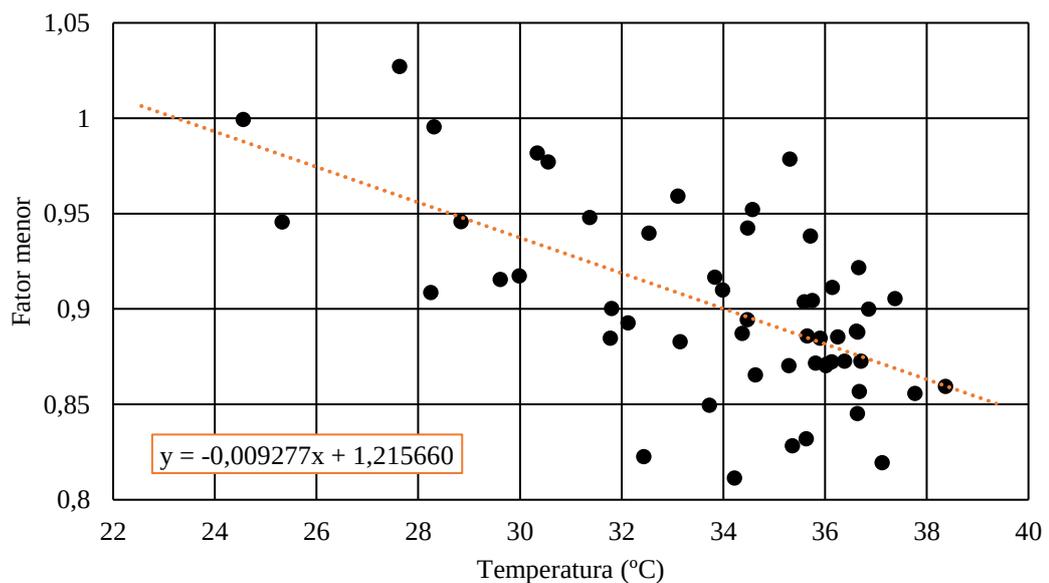
temperaturas baixas por não conter dados inferiores a 22 °C. Dessa forma, as equações que definem estes fatores se fazem válidas para a pilha de CaC do tipo PEM em regime de operação, que consiste na mesma condição em que as amostras foram coletadas.

Figura 4.18 – Equação que representa o “fator maior” da calibragem dos dados do sensor



Fonte: Autor.

Figura 4.19 – Equação que representa o “fator menor” da calibragem dos dados do sensor

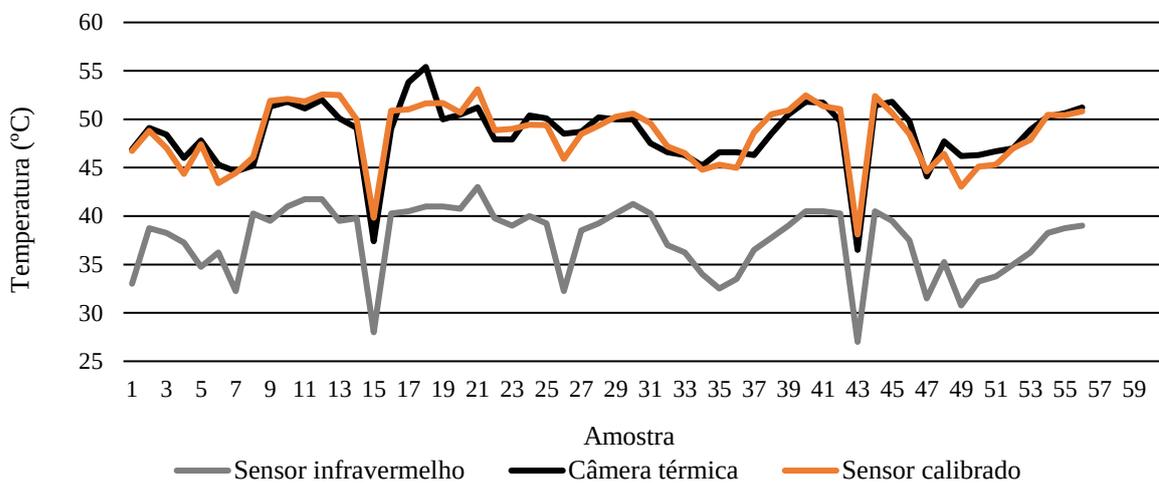


Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Validação da metodologia de calibração via *software*

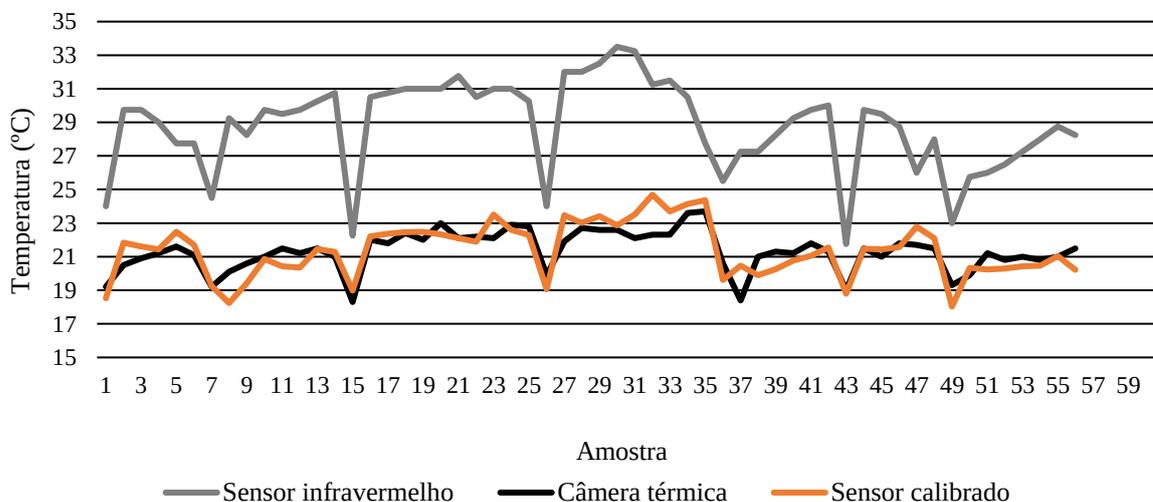
A Figura 4.20 mostra as temperaturas máximas obtidas de três formas: através do sensor sem tratamento matemático, com o tratamento e com a temperatura obtida através do instrumento de referência. A Figura 4.21 mostra os valores obtidos, de forma semelhante ao anterior, porém para a temperatura mínima. Já a Figura 4.22 refere-se as temperaturas médias, onde pode ser observado o aumento da temperatura média do sensor após a calibragem e, a representatividade do uso das equações para os fatores em relação à calibragem com os fatores ideais e individuais para cada amostra.

Figura 4.20 – Diferença entre as temperaturas máximas das amostras



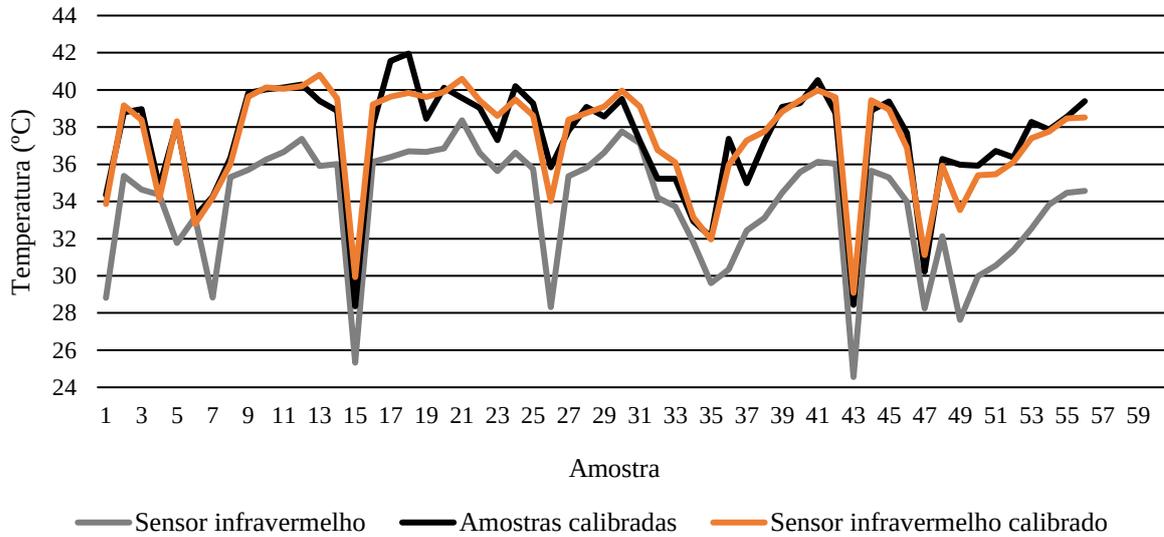
Fonte: Autor.

Figura 4.21 – Diferença entre as temperaturas mínimas das amostras



Fonte: Autor.

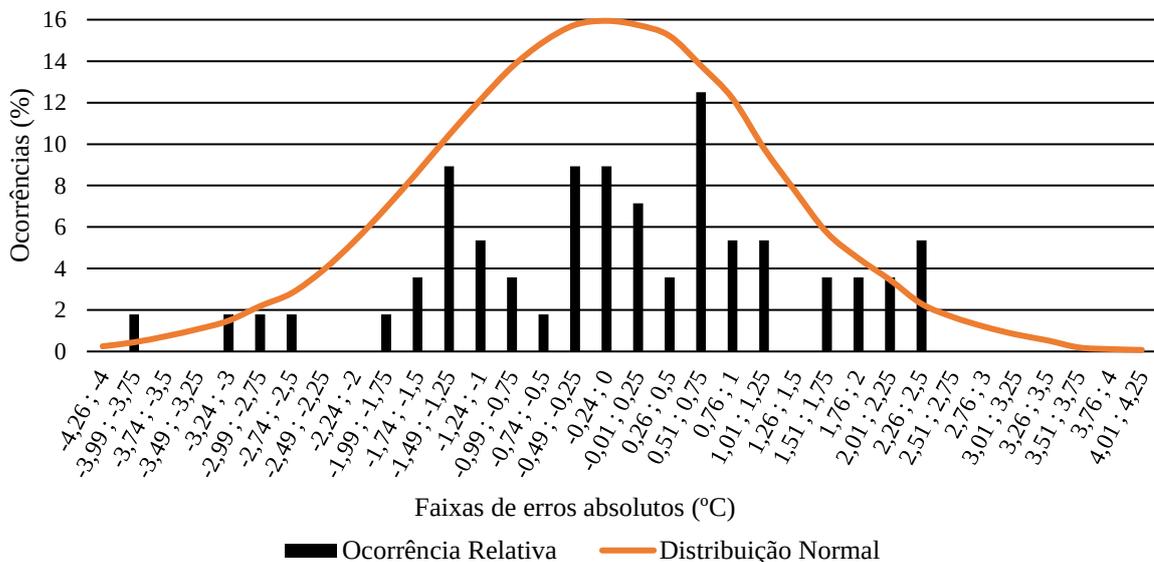
Figura 4.22 – Diferença entre as temperaturas médias das amostras



Fonte: Autor.

As diferenças presentes entre as medidas de um equipamento com maiores capacidades de aferição e as do sensor, mesmo que calibrado, é apresentada na distribuição normal na Figura 4.23, para a temperatura máxima. Pode-se constatar que, aproximadamente, 84% dos erros estão entre -2 e 2°C. Salienta-se que alguns dos valores mais extremos podem ter sido ocasionados pela imprecisão na coleta dos dados, além do acionamento dos ventiladores de arrefecimento da pilha.

Figura 4.23 – Distribuição normal das diferenças da temperatura máxima esperada e obtida

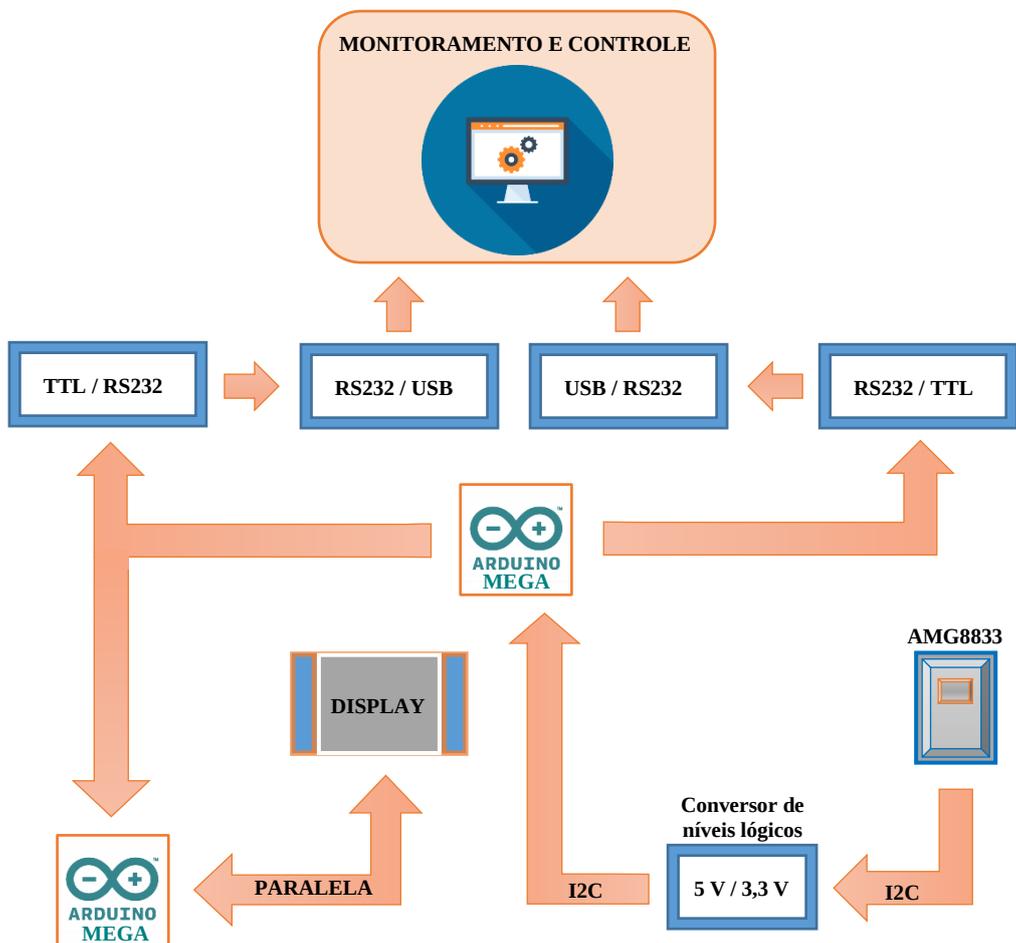


Fonte: Autor.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Esta seção aborda os dispositivos eletroeletrônicos utilizados para implementar o sistema de monitoramento da temperatura da pilha de CaC e a comunicação entre eles, conforme a Figura 4.24. Além disso, apresenta-se os códigos desenvolvidos. A comunicação foi separada em três partes, entre o sensor infravermelho e o ARDUINO, entre o ARDUINO e o computador, e entre o ARDUINO e o *display* (através do outro ARDUINO).

Figura 4.24 – Comunicação entre os componentes do sistema



Fonte: Autor.

#### 4.4.1 Desenvolvimento entre o sensor AMG8833 e o ARDUINO MEGA 2560

O sensor GRID-EYE AMG8833 é o principal componente deste trabalho, ele opera com a tensão de 3,3 V, seja em seu nível de tensão de alimentação como também para comunicação dos dados via I2C, conforme Tabela 4.1. Já o ARDUINO MEGA 2560 que se comunica com o sensor que o envia os 64 *pixels*, possui as principais características elencadas na Tabela 4.2, apresenta uma porta de 3,3 V que é utilizada para suprir a alimentação do sensor. As demais ferramentas disponíveis neste *hardware*, como a comunicação I2C, por exemplo, operam com 5 V. Por este motivo é utilizado um conversor de nível lógico bidirecional, Figura 4.25, para adequar estes sinais e viabilizar a comunicação entre os componentes.

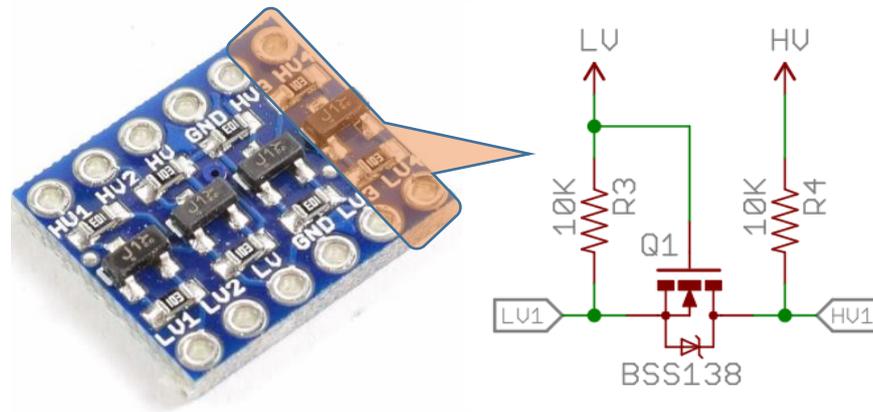
Devido manipulação de diversas matrizes e variáveis, necessita-se de uma placa de desenvolvimento que possua pouco mais de 4 kB de SRAM. Para isso, utilizou-se o ARDUINO MEGA. Caso fosse utilizado o ARDUINO UNO (ARDUINO, 2017b) ou o NANO (ARDUINO, 2017c), a utilização seria superior aos 200%, neste quesito, enquanto que no ARDUINO MEGA utiliza-se 55% utilizado da memória.

Tabela 4.2 – Principais características do ARDUINO MEGA 2560

Descrição	Especificação
Modelo	MEGA 2560
Tensão de operação (V)	5
Máxima tensão de alimentação (V)	6 a 20
Tensão de alimentação recomendada (V)	7 a 12
Pinos de entrada/saída digitais	54
Pinos de entradas analógicas	16
Corrente do pino de 3,3 V (mA)	50
Memória de Programa Flash (kB)	256
Memória SRAM (kB)	8
Memória EEPROM (kB)	4
Clock (MHz)	16
UARTs	4
Buffer UART (Bytes)	64
Porta I2C	1

Fonte: Adaptado de ARDUINO (2017a).

Figura 4.25 – Conversor de nível lógico bidirecional



Fonte: Adaptado de Mechatronics (2018).

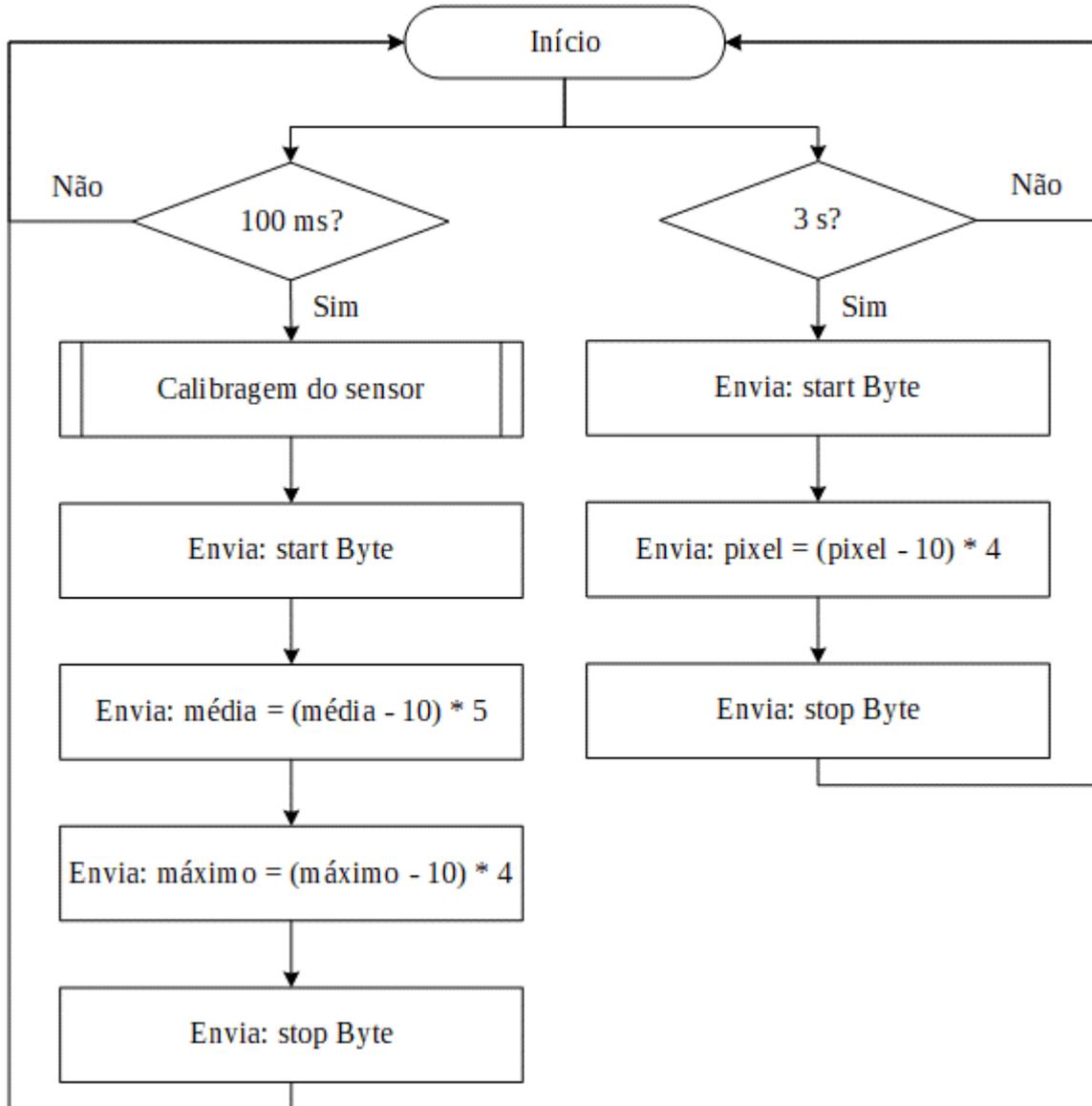
A parcela da programação implementada no ARDUINO correspondente ao sensor infravermelho é basicamente o processo de calibragem do sensor, Figura 4.16, e a inclusão da biblioteca “Adafruit\_AMG88xx.h”, que pode ser adquirida gratuitamente em Github (2018). Esta biblioteca basicamente simplifica o acesso aos dados do sensor, assim como facilita a manipulação de algumas variáveis, como a taxa de leitura em 1 ou 10 vezes por segundo.

#### 4.4.2 Desenvolvimento entre o ARDUINO MEGA 2560 e o computador

Após o ARDUINO receber e tratar os dados do sensor, ele deve transmitir estas informações para o computador. O envio de dados para o supervisor ocorre a cada 100 ms e 3s, dependendo da informação desejada, Figura 4.26. Para a transmissão ser periódica é utilizada a função “*millis()*” do *software* ARDUINO. Esta função inicia um contador interno automaticamente quando o *hardware* é alimentado, eliminando assim, os problemas relativos ao uso indevido da função de atraso (*delay*).

A cada 100 ms são enviados para o supervisor (computador) os valores das temperaturas média e máxima da pilha de CaC. Portanto, neste período é realizada a varredura da matriz do sensor, a calibragem das temperaturas medidas, conforme o fluxograma da Figura 4.16, a determinação dos fatores “maior” e “menor”, conforme a Figura 4.18 e Figura 4.19 e, ainda, a codificação destas temperaturas para o envio. Este período foi determinado com base na velocidade do sensor (dez leituras por segundo).

Figura 4.26 – Fluxograma da rotina implementada no ARDUINO MEGA 2560



Fonte: Autor.

A cada três segundos ocorre o condicionamento e o envio, para o computador, dos 64 *pixels* recebidos da leitura do sensor, para a construção da imagem térmica da pilha de CaC no supervisório da planta. O envio dos dados acontece em um período relativamente longo. Isto ocorre porque é necessário um grande processamento por parte do computador, que dá suporte ao supervisório nele implementado, visto que são realizados os cálculos de calibragem e é montagem da imagem gráfica, concomitantes às demais funções já implementadas no controle e monitoramento da planta. Esta frequência de envio de dados se mostrou a melhor opção para que o atual computador utilizado consiga processar a imagem e não fique muito lento. A atualização do computador por um de maior poder de processamento não é prioridade, pois a

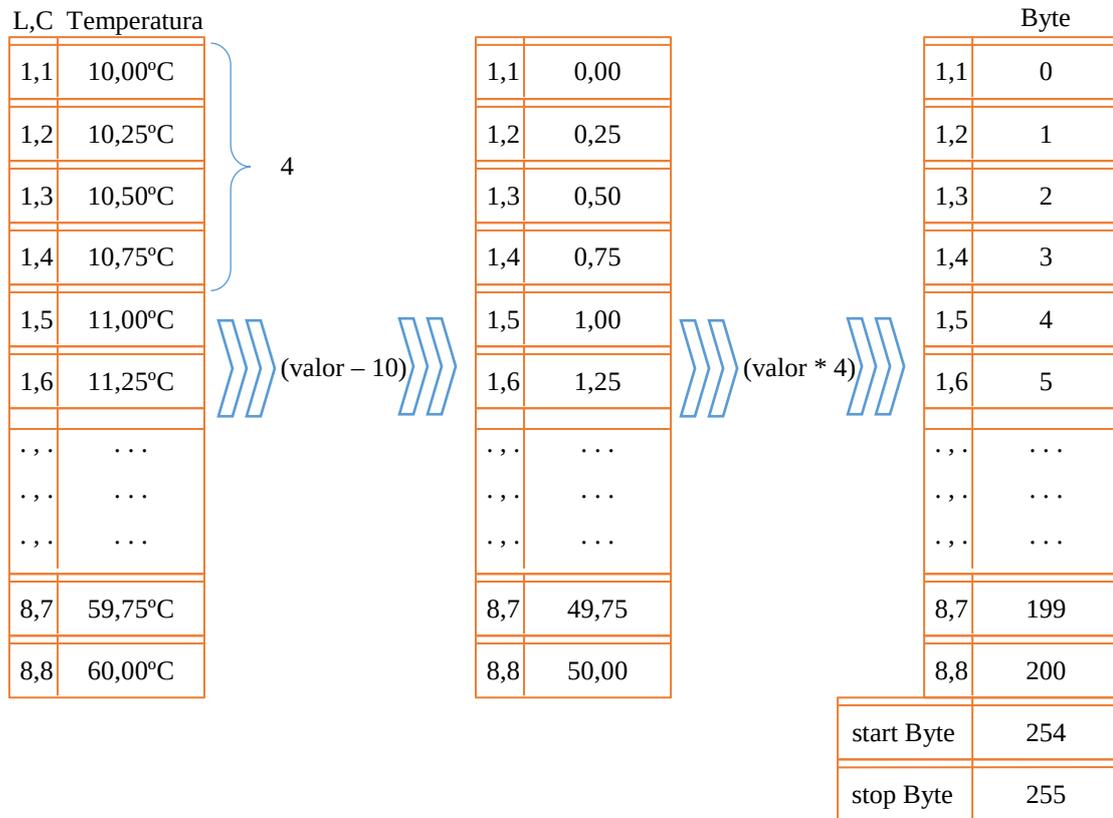
imagem térmica da pilha de CaC, tem como objetivo apenas a visualização, visto que o controle efetivo da temperatura da pilha tem como realimentação a temperatura média da pilha.

A cada três segundos, por estar ligado ao mesmo barramento, também são enviados os dados para a construção da imagem térmica em um *display*, localizado na pilha de células a combustível. A aplicação relacionada a esta comunicação será melhor apresentada no próximo subcapítulo.

Para otimizar a transferência dos dados, optou-se por não enviar os *pixels* em seu formato original (*float*), mas sim convertê-los e enviá-los na forma de *bytes* (8 bits). Isto porque os dados do tipo *float* utilizam 4 *bytes*. Assim, para o pior caso, em que são enviados os 64 *pixels* do ARDUINO para o computador, serão utilizados somente 64 *bytes* para os dados, ao invés dos 256 *bytes* (caso fosse utilizado o formato *float*). Como a comunicação serial envia *byte* a *byte*, quanto menos *bytes* para o envio ou recebimento, menor o tempo utilizado. Além disso, o *buffer* da serial do ARDUINO possui um tamanho de 64 *bytes*, ou seja, são extrapolados apenas em 2 *bytes* (*start* e *stop Byte*). O tamanho do *buffer* não se caracteriza exatamente como um empecilho para o envio dos 256 *bytes*, pois, ao chegar na porta serial o primeiro *byte* da transmissão, inicia-se o processo de leitura da porta, se assim implementado, e por consequência é retirado este *byte* do *buffer*, na forma de uma fila, *byte* a *byte*.

A conversão dos dados é basicamente uma adequação dos valores adquiridos em *float* para *bytes* (0 a 255), conforme as equações apresentadas no fluxograma da Figura 4.26. Para realizar essa conversão dos dados assumiram-se duas condições. A primeira é a faixa de operação da pilha, que foi definida entre 10 e 60°C. Esta condição é real, pois durante o funcionamento da pilha, o seu controle de temperatura é baseado na temperatura média, em torno dos 40°C, fazendo com que as temperaturas máximas atingidas se aproximem dos 50°C, e ainda, quando a temperatura atingir 60°C a pilha é desligada. Deste modo, como a resolução do sensor é de 0,25°C, a faixa de 50 pode ser representada por 200 *bytes*, conforme a exemplificação da Figura 4.27. A subtração da constante “10” da equação trata-se justamente de um *offset* para a conversão, ou seja, ao invés da temperatura 0°C ser o *byte* 0, 10°C passa a ser o *byte* de valor 0. A segunda condição assumida é quanto a resolução dos dados. Admitiu-se uma resolução 0,25°C para os *pixels* do sensor (matriz 8x8), e para a temperatura máxima. Para os valores de temperatura média, admitiu-se uma resolução de 0,20°C, pois esta temperatura é utilizada como sinal de referência para o controle da temperatura. Além do mais, a temperatura média não se aproxima dos 50°C, e sim dos 40°C o que torna possível a sua representação com maior resolução.

Figura 4.27 – Codificação dos dados para a transmissão (variação de 0,25°C)

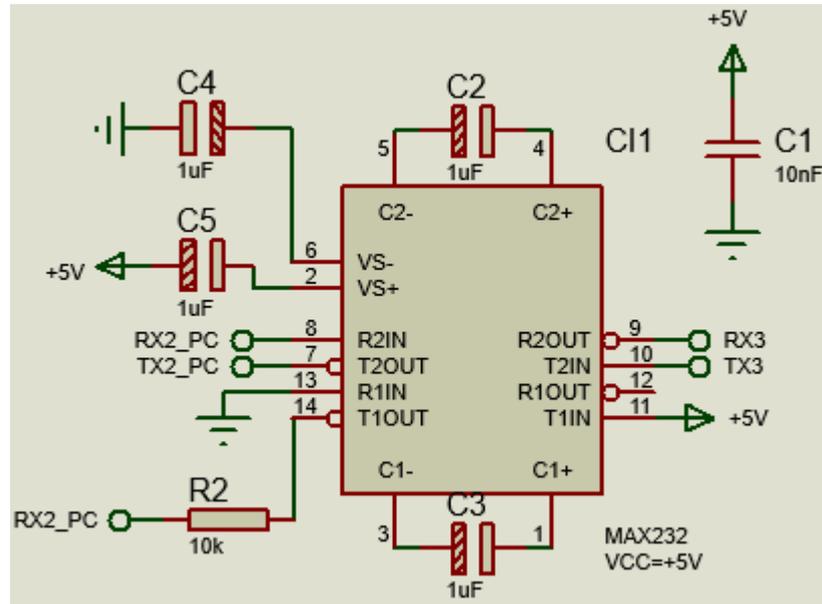


Fonte: Autor.

Definida a conversão para a transmissão de cada variável, o identificador de início da mensagem (*start Byte*) ou término (*stop Byte*) foram estipulados como sendo os *bytes* 254 e 255, respectivamente, para todos os casos de transmissão. O código completo desenvolvido no *software* ARDUINO está detalhado no ANEXO A.

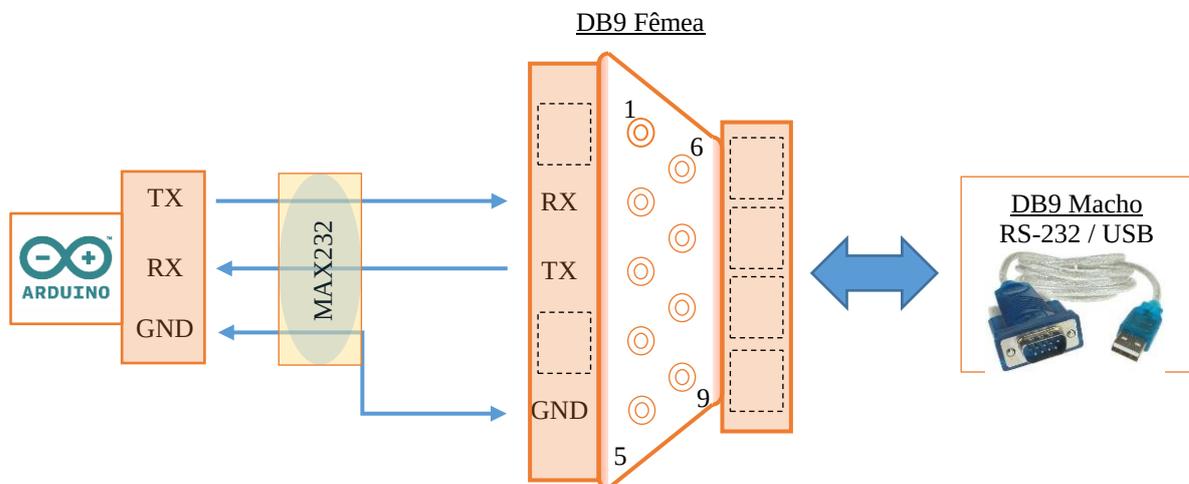
O ARDUINO que recebe os dados do sensor infravermelho envia os valores médio, máximo e a matriz via comunicação serial ( $T_x$  e  $R_x$ ) utilizando níveis lógicos TTL (ARDUINO, 2017d), Figura 4.24. Estes dois canais são convertidos do nível TTL para RS-232 devido à distância física entre o computador e o ARDUINO, que demanda aproximadamente 8 metros de cabo, sendo 15 m a distância máxima admissível pelo padrão RS-232 (PINHEIRO, 2018). A conversão é realizada através do circuito integrado MAX232 (INSTRUMENTS, 2014), cujo esquemático está representado na Figura 4.28 com a inclusão de um resistor de *pull up* para evitar flutuação no canal RS-232. Para conectar no computador é utilizado um cabo conversor de DB9 (RS-232) para USB (serial) (ATEN, 2013). Na Figura 4.29 está ilustrado o conector DB9 que foi acoplado ao cabo conversor RS-232/USB, bem como as conexões físicas entre os dispositivos.

Figura 4.28 – Esquemático de ligação para o MAX232, com *pull-up*



Fonte: Adaptado de Instruments (2014, p. 11).

Figura 4.29 – Conexões entre os dispositivos



Fonte: Autor.

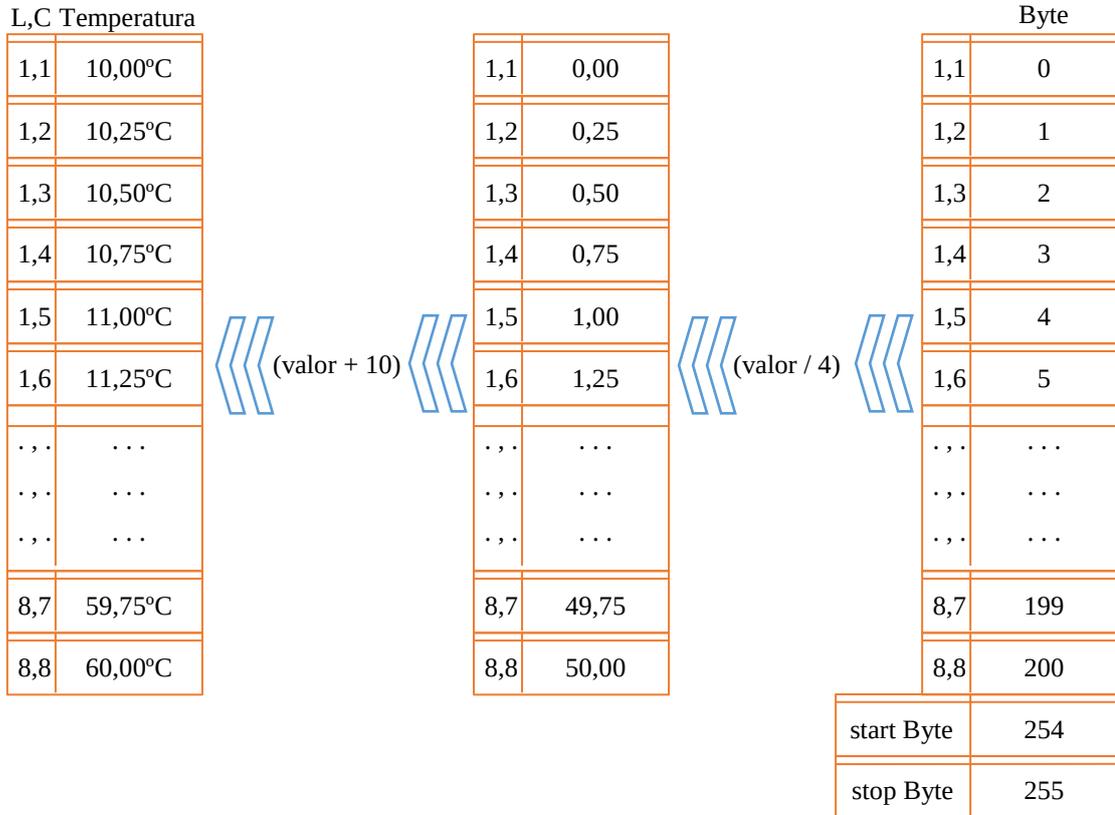
O programa de monitoramento foi desenvolvido baseado no *software* LabVIEW<sup>®</sup>, que aborda uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela *National Instruments*. O *software* possui dois ambientes de trabalho, o “painel frontal” que possui a interface visual, e o “diagrama de blocos”, onde é desenvolvido o código gráfico do programa na forma de fluxo de dados, dita linguagem “G”. Estes dois ambientes reunidos são conhecidos como VI’s (virtual instruments) (INSTRUMENTS, 2014).

Foram desenvolvidos dois programas, ou VI's, que foram adicionados ao supervisor existente na planta armazenadora de energia. Um deles recebe a temperatura média e máxima, e o outro a matriz de 64 *pixels*. Estes dois programas basicamente ficam aguardando chegar o “*start Byte*” em suas portas seriais, e coletam a mensagem até o “*stop Byte*”. Os demais procedimentos ocorrem com o uso de um bloco “MathScript RT”, que permite o uso de matemática textual e a interpretação dos arquivos “.m” (MATLAB®). Com esse módulo é facilitada a manipulação das matrizes, de forma semelhante às desenvolvidas no ARDUINO, apenas adequando a sintaxe de linguagem e o uso das funções presentes em um dos *softwares*, mas não em outro.

No envio dos dados, seus formatos foram alterados de *float* para *byte*. No *MathScript* é realizado o processo inverso, ou seja, ocorre a reconstrução da informação de temperatura, de *byte* para *float*, conforme a ilustração da Figura 4.30. A Figura 4.31 traz a programação de recebimento dos dados de temperaturas média e máxima pela serial, desenvolvida no *LabVIEW*®, e na Figura 4.32 para o recebimento dos 64 pontos do sensor. A programação completa do bloco *MathScript* da Figura 4.32 pode ser observada no ANEXO B.

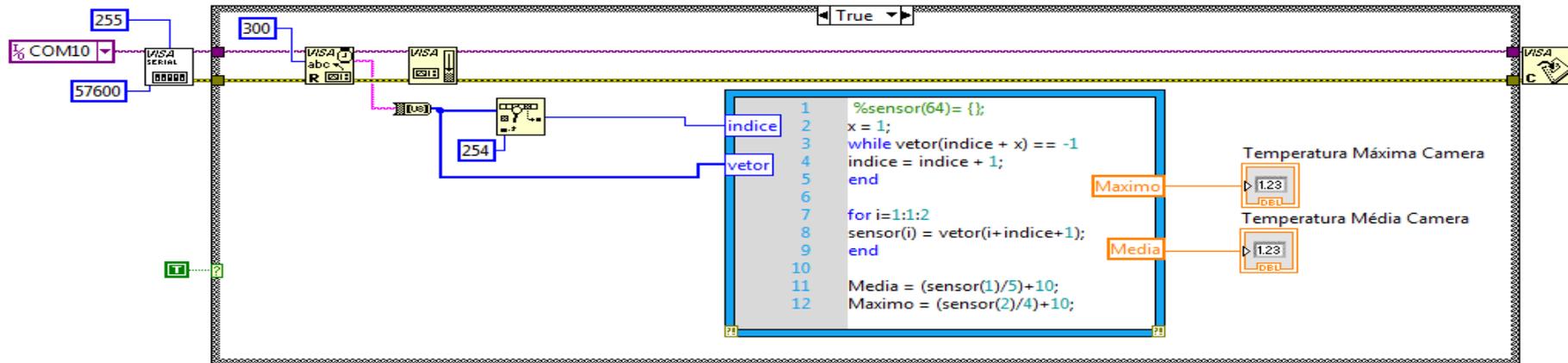
Por fim, na Figura 4.33 está representada a tela atualizada do supervisor da planta, responsável pelo controle e monitoramento da pilha de células a combustível. A modificação refere-se na adição de dois *displays*, para as temperaturas média e máxima, e o gráfico para a exibição da imagem térmica gerada a partir do sensor. A tela original, antes da adição destes itens, está ilustrada na Figura 3.3.

Figura 4.30 – Decodificação dos dados recebidos (variação de 0,25°C)



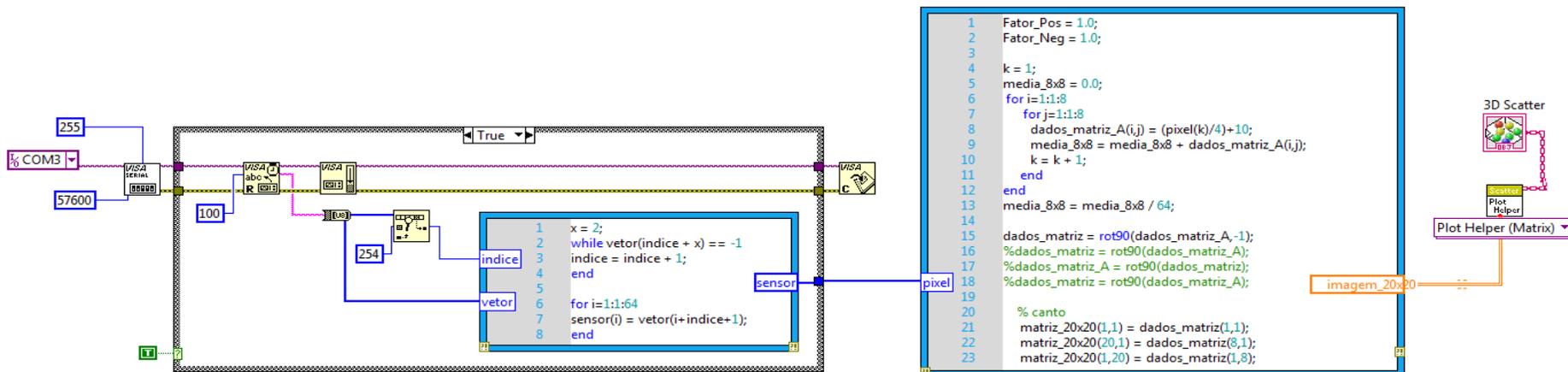
Fonte: Autor.

Figura 4.31 – Código desenvolvido no *LabVIEW*<sup>®</sup> para receber a temperatura média e máxima



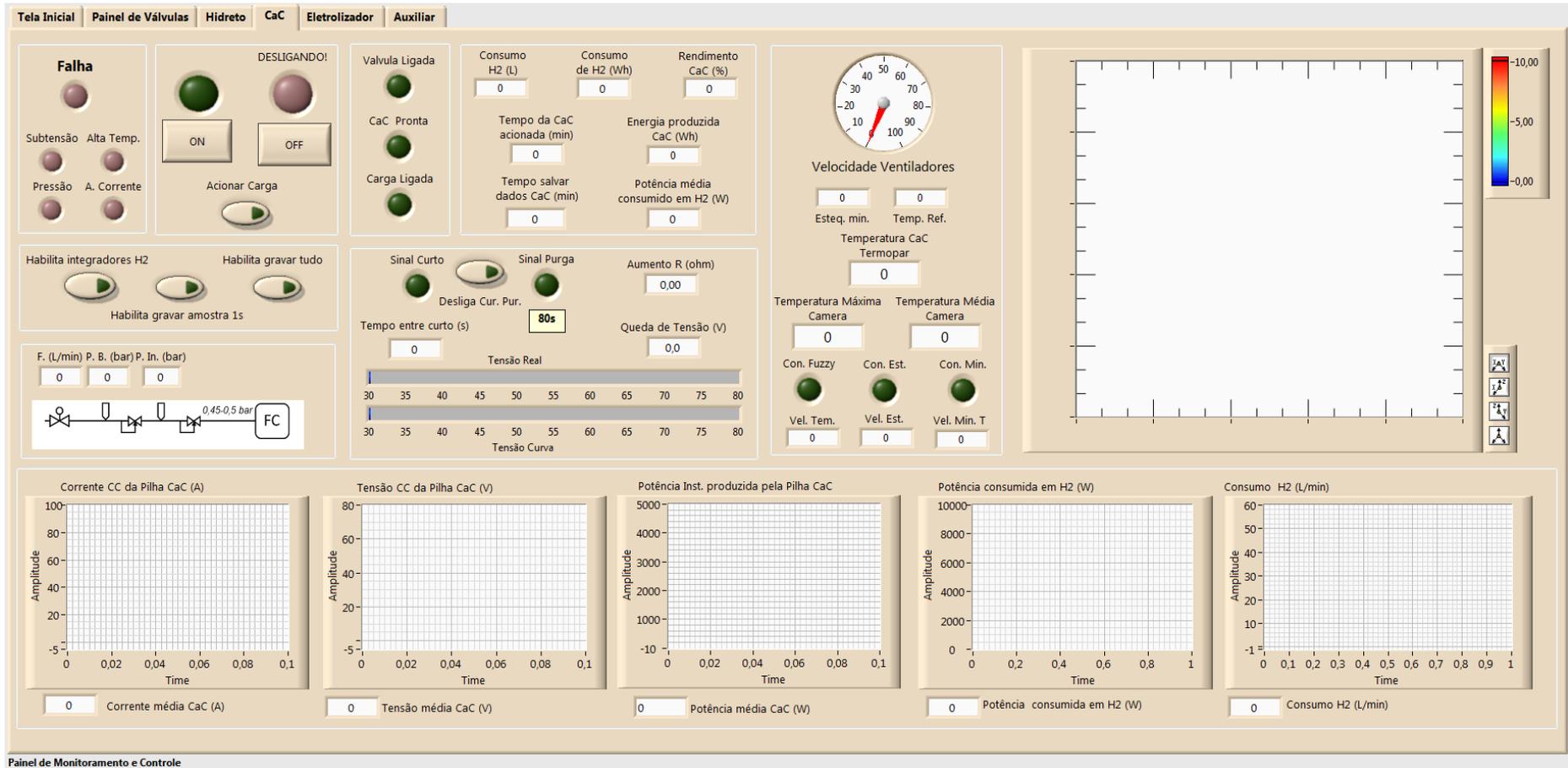
Fonte: Autor.

Figura 4.32 – Código desenvolvido no *LabVIEW*<sup>®</sup> para receber os dados do sensor AMG8833



Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Tela do supervisorio modificada, aba da pilha de CaC



Fonte: Autor.

#### 4.4.3 Desenvolvimento entre o ARDUINO, ligado ao sensor, e o *display*

O código desenvolvido no ARDUINO ligado ao *display* é semelhante ao empregado naquele conectado ao sensor infravermelho, com a exceção do uso da biblioteca “UTFT.h”, que pode ser adquirida sem custo em Github (2015). Esta biblioteca facilita a construção gráfica no *display*, disponibilizando algumas funções prontas, como as mencionadas na Tabela 4.3. Além disso, outra diferença entre os códigos dos ARDUINOS é o desenvolvimento da escala de cor automática para a representação da imagem térmica da pilha no *display*, cuja função não está implementada na biblioteca.

Tabela 4.3 – Principais funções da biblioteca UTFT.h

Função	Parâmetros	Especificação
InitLCD()	0 ou 1	Inicializa o LCD (retrato ou paisagem)
clrScr()	-	Limpa o <i>display</i>
setColor()	VGA_BLACK ...	Define a cor de um objeto
setColor()	R,G,B	Define a cor de um objeto
setBackColor()	VGA_BLUE ...	Define a cor de fundo
fillScr()	R,G,B	Preenche a tela com uma cor
drawPixel()	x,y	Aciona um <i>pixel</i>
drawLine()	x1, y1, x2, y2	Linha entre dois pontos
drawRect()	x1, y1, x2, y2	Retângulo entre dois pontos
drawRoundRect()	x1, y1, x2, y2	Retângulo com cantos arredondados
fillRect()	x1, y1, x2, y2	Retângulo preenchido
drawCircle()	x, y, raio	Círculo no ponto
print()	string, x, y	Escreve um texto no visor
printNumI()	int, x, y	Escreve um número do tipo inteiro
printNumF()	float, fração, x, y	Escreve um número do tipo decimal

Fonte: Adaptado de Karlsen (2016).

Sendo assim, o ARDUINO fica aguardando o “*start Byte*” na serial (comunicação TTL) e, quando ele é identificado, a mensagem é coletada até o “*stop Byte*”, para então reconstruir os dados do formato de *byte* para *float*, tornando-os legíveis novamente, conforme a ilustração da Figura 4.30. Com os 64 pontos do sensor, o procedimento é o mesmo apresentado pelo fluxograma da Figura 4.16, também utilizando as equações dos fatores “maior” e “menor”, obtendo a matriz de 400 pontos que representam as temperaturas da pilha de CaC.

No *LabVIEW*<sup>®</sup> o gráfico utilizado para ilustrar a matriz de 20x20, na forma de uma imagem térmica, permite a seleção das cores do gradiente. Entretanto, a biblioteca “UTFT.h” não contém nada implementado neste sentido, e por isso foi elaborada uma função que realiza este procedimento. A escala de cor escolhida está ilustrada na Figura 4.34, sendo que a cor “verde claro” não é utilizada, ela apenas é construída por ser intermediária entre as cores “azul claro” e “amarelo”, devido a lógica implementada.

Figura 4.34 – Escala de cores RGB escolhida para construção da imagem térmica

R	G	B		
0	255	255	→	Azul claro
125	255	130	→	Verde claro
255	255	0	→	Amarelo
255	214	0	→	Laranja
255	0	0	→	Vermelho

R+G+B = 768

} 0 a 255

} 256 a 511

} 512 a 768

Fonte: Autor.

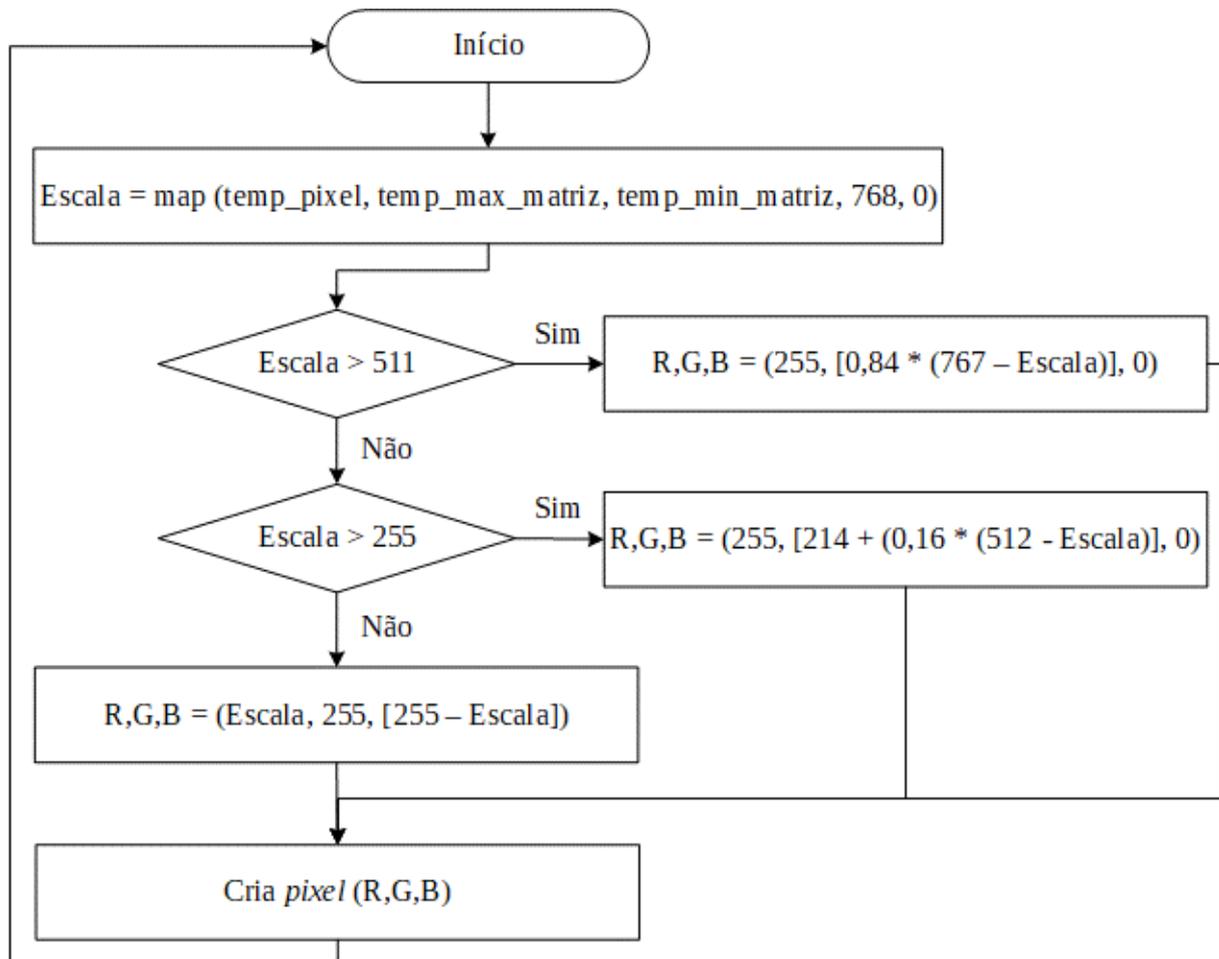
Por possuir as dimensões de 320x480 *pixels*, a composição da matriz 20x20 no *display* de 3,2” permite que cada célula da matriz ocupe 16 *pixels* do *display*, de modo a preencher toda a área do visor (horizontal). Assim, cada ponto da matriz será representado por um quadrado de 16x16 *pixels* no *display*, e cada quadrado terá sua cor definida segundo o fluxograma da Figura 4.35. Onde, primeiramente, é readequado o valor da temperatura do *pixel* da matriz, de sua escala da temperatura da pilha para a escala RGB, a cada matriz 8x8 recebida, com o uso da função “*map*” do ARDUINO, e de acordo com a amplitude deste valor, é definida a amplitude dos valores de R, G, e B, gerando a cor que irá compor os 16x16 *pixels* do *display*.

O primeiro caso é para temperaturas mais elevadas, em que a escala calculada está entre 768 e 512, Figura 4.35. Portanto, a variação de cor é do “vermelho” até o “laranja”, sucessivamente, conforme o código RGB da Figura 4.34, ou seja, muda apenas o G, que é alterado de 0 à 214.

No segundo caso, para as temperaturas intermediárias (entre as escalas 511 e 256), ocorre o mesmo processo, porém a variação ocorre do “laranja” até o “amarelo”, consecutivamente, variando novamente apenas o “verde”, de 214 para 255. A variação do “vermelho” para o “amarelo”, nos dois casos, somente variou o G, na proporção de 84% do

“verde” no primeiro caso (0 à 213, de 255), e o complementar para o segundo caso, 16%. Por esse motivo justifica-se a presença destas constantes nos dois primeiros cálculos do RGB (Figura 4.35).

Figura 4.35 – Fluxograma da definição da cor (R,G,B) de um *pixel*



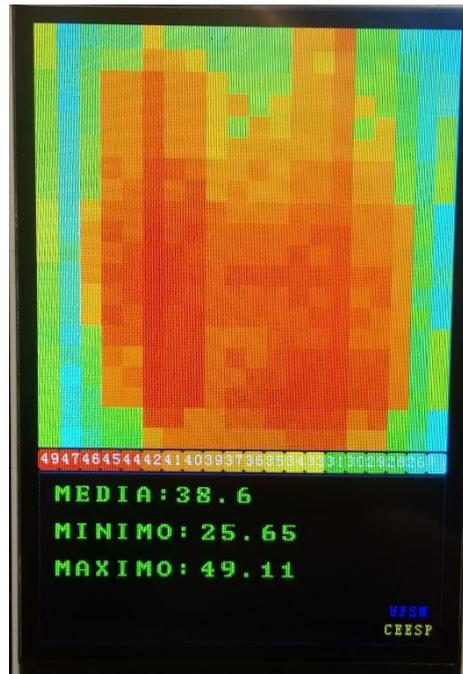
Fonte: Autor.

Quando as temperaturas são mais baixas, a representação é do “amarelo” para o “azul” (escala entre 255 e 0). Para obter a cor “azul” a partir da cor “amarelo” é incrementado o *R* na mesma proporção que é decrementado o *B*, o que gera a cor “verde” nesta transição e, no final, a cor “azul”. Para cada *pixel* de temperatura esse processo se repete, e é enviado ao *display*, até que todos os 400 pontos da matriz possuam uma cor, toda vez que o ARDUINO recebe os dados do sensor, a cada 3 s.

A faixa da escala é gerada da mesma forma, de modo que a temperatura mínima e máxima sejam as cores mais frias e quentes, respectivamente. O valor das temperaturas de cada *pixel* (16x16 *pixels* do *display*) são impressos como números inteiros, somente para indicar

sobre as faixas de temperaturas presentes na imagem térmica. Já na matriz da imagem térmica da pilha não há os valores das temperaturas, visando simplificar a figur. Na Figura 4.36 contém o resultado deste trabalho no *display* durante um teste de operação na pilha de CaC. O código completo desenvolvido no *software* ARDUINO está disponível no ANEXO C.

Figura 4.36 – Imagem térmica exibida no *display*



Fonte: Autor.

Quando é gerado o código RGB para um ponto do *display*, envia-se para ele (comunicação paralela) as coordenadas do ponto inicial e final da figura geométrica (quadrado) e a cor estipulada. Todo este processo demanda aproximadamente 2,4 s, desde o cálculo do código RGB até a conclusão da impressão da imagem térmica no *display*. Por este motivo foi definido o envio da matriz de 64 pontos do sensor a cada 3 s. Deste modo, justifica-se o uso de um microcontrolador dedicado ao *display*, pois d contrário, o *hardware* poderia ficar sempre ocupado e não conseguir enviar à central de controle e monitoramento da planta, a cada 100 ms, as temperaturas média e máxima da pilha de CaC. Além disso, por ter sido desenvolvido em dois microcontroladores diferentes, há a possibilidade de implementar o controle local do sistema de arrefecimento da pilha.

## 4.5 PROJETO E CONSTRUÇÃO FÍSICA DOS DISPOSITIVOS

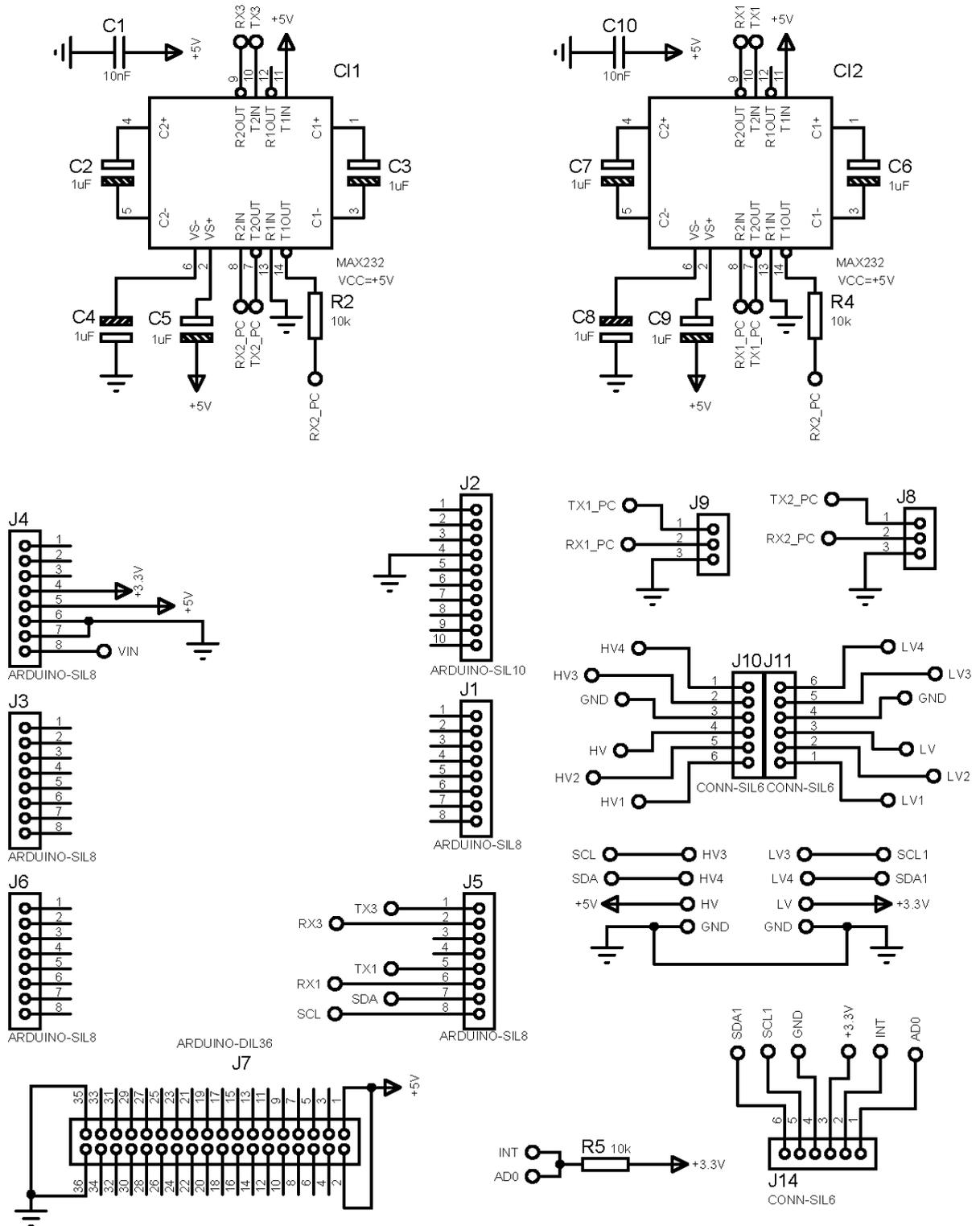
Nesta seção é abordado o projeto e a construção de uma placa de circuito impresso modular para o ARDUINO MEGA, a qual integra os componentes para a conversão de nível para o sensor infravermelho e adequa os meios de comunicação entre o ARDUINO e o computador. Além disso, apresenta-se o projeto, dimensionamento e construção de um suporte para o sensor infravermelho que garante a correta localização do sensor em relação à pilha de CaC.

### 4.5.1 Placa de circuito impresso

Como o ARDUINO conectado ao sensor AMG8833 comunica-se com diversos dispositivos, fazem-se necessários alguns circuitos auxiliares. Portanto, confeccionou-se uma placa que condicione todos estes componentes. A comunicação entre o ARDUINO e o supervisor ocorre por meio de dois canais RS-232, os quais necessitam de um circuito auxiliar, individual, para a conversão da comunicação, conforme o esquemático da Figura 4.28. A comunicação do ARDUINO com o sensor via barramento I2C demanda o circuito conversor de nível lógico bidirecional da Figura 4.25. A proposta é a confecção de uma placa que interconecte o microcontrolador aos demais componentes, disponibilizando os pinos de comunicação e alimentação em uma placa otimizada e modular ao ARDUINO MEGA 2560.

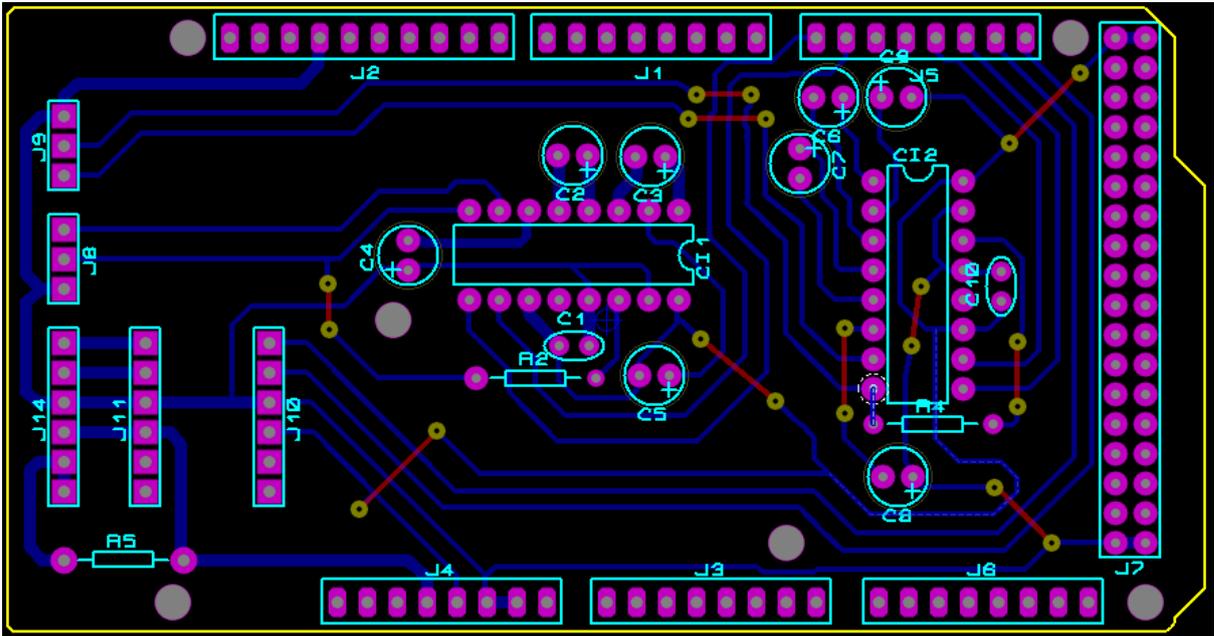
Para o desenvolvimento do projeto do circuito da placa foi utilizado o *software* PROTEUS, o qual agrega um ambiente para a simulação de circuitos eletrônicos, o ISIS, e outro para o desenho do circuito impresso, o ARES. Além disso, o PROTEUS possibilita analisar a placa, em 3D, simulando a dimensão real aproximada dela e de seus componentes empregados. Na Figura 4.37 está ilustrado o diagrama esquemático do circuito eletrônico que compõe a placa da Figura 4.38, representada em 3D na Figura 4.39. Para confeccionar a placa, utilizou-se o método de corrosão da camada de cobre da placa de circuito impresso com percloroeto de ferro e, posteriormente, a mesma foi perfurada e os seus componentes foram soldados, resultando na placa ilustrada na Figura 4.40, que está encaixada sobre o ARDUINO.

Figura 4.37 – Diagrama esquemático do circuito eletrônico da placa desenvolvida



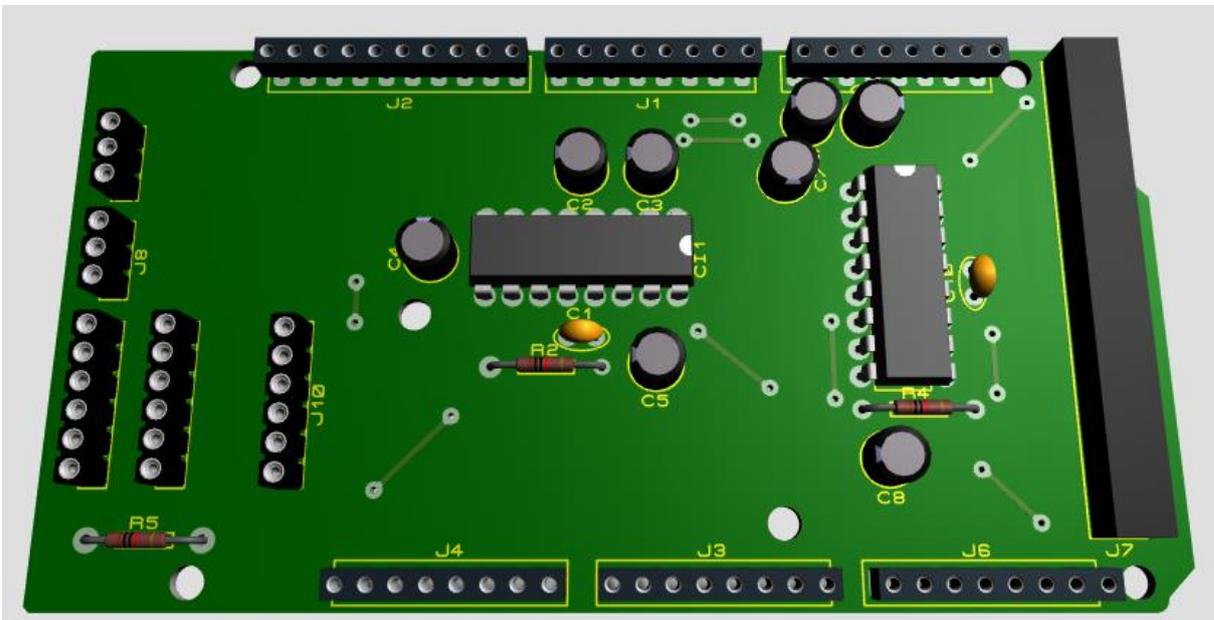
Fonte: Autor.

Figura 4.38 – Layout da placa de circuito impresso modular ao ARDUINO MEGA



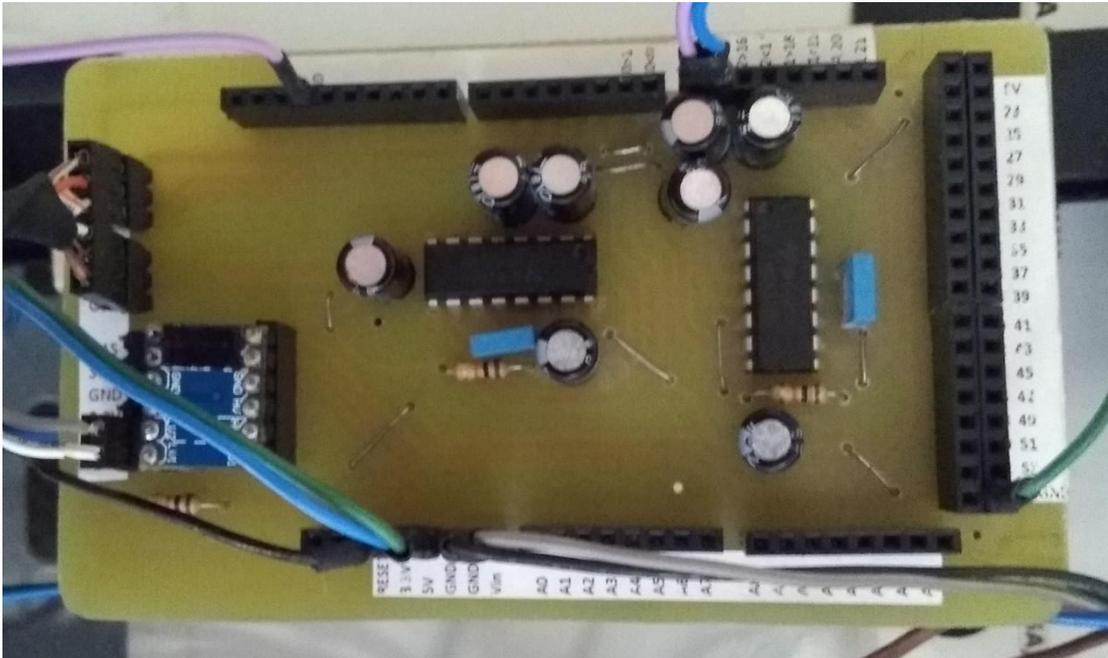
Fonte: Autor.

Figura 4.39 – Representação 3D da placa de circuito impresso desenvolvida



Fonte: Autor.

Figura 4.40 – Placa de circuito impresso confeccionada



Fonte: Autor.

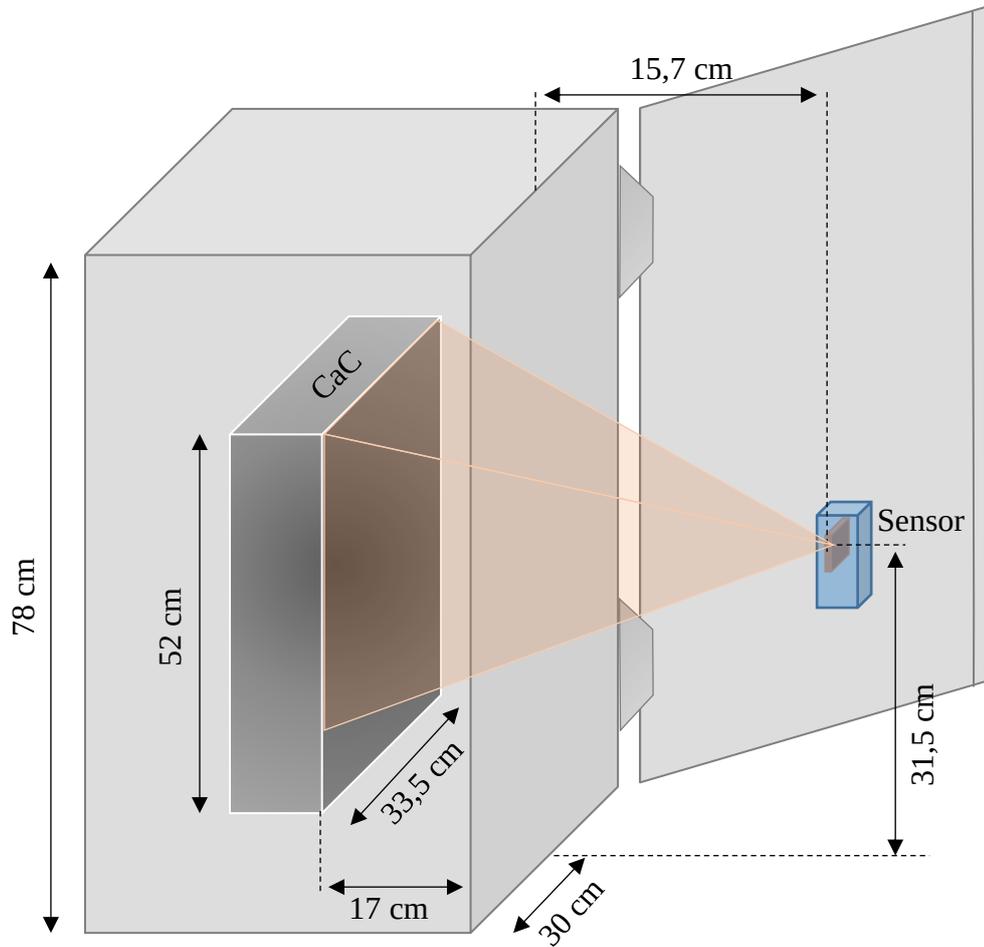
#### 4.5.2 Suporte para o sensor AMG8833

O suporte que acondiciona o sensor infravermelho deve sustentá-lo na posição indicada na Figura 4.41, para que abranja toda a área de interesse da pilha, uma vez que, nesta localização foram realizados os testes de monitoramento da temperatura, inclusive os que definiram as equações dos fatores da Figura 4.18 e da Figura 4.19. O suporte tem a forma geométrica de uma pirâmide e foi fixado na porta do gabinete da pilha. A Equação (1) descreve a variável “x” e (2) descreve a variável “y” da Figura 4.42, a qual representa a dimensão mínima a ser aberta na tampa do gabinete de modo que a área seja suficiente para não interferir na leitura do sensor.

$$x = \text{cateto}_{\text{oposto}} = \text{cateto}_{\text{adjacente}} \times \text{tangente}(\theta) \quad (1)$$

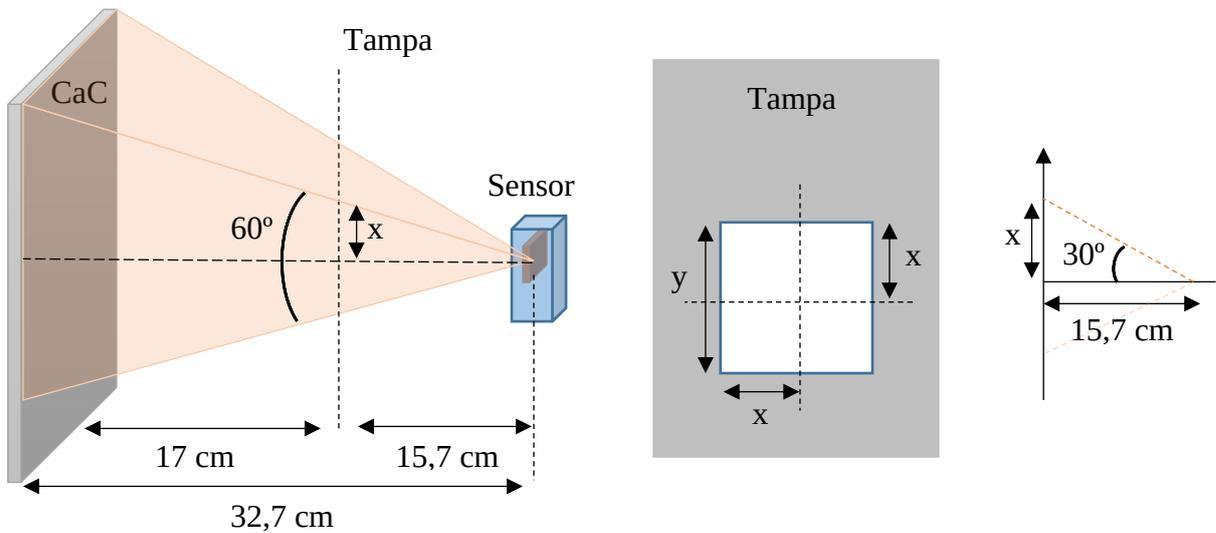
$$y = 2 \times x \quad (2)$$

Figura 4.41 – Localização do sensor diante da pilha de CaC



Fonte: Autor.

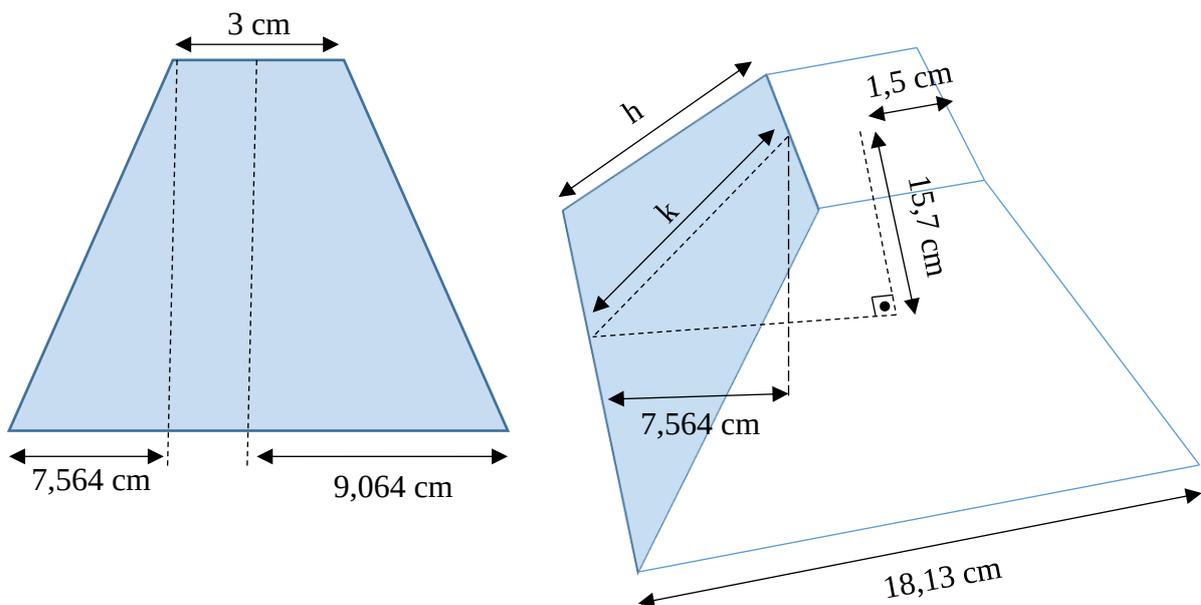
Figura 4.42 – Abertura na tampa do gabinete da pilha de CaC



Fonte: Autor.

A base da pirâmide ( $y$ ) deve ter a dimensão mínima de 18,13 cm, e 3 cm (definição de projeto) em sua outra extremidade para o posicionamento do sensor, conforme a Figura 4.43. Os cálculos do comprimento da face vertical da pirâmide ( $k$ ) e da aresta ( $h$ ), resultam em, respectivamente, em 17,43 e 19 cm. Entretanto, considerando possíveis imperfeições na construção do suporte, e a precisão nas medições do gabinete, da pilha de CaC e da distância deles até o sensor, delimitou-se o comprimento da aresta ( $y$ ) da área aberta na tampa do gabinete da pilha de CaC de 18,13 para 25 cm. Com isso, os valores de “ $k$ ” e “ $h$ ” se tornam 19,17 e 22,10 cm, respectivamente, preservando a distância entre a pilha e o sensor. Estas medidas foram utilizadas para realizar os cortes na confecção do suporte. Na Figura 4.44 está ilustrado o suporte preso à tampa do gabinete, reproduzido no *software* SolidWorks, cuja projeção ortográfica do projeto está ilustrada no ANEXO D.

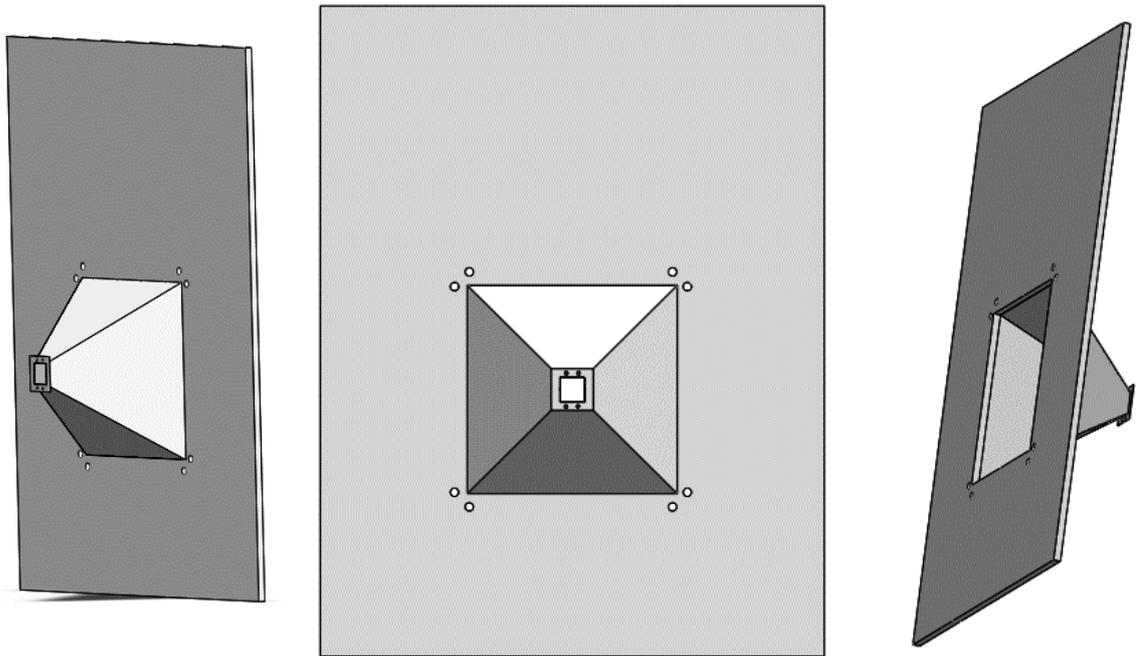
Figura 4.43 – Dimensionamento do suporte para confecção prática



Fonte: Autor.

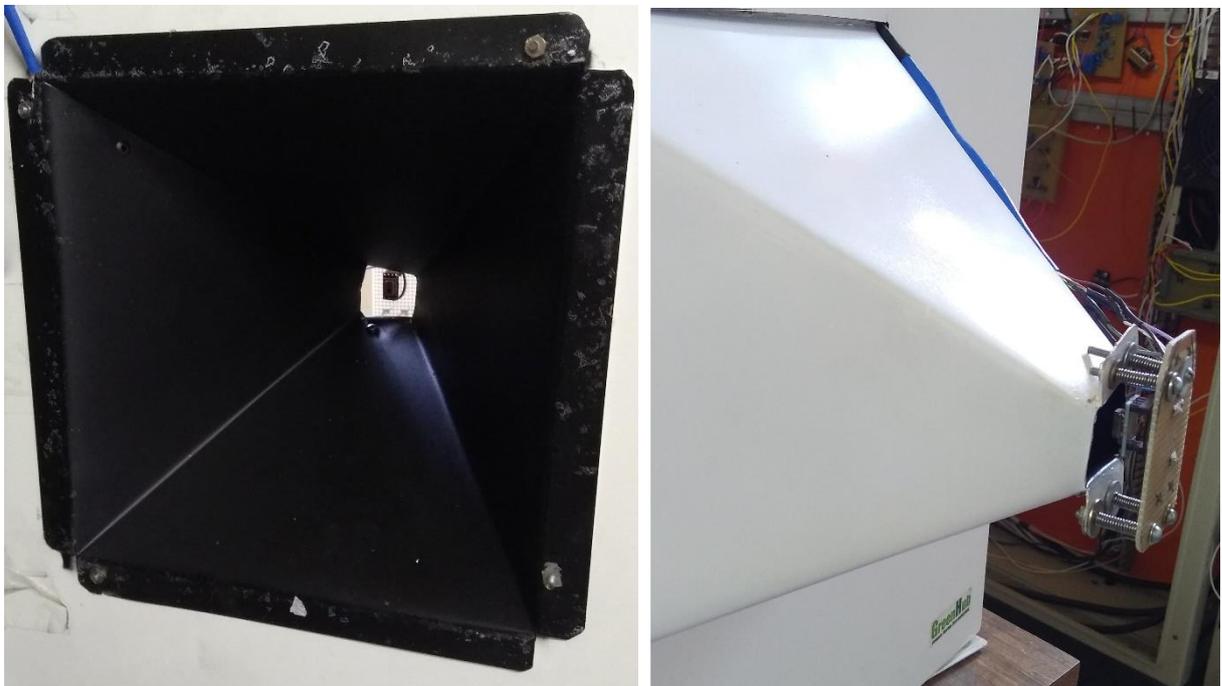
Para a construção prática do suporte foi utilizada uma chapa de alumínio, de 0,9 mm de espessura. A parte interna do suporte foi coberta por uma tinta de cor preta opaca, para não haver reflexão do infravermelho. As vistas reais do suporte estão ilustradas na Figura 4.45. Para acoplar o sensor ao suporte, utilizou-se uma placa de circuito impresso perfurada, e quatro parafusos com molas para o “ajuste fino” da posição do sensor, ou seja, regular os ângulos de inclinação (vertical e horizontal) e a distância do sensor, conforme a Figura 4.46.

Figura 4.44 – Vistas em 3D do suporte preso à tampa do gabinete da pilha de CaC



Fonte: Autor.

Figura 4.45 – Suporte metálico real preso à tampa do gabinete da pilha de CaC

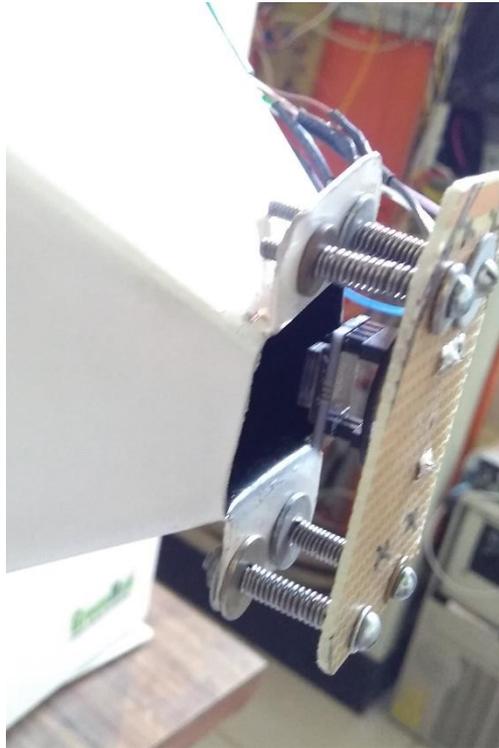


a) Vista interna do suporte

b) Vista externa do suporte

Fonte: Autor.

Figura 4.46 – Condicionamento do sensor ao suporte metálico confeccionado



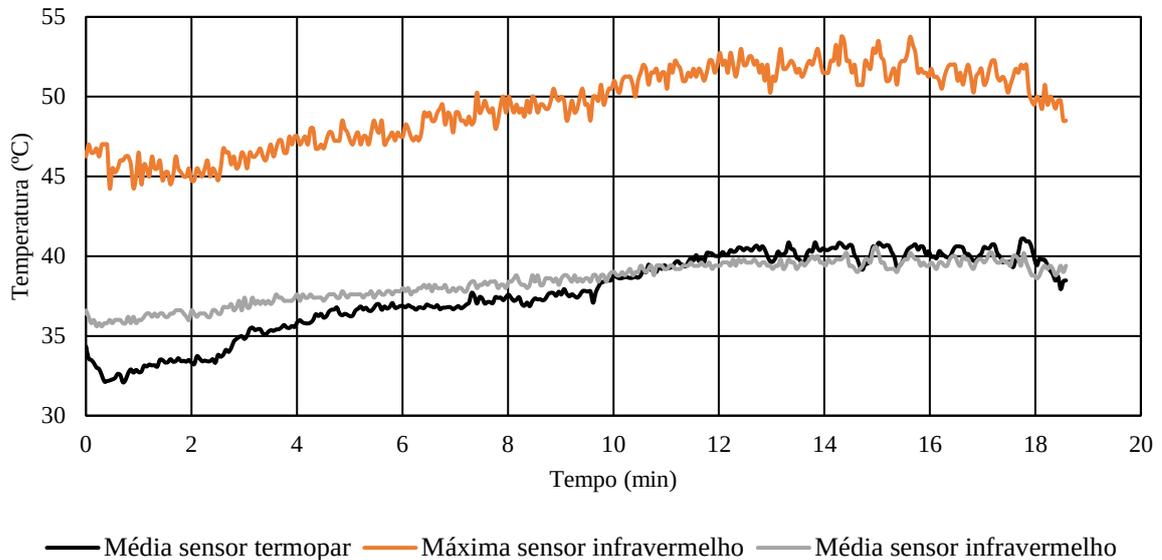
Fonte: Autor.

#### 4.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 4.47 apresenta os dados obtidos em um teste com o novo sistema de monitoramento da temperatura e, também, os valores das temperaturas medidas pelo conjunto de termopares. Como o arranjo de termopares informa a temperatura média da pilha, no gráfico somente há o valor de temperatura máxima da pilha pelo sensor infravermelho.

No início da operação da pilha de CaC pode-se observar que as temperaturas medidas pelos sensores divergem em maior amplitude que no restante do experimento, chegando a 2,8°C de diferença. Isto deve-se à dinâmica da temperatura da pilha. No início da operação, a região central onde os sensores termopares estão acomodados é mais fria que as duas faixas verticais que possuem as máximas temperaturas, Figura 3.6. Após um período de operação, a distribuição de temperatura da região central é mais homogênea, de modo que as leituras dos dois sensores convergem com uma diferença de amplitude reduzida.

Figura 4.47 – Temperaturas de operação da pilha de CaC, aferidas pelos sensores termopares e infravermelho



Fonte: Autor.

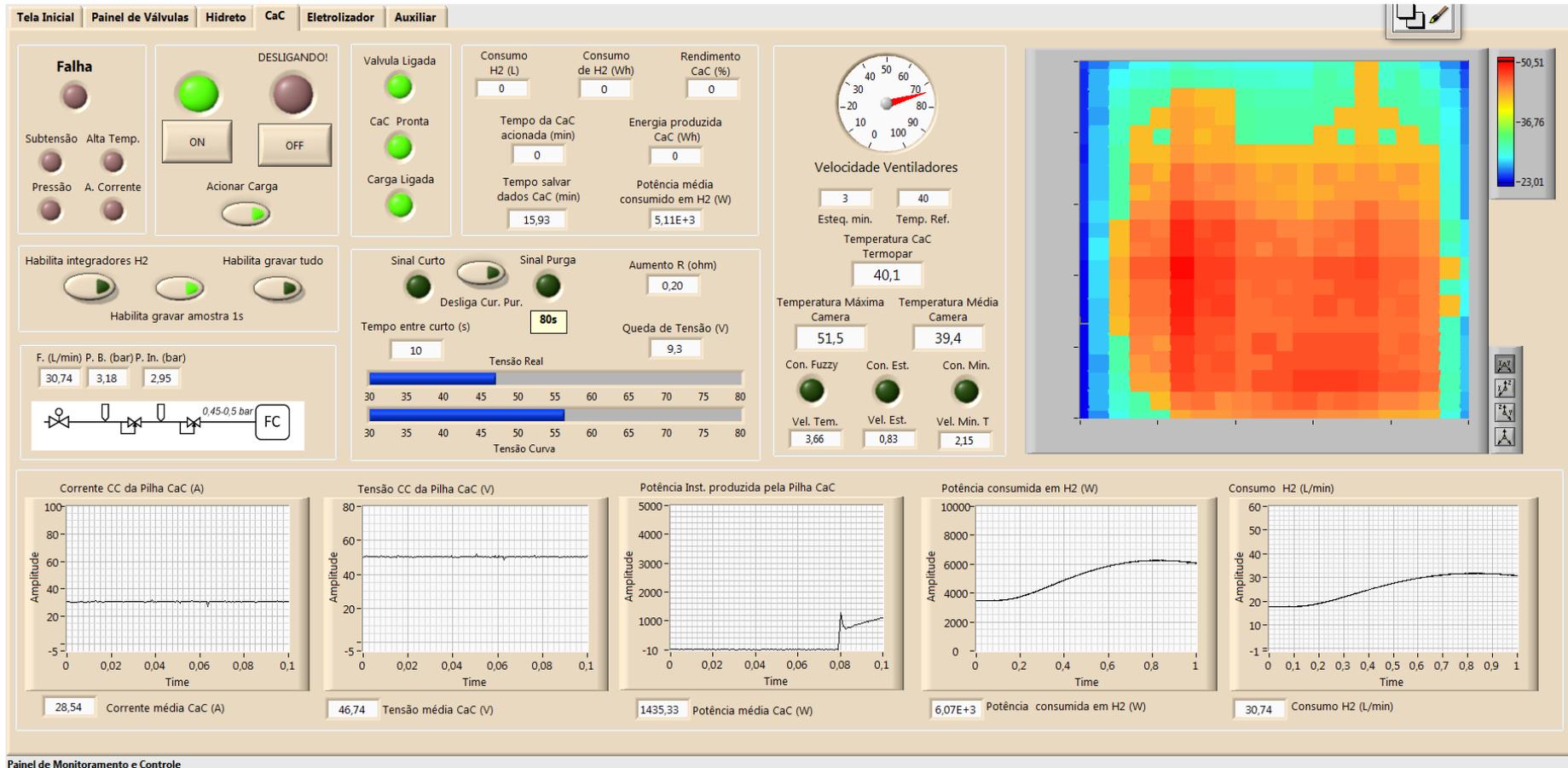
Na Figura 4.48 está ilustrada a imagem térmica no *display* LCD fixado no gabinete da pilha de CaC. A mesma imagem é verificada na Figura 4.49, que é a aba da pilha de CaC no supervisório da planta. A operação da qual as imagens foram exibidas, foi com a pilha de CaC suprindo uma carga de, aproximadamente, 1,5 kW.

Figura 4.48 – Imagem térmica da pilha de CaC no *display* instalado próximo a planta



Fonte: Autor.

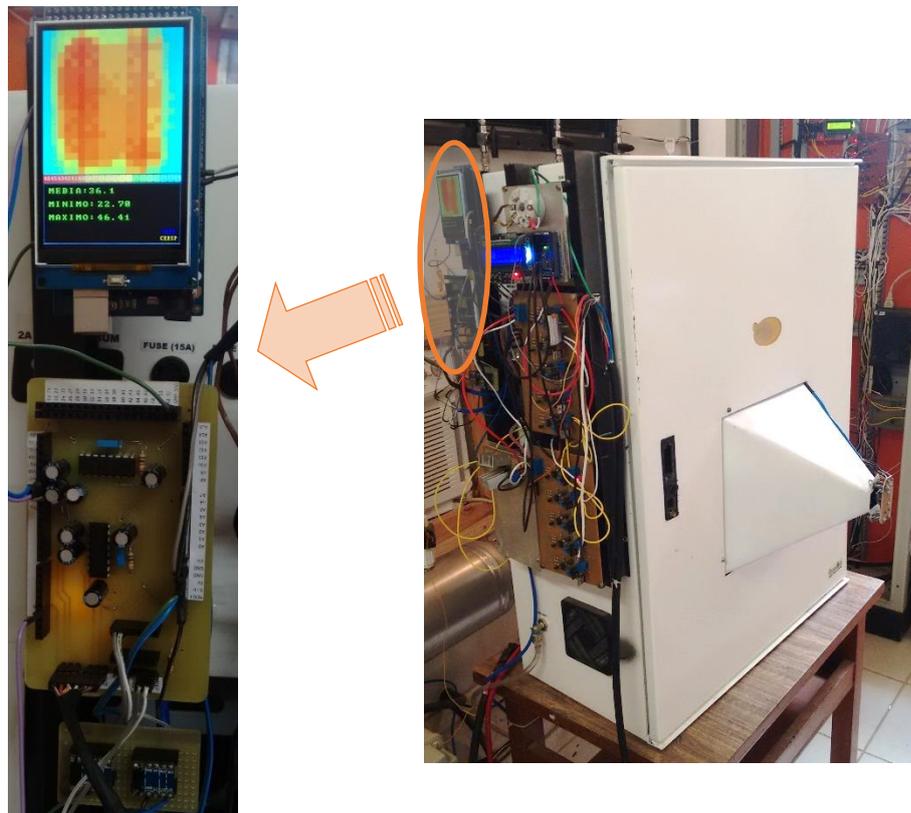
Figura 4.49 – Imagem térmica da pilha de CaC no supervisor da planta



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 4.50 ilustra o gabinete da pilha de CaC com o suporte que sustenta o sensor infravermelho na tampa, e na lateral os dois ARDUINOS e o *display* local para visualização da imagem térmica da temperatura da pilha. A localização definida para o *display* justifica-se por uma altura próxima aos olhos e direcionada para a porta de acesso à sala. Todo o cabeamento que interconecta o sensor com o ARDUINO passa pelo interior do gabinete, sem afetar a funcionalidade da tampa do gabinete.

Figura 4.50 – Gabinete da pilha de CaC com o suporte para o sensor, microcontroladores e *display* local



Fonte: Autor.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo abordou-se o desenvolvimento da medição e do monitoramento da temperatura da pilha de CaC do tipo PEM e seus demais componentes. Inicialmente foi apresentado e definido o sensor infravermelho a ser utilizado e as correções necessárias para adequá-lo à aplicação.

Definido o procedimento para adequar as medidas do sensor infravermelho, implementou-se nos microcontroladores os códigos para a leitura dos dados do sensor, a

adequação deles, a comunicação entre os dispositivos e a exibição da imagem térmica no *display* e no supervísório de monitoramento e controle da planta. Também foi apresentado o projeto e a construção física da placa de circuito impresso e do suporte para o sensor. Finalmente, foram apresentados os dados de testes experimentais da pilha de CaC em operação e a visualização das temperaturas no supervísório e no *display* local, bem como a validação das aferições pelas médias das temperaturas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No CEESP, a geração e armazenamento de energia utilizando o hidrogênio como vetor energético é uma das áreas de pesquisa que detém um protótipo de uma planta completa. Esta planta é composta por um eletrolisador alcalino, um cilindro de hidretos metálicos, e uma pilha de células a combustível do tipo PEM, além de um sistema supervisor de controle e monitoramento de todo o protótipo. No decorrer dos estudos desenvolvidos pelos pesquisadores, vêm sendo reunidas tecnologias que proporcionem melhorias e evoluções da planta. E, neste trabalho, o valor agregado diz respeito à pilha de células a combustível.

Em uma pilha de CaC é fundamental o adequado controle e monitoramento das variáveis durante sua operação e, dentre as diversas variáveis, a temperatura interna da pilha tem papel fundamental, tanto para manter as condições ideais de operação das membranas quanto para garantir que a temperatura não atinja níveis críticos, podendo conduzir a pilha à redução da sua vida útil ou até mesmo à sua inutilização. Em algumas aplicações, a temperatura da pilha é obtida com a leitura das temperaturas de entrada e de saída do ar de reação que passa por ela, cujo é o mesmo ar de refrigeração da pilha. Outra forma empregada é instalando um sensor dentro do gabinete que condiciona a pilha de CaC, obtendo a temperatura do ambiente interno, mas ainda distante de ser a temperatura da pilha.

A melhor proposta estudada é o uso de sensores do tipo termopar, que devido à sua pequena dimensão podem ser acomodados nas lacunas em que o ar de reação flui, medindo a temperatura interna da pilha de CaC. Entretanto, cada sensor termopar demanda de um circuito de condicionamento individual, e no caso de uma pilha com maiores dimensões, visto que a distribuição da temperatura ao longo do perfil não é homogênea, demanda a instalação de uma rede de sensores para obter um melhor rastreamento da temperatura da pilha. Além disso, o fluxo de ar reagente é bloqueado nos locais onde os sensores estão instalados. Portanto, para evitar o contato físico com a pilha e obter o maior número de pontos de medição, o sensor infravermelho apresenta-se como a melhor opção para este tipo de aplicação.

Para a pilha que faz parte da planta armazenadora foi aplicado um sensor matricial infravermelho, que detém 64 *pixels*. Durante seu desenvolvimento, alguns problemas tiveram que ser contornados, como: a distância necessária entre o sensor e a pilha para cobrir toda a área de interesse, e o relativo baixo número de *pixels*, que acarreta na tendência dos pontos altos ou baixos para os níveis intermediários de temperatura. Para isso, definiu-se a metodologia

apresentada neste trabalho, ou seja, expandindo a dimensão da matriz de 8 linhas e colunas para uma de 20, fazendo a diferença de cada ponto de temperatura em relação à média e ainda aplicando os fatores “maior” e “menor”, que foram definidos experimentalmente. Com este processo, o rastreamento dos máximos e mínimos reais da pilha são realizados amplificando os valores acima da média e atenuando os que estão abaixo da média. Esta metodologia foi validada com diferenças, entre o sensor matricial infravermelho instalado na pilha e uma câmera térmica de alta confiabilidade, entre a faixa de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  em 84% das amostras.

A construção da imagem térmica para o monitoramento das temperaturas distribuídas pelo perfil da pilha de CaC, ela é disponibilizada em dois ambientes, um local e outro no sistema supervisório da planta. Os valores das temperaturas podem ser salvos no computador que contém o supervisório, e serem utilizados nos disparos de alarmes para níveis de temperaturas críticas devido a alguma falha, também em ambos os locais.

O estudo aplicado à pilha de CaC do tipo PEM proporciona o monitoramento da temperatura interna da pilha sem utilizar sensores que possam danificar o equipamento, reduzir sua vida útil, ou mesmo obstruir a passagem de ar, possibilitando ainda, a varredura da temperatura de toda a sua extensão. Este protótipo auxilia a preservar a operação segura da pilha, uma vez que informa ao sistema de controle desenvolvido para ela a temperatura máxima detectada, podendo atuar diretamente no sistema de arrefecimento. Além disso, a exibição do comportamento da distribuição da temperatura pela pilha de CaC possibilita antecipar possíveis problemas pontuais ou locais, ocasionados, por exemplo, pela obstrução de alguns canais de fluxo do ar de reação ou de hidrogênio, perda de algumas células, torque mecânico pelas diferenças de temperaturas entre as regiões, etc.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008.

ARDUINO, **ARDUINO MEGA 2560 REV3**, 2017a. Disponível em: <<https://store.ARDUINO.cc/usa/ARDUINO-mega-2560-rev3>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2018.

ARDUINO, **ARDUINO UNO REV3**, 2017b. Disponível em: <<https://store.ARDUINO.cc/usa/ARDUINO-uno-rev3>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2018.

ARDUINO, **ARDUINO NANO**, 2017c. Disponível em: <<https://store.ARDUINO.cc/usa/ARDUINO-nano>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2018.

ARDUINO, **Serial**, 2017d. Disponível em: <<https://www.ARDUINO.cc/reference/pt/language/functions/communication/serial> >. Acesso em: 12 de janeiro de 2018.

ATEN. **USB-to-Serial Converter**, 2013.

BAITELO, R. **[r]evolução energética**. 2013.

BRAGA, J. M. F. **Análise da viabilidade econômica da integração de sistemas de célula a combustível, nas plantas de cloro-soda, para utilização do hidrogênio gerado no processo**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CATERPILLAR. **Smartphone Cat® S60: Manual do utilizador**, 2016.

CHUM, H. **Programa Brasileiro de Células a Combustível Programa Brasileiro De Células a Combustível**, 2002. Disponível em: <<https://finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-energ/programa-brasileiro-de-celulas-a-combustivel.pdf>>.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**, 2005.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**, 2007. v. 4.

EPE. **Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**, 2016. v. 53.

EPE; MME. **Balanco Energético Nacional**, 2016.

FERRIGOLO, F. Z. **Instrumentação para pilhas de células a combustível do tipo pem visando a eficiência energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

FLUKE. **Termovisores Fluke Ti25 e Ti10**, 2007.

FRANCHI, D. et al. **Análise comparativa entre plantas armazenadoras de energia utilizando hidrogênio, baterias de Li-íon e Pb-ácido**. 32ª Jornada Acadêmica Integrada - UFSM, 2017.

GITHUB, **Adafruit\_AMG88xx**, 2018. Disponível em:  
<[https://github.com/adafruit/Adafruit\\_AMG88xx](https://github.com/adafruit/Adafruit_AMG88xx)>. Acesso em 10 de janeiro de 2018.

GITHUB, **UTFT**, 2015. Disponível em: <<https://github.com/dgolda/UTFT>>. Acesso em 13 de janeiro de 2018.

GONZATTI, F. **Fundamentos para concepção, controle e automação de uma planta armazenadora de energia utilizando hidrogênio**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

GONZATTI, F.; MIOTTO, M.; FARRET, F. A. Proposal for Automation and Control of a PEM Fuel Cell Stack. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 28, n. 4, p. 493–501, 2017.

HAMED, A. M.; AWAD, M. M.; TOLBA, M. A. Experimental investigation on pem fuel cell performance characteristics. p. 10, 2009.

HORIZON. **3000W Fuel Cell Stack User Manual**, 2010. Disponível em:  
<<http://www.horizonfuelcell.com/>>

IEA. **Key World Energy Statistics**, 2016.

INTRUMENTS, N. **O que é LabVIEW?**, 2014. Disponível em:  
<<http://www.ni.com/newsletter/51141/pt/>>. Acesso em 12 de janeiro de 2018.

INSTRUMENTS, T. **MAX232x Dual EIA-232 Drivers / Receivers**, 2014.

KARLSEN, H. **Multi-Platform Universal TFT display library**, 2016. Disponível em:  
<<http://www.rinkydinkelectronics.com/library.php?id=87>>

LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel cell systems explained**, 2003.

LISO, V. et al. Thermal modeling and temperature control of a PEM fuel cell system for forklift applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 16, p. 8410–8420, 2014.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MECHATRONICS N., **Conversor de nível lógico I2C 5V a .3V**, 2018. Disponível em: <<http://www.naylampmechatronics.com/conversores-ttl/67-conversor-de-nivel-logico-i2c.html>>. Acessado em 08 de janeiro de 2018.

MELEXIS. **MLX90614 family**, 2009.

MELEXIS. **MLX90621 16x4 IR Array**, 2016.

MIOTTO, M. et al. Maicon Miotto, Diogo Franchi, Frank Gonzatti, Guilherme Basso, Felix Alberto Farret e Fredi Ferrigolo Zancan. **ECOINOVAR**, p. 1–6, 2013.

MIOTTO, M. et al. **Desenvolvimento de uma planta didática para o armazenamento de energia baseado em hidrogênio**, 2017.

PANASONIC. **Specifications for infrared array sensor**, 2011.

PANASONIC. **Infrared Array Sensor Grid-EYE (AMG88)**, 2016. Disponível em: <<https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ADI8000/ADI8000C33.pdf>>.

PINHEIRO, G. **A interface serial e o padrão RS – 232**, 2011. Diapositivo. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.lee.eng.uerj.br/~gil/filas/Padrao%20RS-232.pdf>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2018.

RIASCOS, L. A. M. et al. Bayesian network supervision on fault tolerant fuel cells. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 2, n. c, p. 1059–1066, 2006.

RIASCOS, L. A. M.; PEREIRA, D. D. Optimal Temperature control in PEM fuel cells. v. 2, p. 2778–2783, 2009.

RIASCOS, L. A. M.; PEREIRA, D. D. Controlling operating temperature in pem fuel cells. v. 4, n. 2004, p. 137–146, 2010.

RUTES, M. A. **Sistema de Monitoramento e Controle de um Veículo Movido a Célula a Combustível Reversível**. Monografia (Engenharia da computação) - Centro Universitário Positivo, Curitiba, PR, 2006.

SAYGILI, Y.; EROGLU, I.; KINCAL, S. Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 1, p. 615–622, 2015.

VILLULLAS, H. M.; TACIANELLI, E. A.; GONZÁLEZ, E. R. Células a combustível:

Energia limpa a partir de fontes renováveis. p. 28–34, 2002.

ZENITH, F. **Control of fuel cells**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculty of Natural Sciences and Technology, Trondheim, NOR, 2007.

## ANEXO A – CÓDIGO DESENVOLVIDO NO SOFTWARE ARDUINO PARA LEITURA DO SENSOR, CONDICIONAMENTO DOS DADOS E COMUNICAÇÃO

```

1  #include <Adafruit_AMG88xx.h>
2  Adafruit_AMG88xx amg;
3
4  float pixels[64], matriz_8x8[8][8] = {}, matriz_20x20[20][20] = {}, imagem_20x20[20][20] = {};
5  float media_8x8 = 0.0, maximo_20x20 = 0.0, minimo_20x20=100.0, media_20x20 = 0.0;
6  float media_imagem_20x20 = 0.0, Fator_pos = 1.2417, Fator_neg = 0.9268;
7  int m, n, o = 0;
8
9  void setup()
10 {
11     Serial.begin(57600);
12     Serial1.begin(57600);
13     Serial3.begin(57600);
14     Serial3.println(F("AMG88xx pixels"));
15     amg.begin();
16 }
17
18 void cria_matriz_8x8();
19 void determina_fatores_calibragem();
20 void cria_matriz_20x20();
21 void calcula_media_20x20();
22 void calibragem_20x20();
23
24 byte envia[64];
25 unsigned long tempo_ant_Display = 0;
26 unsigned long tempo_ant_AMG = 0;
27 byte media_serial = 0, maximo_serial = 0;
28
29 void loop()
30 {
31     if((tempo_ant_AMG + 100) < millis()) // 100 ms
32     {
33         tempo_ant_AMG = millis();
34         amg.readPixels(pixels); //vetor 64 pixels
35         cria_matriz_8x8();
36         determina_fatores_calibragem();
37         cria_matriz_20x20();
38         calcula_media_20x20();
39         calibragem_20x20();
40
41         media_serial = byte((media_imagem_20x20 - 10)*5); // 0.2
42         maximo_serial = byte((maximo_20x20 - 10)*4); // 0.25
43         Serial1.write(byte(254)); // Start
44         Serial1.write(media_serial);
45         Serial1.write(maximo_serial);
46         Serial1.write(byte(255)); // Stop
47     }

```

```

48
49     if((tempo_ant_Display + 3000) < millis())           // 3 s
50 {
51     tempo_ant_Display = millis();
52     Serial3.write(byte(254));                          // Start
53     for(int s=0;s<64;s++)
54 {
55         envia[s] = (byte((pixels[s]-10)*4));
56         Serial3.write(envia[s]);
57     }
58     Serial3.write(byte(255));                          // Stop
59 }
60 }
61
62 void cria_matriz_8x8()                                // Cria matriz 8x8
63 {
64     media_8x8 = 0.0;
65     int k = 0;
66     for(int i=0;i<8;i++)
67 {
68     for(int j=0;j<8;j++)
69 {
70         matriz_8x8[i][j] = pixels[k];
71         media_8x8 = media_8x8 + pixels[k];
72         k++;
73     }
74 }
75     media_8x8 = media_8x8 / 64;
76 }
77
78 void determina_fatores_calibragem()                  // Fator positivo e negativo
79 {
80     Fator_pos = (-0.014523 * media_8x8) + 1.682925;
81     Fator_neg = (-0.009277 * media_8x8) + 1.215660;
82     if(Fator_pos >= 1.3)
83 {
84         Fator_pos = 1.3;
85     }else if(Fator_pos <= 1)
86 {
87         Fator_pos = 1;
88     }
89     if(Fator_neg >= 1.05)
90 {
91         Fator_neg = 1.05;
92     }else if(Fator_neg <= 0.75)
93 {
94         Fator_neg = 0.75;
95     }
96 }
97
98 void cria_matriz_20x20()                             // Cria matriz 20x20
99 {
100
101     // Cantos
102     matriz_20x20[0][0] = matriz_8x8[0][0];
103     matriz_20x20[19][0] = matriz_8x8[7][0];
104     matriz_20x20[0][19] = matriz_8x8[0][7];
105     matriz_20x20[19][19] = matriz_8x8[7][7];

```

```

105
106 // Extremidade Horizontais
107 m = 0;
108 n = 0;
109 for(int i=0;i<=19;i=i+19)
110 {
111     for(int j=1;j<=18;j=j+3)
112     {
113         matriz_20x20[i][j] = (matriz_8x8[m][n] + matriz_8x8[m][n+1])/2;
114         matriz_20x20[i][j+1] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m][n+1])/2;
115         matriz_20x20[i][j+2] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m][n+2])/2;
116         n = n+1;
117     }
118     m=0;
119     m=7;
120 }
121
122 // Extremidade Verticais
123 m = 0;
124 n = 0;
125 for(int j=0;j<=19;j=j+19)
126 {
127     for(int i=1;i<=18;i=i+3)
128     {
129         matriz_20x20[i][j] = ((matriz_8x8[m][n]+matriz_8x8[m+1][n])/2);
130         matriz_20x20[i+1][j] = (matriz_8x8[m+1][n]);
131         matriz_20x20[i+2][j] = ((matriz_8x8[m+1][n]+matriz_8x8[m+2][n])/2);
132         m = m+1;
133     }
134     m=0;
135     n=7;
136 }
137
138 // Centro
139 m = 0;
140 n = 0;
141 for(int j=1;j<=18;j=j+3)
142 {
143     for(int i=1;i<=18;i=i+3)
144     {
145         matriz_20x20[i][j] = (matriz_8x8[m][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
146         matriz_20x20[i+1][j] = (matriz_8x8[m+1][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
147         matriz_20x20[i+2][j] = (matriz_8x8[m+2][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
148         matriz_20x20[i][j+1] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
149         matriz_20x20[i][j+2] = (matriz_8x8[m][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
150         matriz_20x20[i+1][j+2] = (matriz_8x8[m+1][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
151         matriz_20x20[i+2][j+2] = (matriz_8x8[m+2][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
152         matriz_20x20[i+2][j+1] = (matriz_8x8[m+2][n+1] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
153         matriz_20x20[i+1][j+1] = matriz_8x8[m+1][n+1];
154
155         m = m + 1;
156     }
157     m=0;
158     n=n+1;
159 }
160 }

```

```
161
162 void calcula_media_20x20() // Média
163 {
164     media_20x20 = 0.0;
165     for(int i=0;i<=19;i++)
166     {
167         for(int j=0;j<=19;j++)
168         {
169             media_20x20 = media_20x20 + matriz_20x20[i][j];
170         }
171     }
172     media_20x20 = media_20x20/400;
173 }
174
175 void calibragem_20x20() //Fator, contraste, máximo e mínimo
176 {
177     maximo_20x20 = 0;
178     minimo_20x20 = 100;
179     media_imagem_20x20 = 0;
180
181     for(int i = 0; i<=19; i++)
182     {
183         for(int j = 0; j<=19; j++)
184         {
185             if(matriz_20x20[i][j] > media_20x20)
186             {
187                 imagem_20x20[i][j] = matriz_20x20[i][j]*Fator_pos*(matriz_20x20[i][j]/media_20x20);
188                 media_imagem_20x20 = media_imagem_20x20 + imagem_20x20[i][j];
189                 if(imagem_20x20[i][j] > maximo_20x20)
190                 {
191                     maximo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
192                 }else
193                 {
194                     minimo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
195                 }
196             }else
197             {
198                 imagem_20x20[i][j] = matriz_20x20[i][j]*Fator_neg*(matriz_20x20[i][j]/media_20x20);
199                 media_imagem_20x20 = media_imagem_20x20 + imagem_20x20[i][j];
200                 if(imagem_20x20[i][j] > maximo_20x20)
201                 {
202                     maximo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
203                 }else
204                 {
205                     minimo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
206                 }
207             }
208         }
209     }
210     media_imagem_20x20 = (media_imagem_20x20 / 400);
211 }
```

---

## ANEXO B - CÓDIGO NO MATLAB® PARA COMUNICAÇÃO E VISUALIZAÇÃO DA IMAGEM TÉRMICA DO SENSOR INFRAVERMELHO

```

1 Fator_Pos = 1.0;
2 Fator_Neg = 1.0;
3
4 k = 1;
5 media_8x8 = 0.0;
6 for i=1:1:8
7     for j=1:1:8
8         dados_matriz_A(i,j) = (pixel(k)/4)+10;
9         media_8x8 = media_8x8 + dados_matriz_A(i,j);
10        k = k + 1;
11    end
12 end
13 media_8x8 = media_8x8 / 64;
14
15 dados_matriz = rot90(dados_matriz_A,-1);
16 %dados_matriz = rot90(dados_matriz_A);
17 %dados_matriz_A = rot90(dados_matriz);
18 %dados_matriz = rot90(dados_matriz_A);
19
20 % canto
21 matriz_20x20(1,1) = dados_matriz(1,1);
22 matriz_20x20(20,1) = dados_matriz(8,1);
23 matriz_20x20(1,20) = dados_matriz(1,8);
24 matriz_20x20(20,20) = dados_matriz(8,8);
25
26 % extremidade H's
27 m = 1;
28 n = 1;
29 for i=1:19:20
30     for j=2:3:19
31         matriz_20x20(i,j) = (dados_matriz(m,n)+ dados_matriz(m,n+1))/2;
32         matriz_20x20(i,j+1) = dados_matriz(m,n+1);
33         matriz_20x20(i,j+2) = (dados_matriz(m,n+1) + dados_matriz(m,n+2))/2;
34         n = n + 1;
35     end
36     n=1;
37     m=8;
38 end
39
40 % extremidade V's
41 m = 1;
42 n = 1;
43 for j=1:19:20
44     for i=2:3:19
45         matriz_20x20(i,j) = (dados_matriz(m,n)+ dados_matriz(m+1,n))/2;
46         matriz_20x20(i+1,j) = dados_matriz(m+1,n);
47         matriz_20x20(i+2,j) = (dados_matriz(m+1,n) + dados_matriz(m+2,n))/2;
48         m = m + 1;
49     end
50     m=1;
51     n=8;
52 end

```

```

53
54 % Centro
55 m = 1;
56 n = 1;
57 for j=2:3:19
58     for i=2:3:19
59         matriz_20x20(i,j) = (dados_matriz(m,n)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
60         matriz_20x20(i+1,j) = (dados_matriz(m+1,n)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
61         matriz_20x20(i+2,j) = (dados_matriz(m+2,n)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
62         matriz_20x20(i,j+1) = (dados_matriz(m,n+1)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
63         matriz_20x20(i,j+2) = (dados_matriz(m,n+2)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
64         matriz_20x20(i+1,j+2) = (dados_matriz(m+1,n+2)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
65         matriz_20x20(i+2,j+2) = (dados_matriz(m+2,n+2)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
66         matriz_20x20(i+2,j+1) = (dados_matriz(m+2,n+1)+ dados_matriz(m+1,n+1))/2;
67         matriz_20x20(i+1,j+1) = dados_matriz(m+1,n+1);
68
69         m = m + 1;
70     end
71     m=1;
72     n=n+1;
73 end
74
75 media_20x20 = 0.0;
76 for i=1:1:20
77     for j=1:1:20
78         media_20x20 = media_20x20 + matriz_20x20(i,j);
79     end
80 end
81 media_20x20 = media_20x20/400;
82
83 %código novo inicio
84 Fator_Pos = (-0.014523 * media_20x20) + 1.682925;
85 Fator_Neg = (-0.009277 * media_20x20) + 1.215660;
86 if Fator_Pos >= 1.3
87     Fator_pos = 1.3;
88 else if Fator_Pos <= 1
89     Fator_Pos = 1;
90     end
91 end
92 if Fator_Neg >= 1.05
93     Fator_Neg = 1.05;
94 else if Fator_Neg <= 0.75
95     Fator_Neg = 0.75;
96     end
97 end
98
99 %Calibragem
100 for i=1:1:20
101     for j=1:1:20
102         if matriz_20x20(i,j) > media_20x20
103             imagem_20x20(i,j) = matriz_20x20(i,j)*Fator_Pos*(matriz_20x20(i,j)/media_20x20);
104         else
105             imagem_20x20(i,j) = matriz_20x20(i,j)*Fator_Neg*(matriz_20x20(i,j)/media_20x20);
106         end
107     end
108 end

```

## ANEXO C - CÓDIGO DESENVOLVIDO NO SOFTWARE ARDUINO PARA COMUNICAÇÃO, CONDICIONAMENTO DOS DADOS, ESCALA DE COR E VISUALIZAÇÃO DA IMAGEM TÉRMICA NO DISPLAY

```

1  #include <UTFT.h>
2
3  extern uint8_t SmallFont[];
4  extern uint8_t BigFont[];
5
6  UTFT myGLCD(CTE32HR, 38, 39, 40, 41);
7
8  float matriz_8x8[8][8] = {}, matriz_20x20[20][20] = {}, pixels[64];
9  float imagem_20x20[20][20] = {}, imagem_20x20_invertida[20][20] = {};
10 float media_8x8 = 0.0, maximo_20x20 = 0.0, minimo_20x20=100.0, media_20x20 = 0.0;
11 float media_imagem_20x20 = 0.0, Fator_pos = 1.2417, Fator_neg = 0.9268;
12 int m, n, o = 0;
13
14 void setup()
15 {
16   Serial.begin(57600);
17   Serial3.begin(57600);
18   randomSeed(analogRead(0));
19   myGLCD.InitLCD(0); // 0 retrado 1 paisagem
20   myGLCD.setFont(SmallFont); // SmallFont or BigFont
21 }
22
23 void cria_matriz_8x8();
24 void determina_fatores_calibragem();
25 void cria_matriz_20x20();
26 void calcula_media_20x20();
27 void calibragem_20x20();
28 void inverte_matriz_20x20();
29 void imprime_display();
30
31 void loop()
32 {
33   if(Serial3.available() > 0)
34   {
35     int x = Serial3.read();
36     if(x == 254) // Sincroniza
37     {
38       x = Serial3.read();
39       int s = 0;
40       while(x == -1)
41       {
42         x = Serial3.read();
43       }
44       while(x!=255)
45       {
46         float y = float(x);
47         pixels[s] = (y/4)+10;
48         Serial.print(pixels[s]);
49         Serial.print(" ");
50         s++;
51         x = Serial3.read();
52       }

```

```

53     Serial.println();
54     cria_matriz_8x8();
55     determina_fatores_calibragem();
56     cria_matriz_20x20();
57     calcula_media_20x20();
58     calibragem_20x20();
59     inverte_matriz_20x20();
60     imprime_display();
61     }
62     }
63 }
64
65
66 void cria_matriz_8x8() // Cria matriz 8x8
67 {
68     media_8x8 = 0.0;
69     int k = 0;
70     for(int i=0;i<8;i++)
71     {
72         for(int j=0;j<8;j++)
73         {
74             matriz_8x8[i][j] = pixels[k];
75             media_8x8 = media_8x8 + pixels[k];
76             k++;
77         }
78     }
79     media_8x8 = media_8x8 / 64;
80 }
81
82 void determina_fatores_calibragem() // Fator positivo e negativo
83 {
84     Fator_pos = (-0.014523 * media_8x8) + 1.682925;
85     Fator_neg = (-0.009277 * media_8x8) + 1.215660;
86     if(Fator_pos >= 1.3)
87     {
88         Fator_pos = 1.3;
89     }else if(Fator_pos <= 1)
90     {
91         Fator_pos = 1;
92     }
93     if(Fator_neg >= 1.05)
94     {
95         Fator_neg = 1.05;
96     }else if(Fator_neg <= 0.75)
97     {
98         Fator_neg = 0.75;
99     }
100 }
101
102 void cria_matriz_20x20() // Cria matriz 20x20
103 {
104     // Cantos
105     matriz_20x20[0][0] = matriz_8x8[0][0];
106     matriz_20x20[19][0] = matriz_8x8[7][0];
107     matriz_20x20[0][19] = matriz_8x8[0][7];
108     matriz_20x20[19][19] = matriz_8x8[7][7];
109
110     // Extremidades horizontais
111     m = 0;
112     n = 0;
113     for(int i=0;i<=19;i=i+19)
114     {
115         for(int j=1;j<=18;j=j+3)

```

```

116 {
117     matriz_20x20[i][j] = (matriz_8x8[m][n] + matriz_8x8[m][n+1])/2;
118     matriz_20x20[i][j+1] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m][n+1])/2;
119     matriz_20x20[i][j+2] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m][n+2])/2;
120     n = n+1;
121 }
122 n=0;
123 m=7;
124 }
125
126 // Extremidades verticais
127 m = 0;
128 n = 0;
129 for(int j=0;j<=19;j=j+19)
130 {
131     for(int i=1;i<=18;i=i+3)
132     {
133         matriz_20x20[i][j] = ((matriz_8x8[m][n]+matriz_8x8[m+1][n])/2);
134         matriz_20x20[i+1][j] = (matriz_8x8[m+1][n]);
135         matriz_20x20[i+2][j] = ((matriz_8x8[m+1][n]+matriz_8x8[m+2][n])/2);
136         m = m+1;
137     }
138     m=0;
139     n=7;
140 }
141
142 // Centro
143 m = 0;
144 n = 0;
145 for(int j=1;j<=18;j=j+3)
146 {
147     for(int i=1;i<=18;i=i+3)
148     {
149         matriz_20x20[i][j] = (matriz_8x8[m][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
150         matriz_20x20[i+1][j] = (matriz_8x8[m+1][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
151         matriz_20x20[i+2][j] = (matriz_8x8[m+2][n] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
152         matriz_20x20[i][j+1] = (matriz_8x8[m][n+1] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
153         matriz_20x20[i][j+2] = (matriz_8x8[m][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
154         matriz_20x20[i+1][j+2] = (matriz_8x8[m+1][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
155         matriz_20x20[i+2][j+2] = (matriz_8x8[m+2][n+2] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
156         matriz_20x20[i+2][j+1] = (matriz_8x8[m+2][n+1] + matriz_8x8[m+1][n+1])/2;
157         matriz_20x20[i+1][j+1] = matriz_8x8[m+1][n+1];
158
159         m = m + 1;
160     }
161     m=0;
162     n=n+1;
163 }
164 }
165
166 void calcula_media_20x20() // Media 20x20
167 {
168     media_20x20 = 0.0;
169     for(int i=0;i<=19;i++)
170     {
171         for(int j=0;j<=19;j++)
172         {
173             media_20x20 = media_20x20 + matriz_20x20[i][j];
174         }
175     }
176     media_20x20 = media_20x20/400;
177 }

```

```

178
179 void calibragem_20x20() // Fator, contraste, máximo e mínimo
180 {
181     maximo_20x20 = 0;
182     minimo_20x20 = 100;
183     media_imagem_20x20 = 0;
184
185     for(int i = 0; i<=19; i++)
186     {
187         for(int j = 0; j<=19; j++)
188         {
189             if(matriz_20x20[i][j] > media_20x20)
190             {
191                 imagem_20x20[i][j] = matriz_20x20[i][j]^Fator_pos*(matriz_20x20[i][j]/media_20x20);
192                 media_imagem_20x20 = media_imagem_20x20 + imagem_20x20[i][j];
193                 if(imagem_20x20[i][j] > maximo_20x20)
194                 {
195                     maximo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
196                 }else
197                 {
198                     minimo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
199                 }
200             }else
201             {
202                 imagem_20x20[i][j] = matriz_20x20[i][j]^Fator_neg*(matriz_20x20[i][j]/media_20x20);
203                 media_imagem_20x20 = media_imagem_20x20 + imagem_20x20[i][j];
204                 if(imagem_20x20[i][j] > maximo_20x20)
205                 {
206                     maximo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
207                 }else
208                 {
209                     minimo_20x20 = imagem_20x20[i][j];
210                 }
211             }
212         }
213     }
214     media_imagem_20x20 = (media_imagem_20x20 / 400);
215 }
216
217 void inverte_matriz_20x20() // Inverte -> display
218 {
219     for(int i=19;i>=0;i--)
220     {
221         for(int j=19;j>=0;j--)
222         {
223             imagem_20x20_invertida[19-j][19-i]=imagem_20x20[i][j];
224         }
225     }
226 }
227
228 void imprime_display() // Escala de cor e imprime display
229 {
230     myGLCD.setBackColor(VGA_TRANSPARENT); //
231     myGLCD.setFont(SmallFont); //SmallFont or BigFont
232
233     int y2=0,x2=0,w=0;
234     for(int x1=320;x1>=16;x1=x1-16)
235     {
236         x2 = x1-16;
237         for(int y1=320;y1>=16;y1=y1-16)
238         {
239             y2 = y1-16;
240
241             int i = (320-x1)/16;
242             int j = (320-y1)/16;
243             int indice_l = map(imagem_20x20_invertida[i][j], minimo_20x20, maximo_20x20, 0, 768); // 256*rgb = 768
244             int R,G,B;

```

```

245
246     if(indice_1 >=512)
247     {
248         myGLCD.setColor(255, (0.84*(767-indice_1)),0);           // 214/255 = 0,84
249         myGLCD.fillRect(x2,y2,x1,y1);
250     }else if(indice_1 >=256)
251     {
252         myGLCD.setColor(255, (214+.16*(512-indice_1)),0);
253         myGLCD.fillRect(x2,y2,x1,y1);
254     }else{
255         myGLCD.setColor(indice_1,255,255-indice_1);
256         myGLCD.fillRect(x2,y2,x1,y1);
257     }
258
259     int numero = (((maximo_20x20-minimo_20x20)/(20-1))*w)+(minimo_20x20);
260     int numero_scale = map(numero, minimo_20x20, maximo_20x20, 0, 768);
261
262     if(numero_scale >=512)
263     {
264         myGLCD.setColor(255, (0.84*(767-numero_scale)),0);
265         myGLCD.fillRoundRect(x2,338,x1,323);
266         myGLCD.setColor(255,255,255);
267         myGLCD.printNumI(numero,(x2+2),(324));
268     }else if(numero_scale >=256)
269     {
270         myGLCD.setColor(255, (214+.16*(512-numero_scale)),0);
271         myGLCD.fillRoundRect(x2,338,x1,323);
272         myGLCD.setColor(255,255,255);
273         myGLCD.printNumI(numero,(x2+2),(324));
274     }else{
275         myGLCD.setColor(indice_1,255,255-numero_scale);
276         myGLCD.fillRoundRect(x2,338,x1,323);
277         myGLCD.setColor(255,255,255);
278         myGLCD.printNumI(numero,(x2+2),(324));
279     }
280 }
281 w++;
282 }
283
284 // Média, mínimo e máximo display
285 myGLCD.setColor(VGA_BLACK);
286 myGLCD.fillRect(2,344,317,475);
287 myGLCD.drawRect(1,343,318,476);
288 myGLCD.setFont(BigFont);
289 myGLCD.setColor(VGA_LIME);
290 myGLCD.print("MÉDIA:",(10),(350));
291 myGLCD.printNumF(media_imagem_20x20,1,(105),(350));
292 myGLCD.print("MÍNIMO:",(10),(380));
293 myGLCD.printNumF(minimo_20x20,2,(125),(380));
294 myGLCD.print("MÁXIMO:",(10),(410));
295 myGLCD.printNumF(maximo_20x20,2,(125),(410));
296 myGLCD.setFont(SmallFont);
297 myGLCD.setColor(VGA_BLUE);
298 myGLCD.print("UFESM",(278),(445));
299 myGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
300 myGLCD.print("CEESP",(275),(460));

```

**ANEXO D – PROJEÇÃO ORTOGRÁFICA DAS DIMENSÕES DO SUPORTE  
PRESO A TAMPA DO GABINETE DA PILHA DE CAC**

