



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ELÉTRICA E RADIOMÉTRICA DE UM SENSOR DE IMAGEM CMOS APS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

Henrique Perrenoud Duarte

Relatório Final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Márcio Afonso Arimura Fialho.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE

São José dos Campos

2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ELÉTRICA E RADIOMÉTRICA DE UM SENSOR DE IMAGEM CMOS APS PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

Henrique Perrenoud Duarte

Relatório Final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Márcio Afonso Arimura Fialho.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE

São José dos Campos

2023

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a resposta eletro-óptica de um sensor de imagem com aplicações espaciais em relação à sua temperatura de operação e diversas tensões de polarização. Além disso, busca-se obter um melhor entendimento do comportamento dos sensores de imagem baseados em silício e desenvolver um sistema de controle térmico ativo para sua caracterização. O objetivo final é otimizar o desempenho radiométrico e reduzir o consumo elétrico de equipamentos que utilizam esses sensores de imagem, incluindo um sensor de estrelas em desenvolvimento no INPE. Fundamentado em projeto prévio, foi realizado um estudo do comportamento do sensor STAR-1000 em relação à temperatura, resultando na implementação de um sistema de controle ativo da temperatura no kit de desenvolvimento do sensor. Esse kit permitirá determinar as condições ideais de operação do sensor (temperatura e tensões de polarização), o que resultará em redução de custos e melhoria na qualidade das imagens obtidas. Para melhorar o funcionamento do sistema, foram realizadas algumas modificações. Com o objetivo de obter um controle mais preciso da temperatura, alterou-se a estrutura do código e a lei de controle térmico presente no controlador, baseando-se na linearização dos dados do termistor MF51E103E3950 fornecidos pelo fabricante (Cantherm). Isso resultou em uma redução média de aproximadamente 1,7% no erro percentual. Além disso, foi acrescentado o sistema de refrigeração à água, levando a algumas adaptações projetuais, como a necessidade de elaboração e desenvolvimento de apoios para o kit, visando facilitar a fixação do sistema ao bloco térmico. Também foram feitas modificações no circuito implementado na CPLD presente no kit responsável pela aquisição das imagens do sensor. Essa intervenção reduziu alguns erros presentes nas imagens, além de otimizar o código em termos de utilização de recursos e tamanho. Com base nessas mudanças, foi possível obter conclusões sobre o comportamento do sensor em relação à temperatura por meio de histogramas gerados para baterias de imagens registradas. Para dar continuidade a este projeto de Iniciação Científica, estão programadas as seguintes atividades: Atualização do circuito implementado na CPLD para pleno funcionamento do kit; Análise e determinação da temperatura ótima de operação do sensor considerando o custo de um sistema de refrigeração e os ganhos na qualidade das imagens; Investigação experimental sobre como a resposta eletro-óptica do sensor de imagem com aplicações espaciais varia em relação à temperatura de operação e às diversas tensões de polarização; Implementação de um código aprimorado para monitoramento do termistor no lado quente da pastilha termoelétrica.

Palavras-chave: Aquisição de Imagem. Controle Térmico. Eletrônica de Proximidade. CMOS. Sensor de Píxel Ativo.

ABSTRACT

This work aims to investigate the electro-optical response of an image sensor for space applications concerning its operating temperature and various polarization voltages. Furthermore, it seeks a better understanding of the behavior of silicon-based image sensors and to develop an active thermal control system for their characterization. The ultimate goal is to optimize radiometric performance and reduce the power consumption of equipment utilizing these image sensors, including a star sensor currently under development at INPE. Building upon a previous project, a study of the behavior of the STAR-1000 sensor concerning temperature was conducted, resulting in the implementation of an active temperature control system within the sensor development kit. This kit enables the determination of optimal sensor operating conditions (temperature and polarization voltages), leading to cost reduction and improved image quality. To enhance system functionality, several modifications were made. In pursuit of more precise temperature control, changes were made to the code structure and thermal control law in the controller, based on linearization of data from the MF51E103E3950 thermistor provided by the manufacturer (Cantherm). This resulted in an average reduction of approximately 1.7% in percentage error. Furthermore, a water cooling system was integrated, necessitating design adaptations such as the development of supports for the kit to facilitate attachment to the thermal block. Modifications were also made to the circuit implemented in the CPLD within the kit responsible for image acquisition from the sensor. This intervention reduced certain errors present in the images and optimized the code in terms of resource utilization and size. Based on these changes, conclusions regarding the sensor's behavior concerning temperature were drawn through histograms generated for batches of recorded images. To continue this undergraduate research project, the following activities are planned: Updating the circuit implemented in the CPLD for full kit functionality; Analysis and determination of the optimal operating temperature of the sensor considering the cost of a cooling system and the gains in image quality; Experimental investigation into how the electro-optical response of the image sensor with space applications varies concerning operating temperature and different polarization voltages; Implementation of enhanced code for monitoring the thermistor on the hot side of the thermoelectric module.

Keywords: Image Acquisition. Thermal Control. Proximity Electronics. CMOS. Active Pixel Sensor.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - <i>Photodiode Operation</i>	14
Figura 2 - Arquitetura de <i>Pixel</i> CMOS APS-3T.....	15
Figura 3 - <i>Dark Current x Temperature</i>	15
Figura 4 - Solução Proposta.....	16
Figura 5 - Esquemático do Circuito Proposto.....	17
Figura 6 - $T \times \ln(R/1\Omega)$ para 268,15K a 298,15K.....	18
Figura 7 - $T \times \ln(R/1\Omega)$ para 298,15K a 323,15K.....	19
Figura 8 - Placa de Circuito Impresso Desenvolvida.....	20
Figura 9 - Bloco Térmico e Detalhes da Acoplagem dos Termistores.....	21
Figura 10 - Sistema de Dissipação Térmica.....	21
Figura 11 - Desenho Técnico de Suporte.....	22
Figura 12 - Teste de Integração do Kit com o Bloco Térmico.....	23
Figura 13 - Imagem Capturada com Código Anterior.....	25
Figura 14 - Imagem Capturada com Código Modificado.....	25
Figura 15 - Estrutura do Modelo.....	27
Figura 16 - Superfície de Saída.....	28
Figura 17 - Imagem e Histograma 26,3°C.....	30
Figura 18 - Imagem e Histograma 25°C.....	30
Figura 19 - Imagem e Histograma 20°C.....	31
Figura 20 - Imagem e Histograma 15°C.....	31
Figura 21 - Imagem e Histograma 10°C.....	31
Figura 22 - Sobreposição Comparativa (MATLAB).....	32
Figura 23 - Comparação Qualitativa de Escurecimento.....	33

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1 - Base de Dados SISAM.....	26
Tabela 2 - Dados para Treinamento.....	28
Tabela 3 - Tabela Comparativa Parcial.....	29

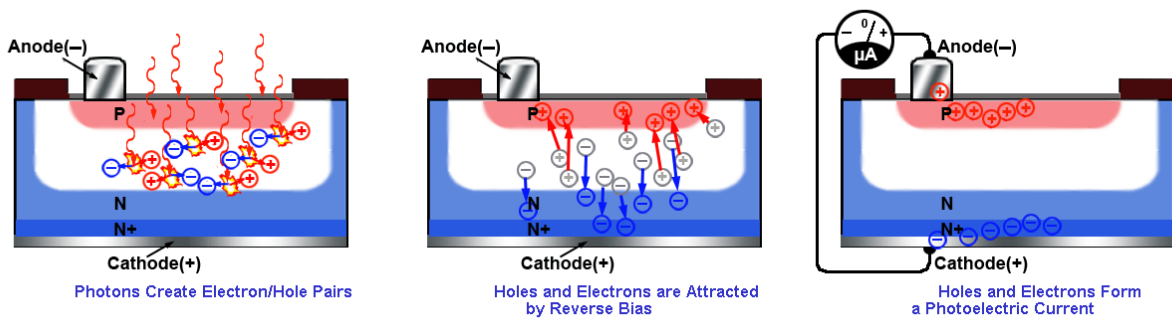
SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 DESENVOLVIMENTO.....	17
3 CONCLUSÕES.....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1 Introdução

A grande maioria dos sensores de imagem em uso atualmente são componentes semicondutores que operam em níveis de tensão e corrente de baixa intensidade, e desempenham sua função através da captura de fótons. Essas partículas interagem com conjuntos de elementos fotossensíveis, originando pares de elétrons e lacunas. Normalmente, apenas um dos portadores de carga do par elétron-lacuna gerado pela absorção de um fóton fica retido no fotodiodo. O outro é drenado para a fonte de alimentação do circuito. Esse portador de carga que fica retido nos fotodiodos presentes nos pixels pode ser um elétron ou uma lacuna, dependendo da arquitetura do sensor de imagem. Posteriormente, essa carga é transformada em um sinal elétrico.

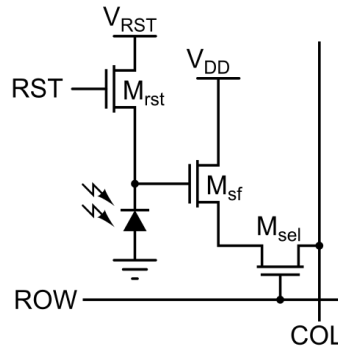
Figura 1 - *Photodiode Operation*.



Fonte: Coates (2020).

Contudo, a presença de ruído introduz um desafio substancial na qualidade das imagens geradas por esses dispositivos. Pesquisas prévias identificaram que a agitação térmica das partículas nos sensores APS (Sensores de Pixel Ativo) resulta em dois efeitos indesejados: ruído térmico e corrente de escuro. O ruído térmico decorre da movimentação aleatória dos portadores de carga, provocada por essa agitação térmica. Especificamente no contexto deste estudo está o sensor STAR-1000, que é alvo de análise, onde o ruído de *reset* nos pixels durante a ativação do transistor de *reset* é uma das principais contribuições para essa interferência.

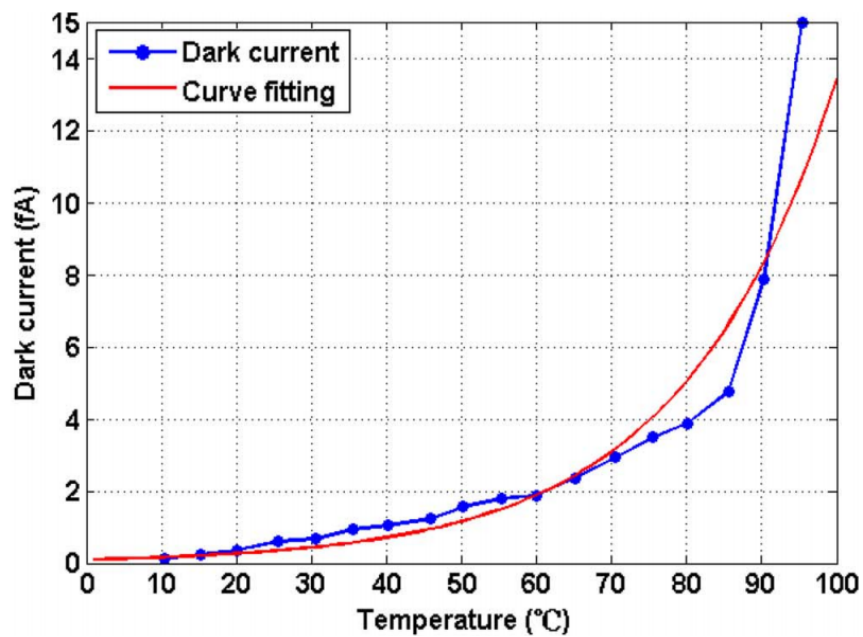
Figura 2 - Arquitetura de *Pixel* CMOS APS-3T.



Fonte: Wikipedia (2008).

A corrente de escuro, por outro lado, não apenas limita a faixa dinâmica disponível para o sinal fotoelétrico, como também é resultante do acúmulo de portadores de carga gerados dentro do fotodiodo. Esse processo ocorre quando um elétron adquire energia suficiente para transitar da banda de valência para a banda de condução. A relação entre a corrente de escuro e a temperatura segue um padrão aproximadamente exponencial, com seu valor dobrando a cada incremento de cerca de 10°C (FIALHO, 2007).

Figura 3 - *Dark Current x Temperature*.

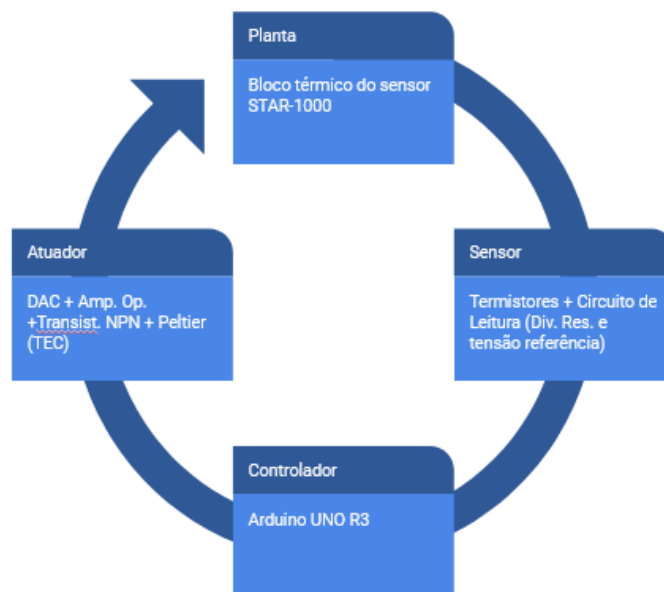


Fonte: Lin et al. (2010).

Diante dessa premissa, o propósito deste projeto consiste em analisar o comportamento do sensor STAR-1000 em relação às variações de temperatura, com o objetivo de eliminar a componente determinística da corrente de escuro por meio de uma caracterização minuciosa do sensor e da aplicação de controle térmico preciso. Para concretizar essa meta, foi concebido um sistema de controle ativo de temperatura para o sensor, que foi originalmente desenvolvido em um projeto anterior. O esquema desse sistema está ilustrado na Figura 4 e foi incorporado ao conjunto de ferramentas de caracterização do sensor no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ao longo do período de pesquisa, o sistema foi submetido a testes, aprimorado e refinado.

A implementação desse sistema de controle térmico almeja otimizar o desempenho radiométrico do sensor, ao mesmo tempo em que reduz o consumo elétrico dos dispositivos que se utilizam desse tipo de sensor. Isso inclui o sensor de estrelas que está em fase de desenvolvimento no INPE. Além de tudo, ao aprofundar o entendimento acerca do comportamento dos sensores de imagem que se baseiam em tecnologia de silício, espera-se uma melhoria na qualidade das imagens capturadas. Este aprimoramento pode proporcionar benefícios substanciais em um amplo espectro de aplicações.

Figura 4 - Solução Proposta.

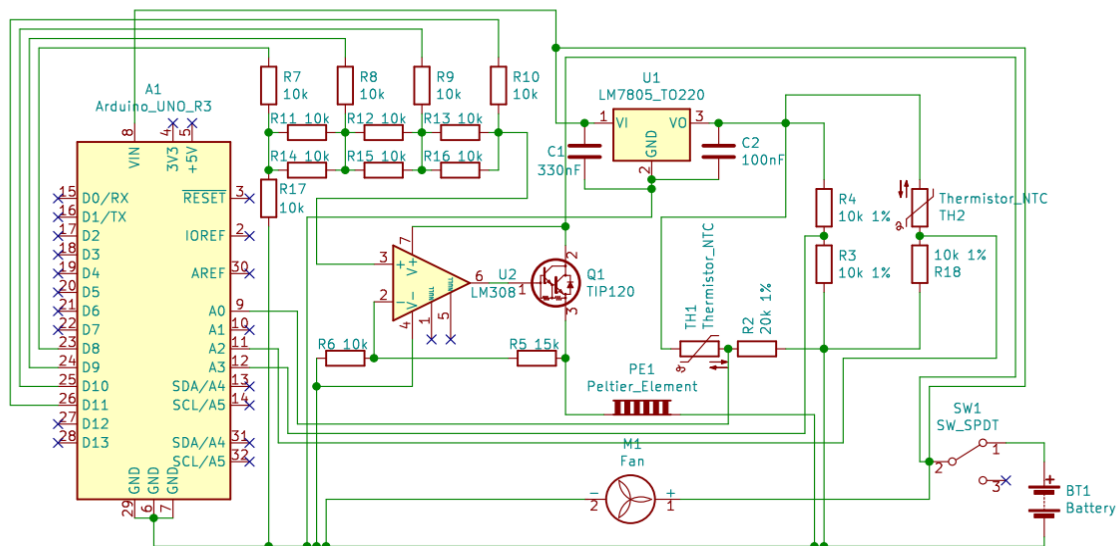


Fonte: Elaborado pelo autor (PERRENOUD, 2022).

2 Desenvolvimento

O esquema proposto para a implementação do sistema de controle de temperatura é representado pelo esquemático da Figura 5.

Figura 5 - Esquemático do Circuito Proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor (PERRENOUD, 2022).

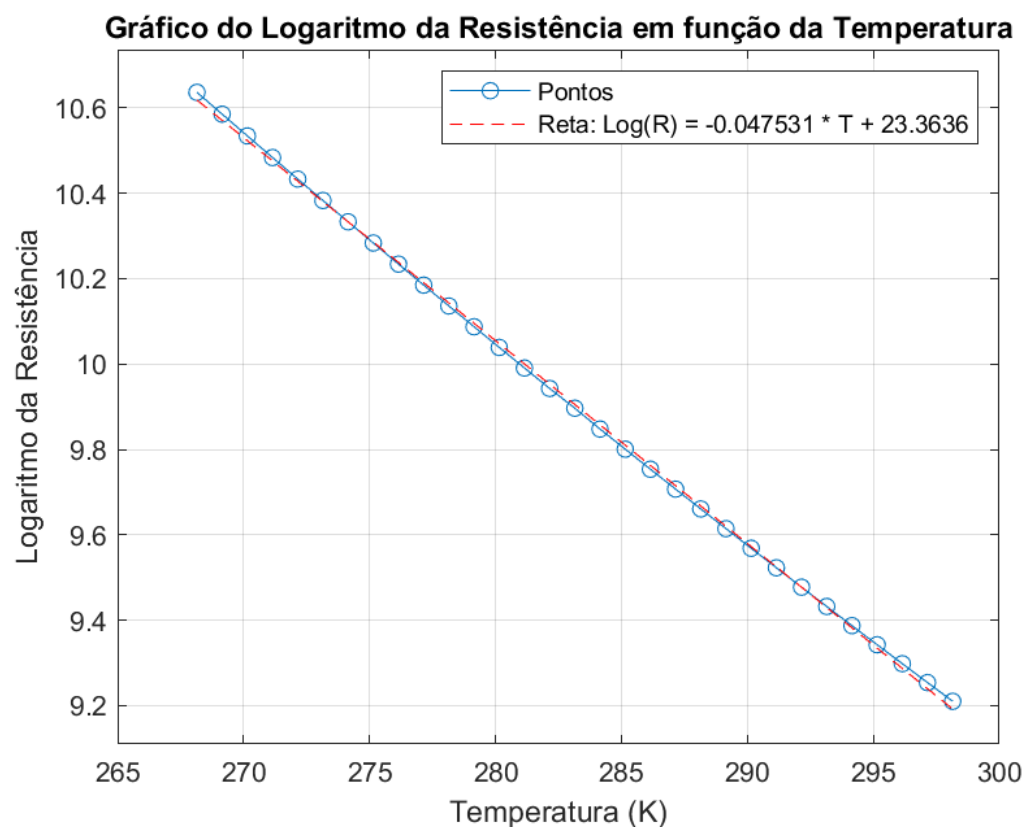
A operação do sistema ocorre através da coleta de dados de temperatura obtidos pelos termistores TH1 e TH2, que estão localizados em contato direto com o sensor STAR-1000 e inseridos em um bloco térmico de alumínio. Além disso, o cálculo indireto da resistência dos termistores NTC (Coeficiente Negativo de Temperatura, diminuindo a sua resistência elétrica conforme o aumento da temperatura) é realizado. A determinação dos valores de resistência é baseada nas tensões captadas nos divisores resistivos formados por esses elementos, juntamente com suas respectivas resistências em série. Utilizando essas tensões, junto com a leitura da tensão entre R4 e R3 (para compensar possíveis variações no conversor Analógico-Digital do Arduino ou na saída de U1), e conhecendo os valores de R2, R18, R3 e R4, o software incorporado no Arduino é capaz de calcular o valor das resistências apresentadas por cada termistor.

Com esses valores em mãos, eles são aplicados em duas Leis de Controle, detalhadas ao longo desta seção. Uma é destinada ao termistor do lado quente e a outra ao do lado frio da pastilha. Isso proporciona a obtenção e o registro das

temperaturas correspondentes, que são subsequentemente utilizadas pelo controlador PID implementado. Importa ressaltar que, até o momento presente, apenas a temperatura do lado frio é considerada como entrada pelo controlador, enquanto a temperatura do lado quente é registrada exclusivamente para fins de monitoramento.

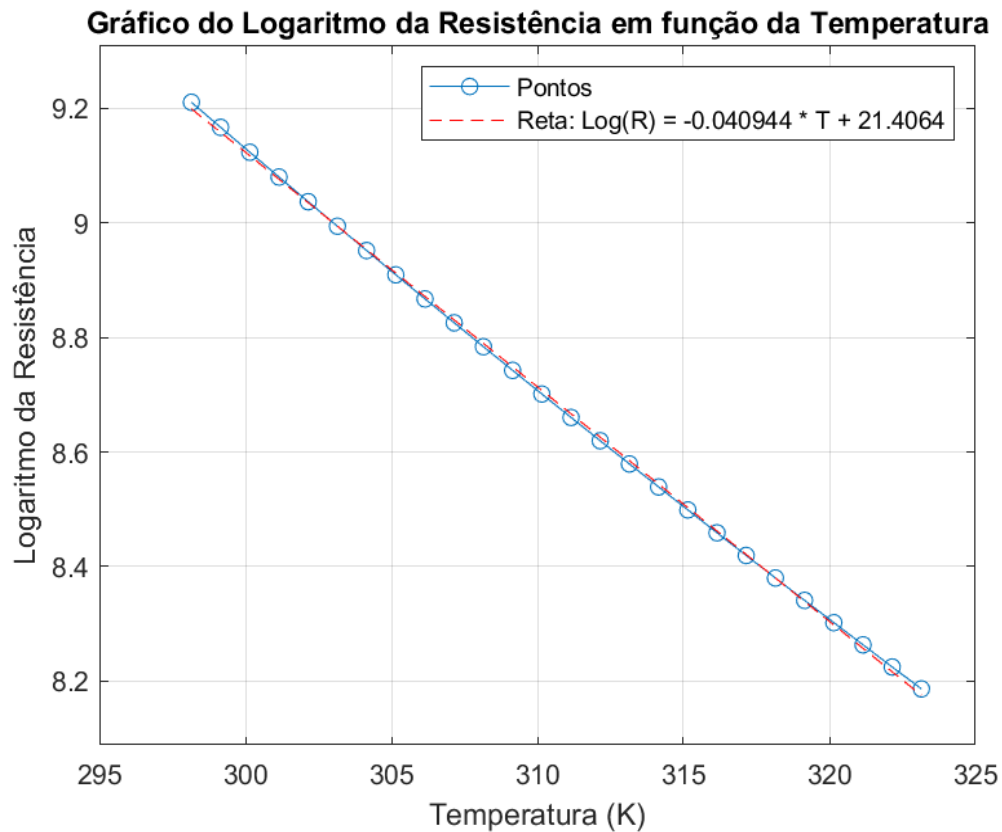
Com o objetivo de aprimorar as leis de controle já obtidas em trabalhos desenvolvidos anteriormente, foram revisados os dados de temperatura na faixa de 268,15 K a 323,15 K (subdividida em 268,15 K - 298,15 K e 298,15 K - 323,15 K) e as correspondentes resistências (R) do termistor MF51E103E3950 (Cantherm), conforme fornecidos pelo fabricante.

Figura 6 - $\ln(R)$ x T para 268,15 K a 298,15 K.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - $\ln(R)$ x T para 298,15 K a 323,15 K.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, ao realizar a plotagem do gráfico que correlaciona a temperatura com a resistência, empregando o método de substituição de variáveis, efetuou-se a troca de R por $\ln(R/1\Omega)$ no eixo vertical. Essa transformação resultou na linearização da curva obtida, originando as equações a seguir. Estas equações foram derivadas visando alcançar maior precisão nas medições dos lados frio (T_{cs}) e quente (T_{hs}):

$$T_{cs} = \frac{\ln(R) - 23.3636}{-0,047531}$$

$$T_{hs} = \frac{\ln(R) - 21,4064}{-0,040944}$$

Em relação às configurações adotadas para o controlador PID implementado, optou-se por configurá-lo como "*Proportional on Measurement*". Essa escolha resulta em um comportamento mais suave da saída em resposta a alterações na temperatura alvo (*setpoint*). Os parâmetros do controlador foram

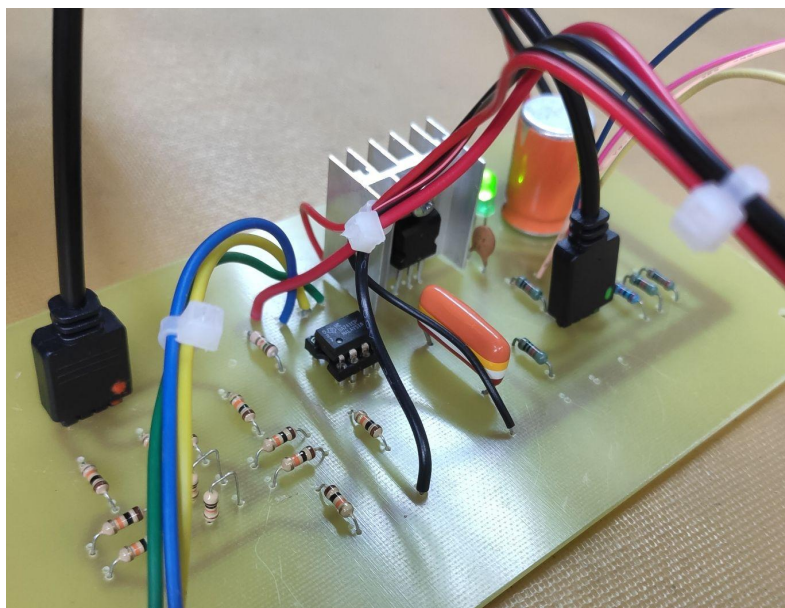
definidos como segue: $K_p = 20$, responsável pela redução do tempo de resposta e o erro de estado estacionário; $K_i = 50$, pela eliminação completamente do erro de estado estacionário; $K_d = 10$, para aumento de agilidade e estabilidade do sistema. Esses valores foram selecionados por meio de iteração e ajuste, com o intuito de obter uma resposta de saída rápida e estável (MUNIZ, 2017).

Após essa etapa, o sinal gerado pelo controlador (*output*) é direcionado a um conversor digital-analógico simples, utilizando uma rede R-2R com precisão de 4 bits. Esse sinal é então amplificado por um amplificador operacional LM308 com um ganho de 2,5 ($gain = \frac{R5+R6}{R6}$), antes de ser enviado ao módulo Peltier TEC-12706. O controle do conversor digital-analógico é realizado através de um código que manipula diretamente as portas do microcontrolador (PORTB: pinos D8 a D13). Esse método otimiza a utilização de memória e proporciona uma resposta mais ágil.

Assim, é obtida uma resposta amplificada e proporcional que é enviada à pastilha termoelétrica Peltier.

Após a realização dos testes do circuito em *softwares* como Autodesk Tinkercad e LTspice XVII, além da prototipagem do sistema, como mostrado na Figura 5, procedeu-se ao desenvolvimento da placa de circuito impresso.

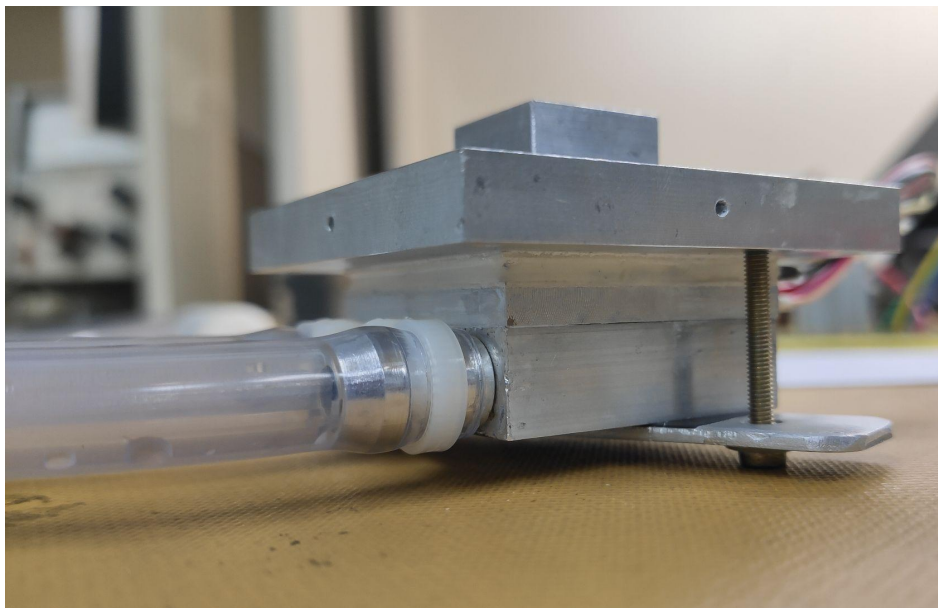
Figura 8 - Placa de Circuito Impresso Desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo autor (PERRENOUD, 2022).

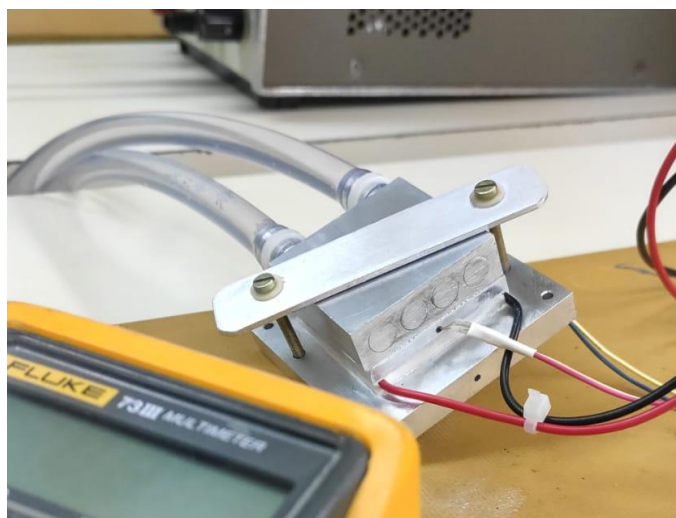
Uma característica significativa do kit de caracterização do sensor STAR-1000, relevante para a montagem da estrutura do sistema, é a inclusão de um orifício com cerca de 2,5 cm x 2,5 cm na placa de circuito impresso do conjunto de desenvolvimento. Esse orifício possibilita o estabelecimento de um contato direto entre o sensor e o bloco metálico conectado ao módulo Peltier, que é utilizado para o controle de temperatura durante o processo de caracterização eletro-óptica do imageador.

Figura 9 - Bloco Térmico e Detalhes da Acoplagem dos Termistores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

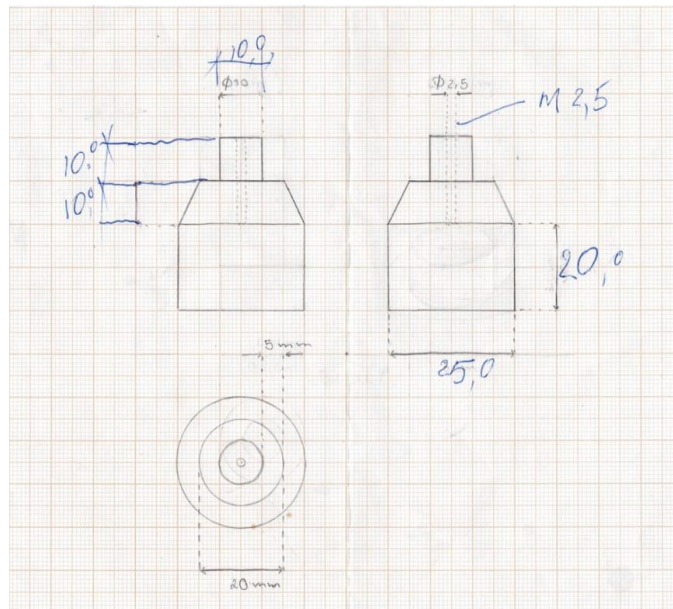
Figura 10 - Sistema de Dissipação Térmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

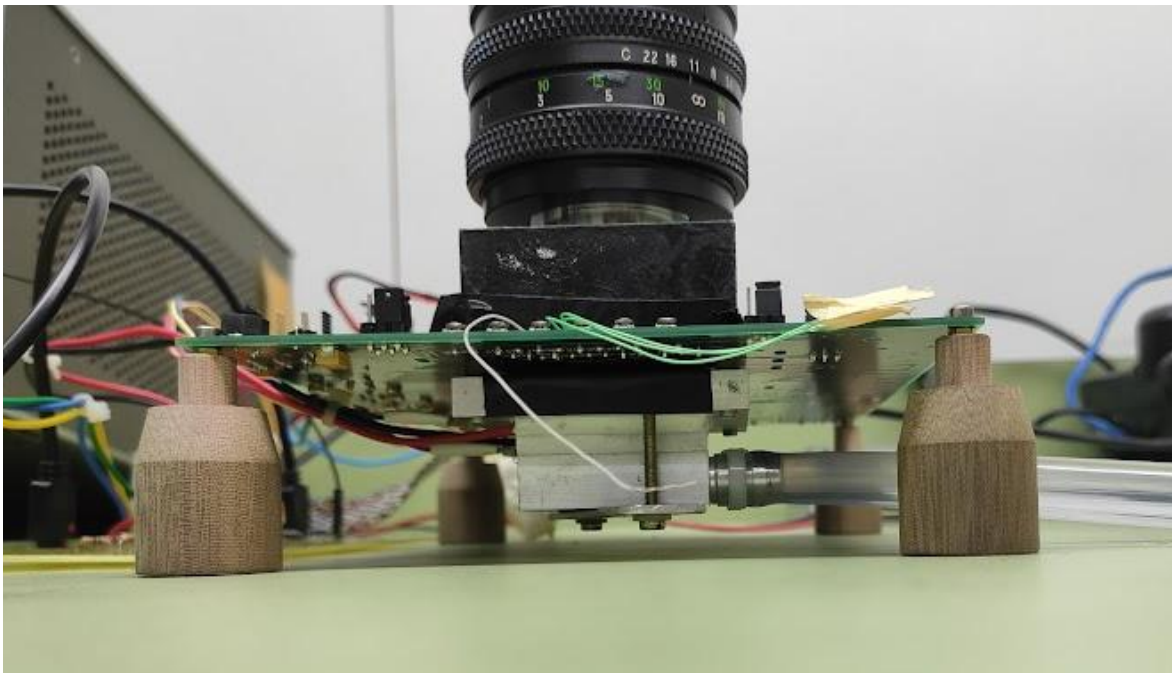
Durante a realização dos testes experimentais, observou-se a necessidade de efetuar algumas modificações no projeto em relação aos suportes do kit de caracterização. Isso se deve ao espaço ocupado pelo bloco térmico, que se encontra posicionado sob o kit. Com o intuito de atender a essa demanda, foram desenvolvidos quatro suportes feitos de madeira. Esses suportes são fixados ao kit através de parafusos M2,5. A escolha desse material foi determinada pela sua capacidade de absorver impactos e pelas suas propriedades como isolante elétrico natural, apresentando uma baixa condutividade elétrica.

Figura 11 - Desenho Técnico de Suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Teste de Integração do Kit com o Bloco Térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema desenvolvido possibilita a regulação da temperatura do sensor APS em análise, facilitando uma caracterização mais precisa do mesmo. Essa capacidade é de suma importância para a obtenção de imagens de qualidade superior, caso o sensor de imagem seja implementado em um dispositivo como um sensor de estrelas ou uma câmera de imageamento.

Com a implementação do sistema de controle de temperatura ao kit de caracterização do sensor STAR-1000, realizaram-se alguns testes iniciais para captura de imagem. Com estes testes, surgiram alguns problemas relacionados ao circuito implementado na CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) do kit, e a possibilidade de condensação no bloco térmico, colocando em risco a integridade dos componentes. As soluções propostas foram o estudo e modificação do circuito implementado na CPLD, por se tratar de um circuito projetado em 2007 e o monitoramento da temperatura do ponto de orvalho durante a realização dos testes.

A CPLD é composta por uma variedade de elementos internos que podem ser interligados de diversas maneiras, permitindo a criação de circuitos digitais personalizados. No contexto deste projeto, o circuito destinado a controlar o sensor de imagem STAR-1000 foi concebido e implementado através de vários

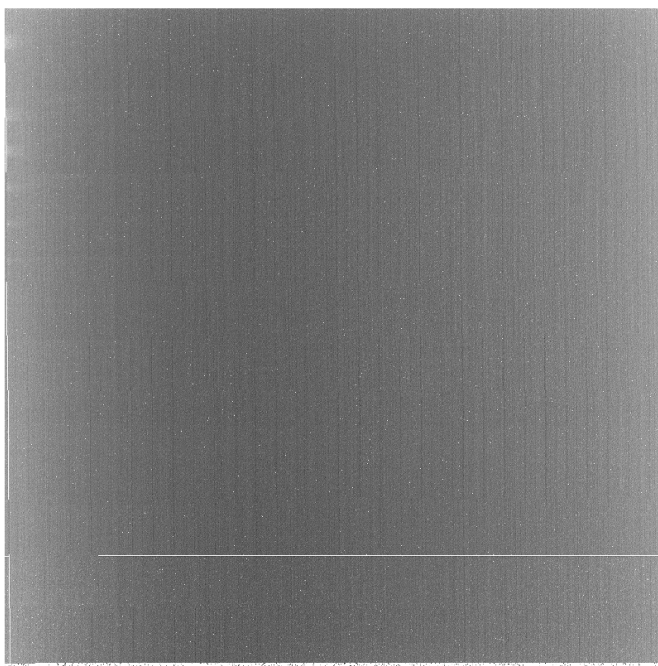
diagramas esquemáticos e código em VHDL na plataforma ISE *Webpack*. Esta ferramenta viabiliza a síntese do circuito na CPLD do kit, traduzindo a descrição do circuito idealizada pelo projetista em um *bitstream* de programação. Esse *bitstream* instrui como os diversos elementos internos da CPLD devem ser interconectados para que ela realize a função específica delineada pelo projeto.

O *bitstream* de programação, em sua essência, determina quais chaves elétricas devem ser fechadas ou mantidas abertas para executar a função prescrita no projeto (kit002). Na CPLD empregada no kit, essas chaves correspondem a transistores MOSFET controlados por células de memória FLASH.

Durante a conversão do circuito projetado pela equipe de desenvolvimento para o *bitstream* de programação, a ferramenta de síntese do ISE *Webpack* realiza um passo intermediário de processamento, convertendo as folhas presentes no diagrama esquemático em arquivos com código VHDL, que são processados posteriormente juntos com os arquivos em VHDL escritos pelos projetistas.

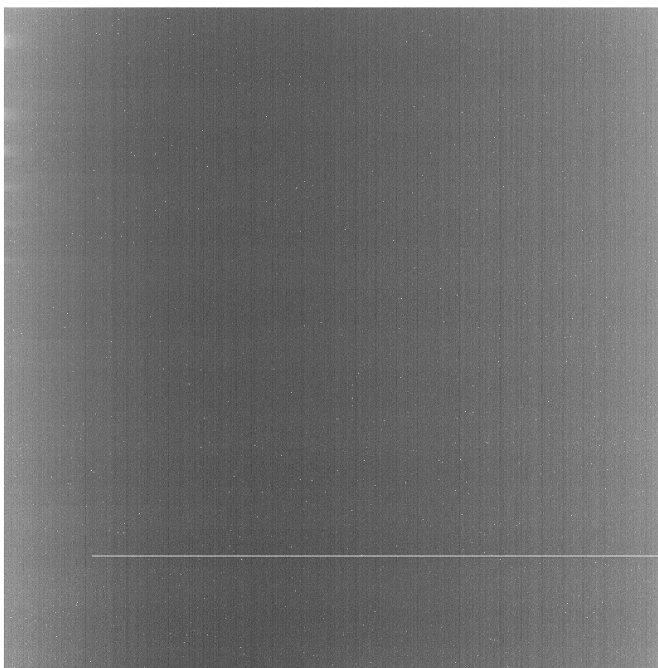
Após um aprofundamento no funcionamento do circuito implementado na CPLD, desenvolvido em captura esquemática e VHDL, fez-se necessário a realização de algumas modificações gerais, presentes no Apêndice C, desenvolvidas em conjunto com o Dr. Antonio Lopes Filho no INPE, onde a principal mudança foi a redução da taxa de transferência da memória FIFO para a memória RAM pela metade. Essa modificação resultou na correção de resíduos presentes nas primeiras colunas e nas últimas linhas das imagens registradas, assim como apresentado pelas Figura 13 e Figura 14.

Figura 13 - Imagem Capturada com Circuito Original.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Imagem Capturada com o Circuito Corrigido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já com relação ao problema da temperatura do ponto de orvalho citado, foi proposto o desenvolvimento de um modelo Neuro-Fuzzy ANFIS para estimativa dessa temperatura.

A base de dados utilizada para treinar e testar o sistema Neuro Fuzzy ANFIS foi coletada a partir do Sistema de Análise e Monitoramento Ambiental (SISAM) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Essa base, apresentada na Tabela 1, consiste em medições de temperatura e umidade relativa coletadas às 12h e 18h, ao longo de 365 dias, no ano de 2019 (único período acessado antes que o site <http://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/porta/> entrasse em manutenção), na cidade de São José dos Campos - SP.

Tabela 1 - Base de Dados SISAM.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	datahora	temperatura_c	umidade_relativa_percentual	mun_geocod	mun_nome	mun_lat	mun_lon	mun_uf_nome
2	1/1/2019 12:00	24,7	72	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
3	1/1/2019 18:00	26,1	78	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
4	2/1/2019 12:00	26,5	70	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
5	2/1/2019 18:00	31,4	47	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
6	3/1/2019 12:00	29	61	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
7	3/1/2019 18:00	28,8	63	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
8	4/1/2019 12:00	25,4	74	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
9	4/1/2019 18:00	23,9	81	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
10	5/1/2019 12:00	22,7	90	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
11	5/1/2019 18:00	23	87	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
12	6/1/2019 12:00	23	84	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
13	6/1/2019 18:00	28,7	56	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
14	7/1/2019 12:00	27,4	61	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
15	7/1/2019 18:00	31,8	42	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
16	8/1/2019 12:00	27,7	62	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
17	8/1/2019 18:00	26,8	71	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
18	9/1/2019 12:00	25,6	67	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
19	9/1/2019 18:00	33	31	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
20	10/1/2019 12:00	27,6	52	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
21	10/1/2019 18:00	30,6	43	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
22	11/1/2019 12:00	26,2	64	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
23	11/1/2019 18:00	27,7	62	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO
24	12/1/2019 12:00	22,6	81	3549904	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,1865	-45,8867	SÃO PAULO

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modelo conta com duas entradas, sendo elas a Temperatura (°C) e a Umidade Relativa do Ar (%) e a sua saída a Temperatura do Ponto de Orvalho (°C). Para treino treino e checagem do sistema, utilizou-se a razão de 7:3 na base de dados coletada, respectivamente, utilizando o método de *Subtractive Clustering*, parametrizado com os valores de: *Range of Influence* de 0,5; *Squash Factor* de 1,0; *Accept Ratio* de 0,5; *Reject Ratio* de 0,15.

O modelo apresenta cinco funções de pertinência gaussianas para cada uma de suas entradas, assim como demonstra sua estrutura na Figura 15, e a

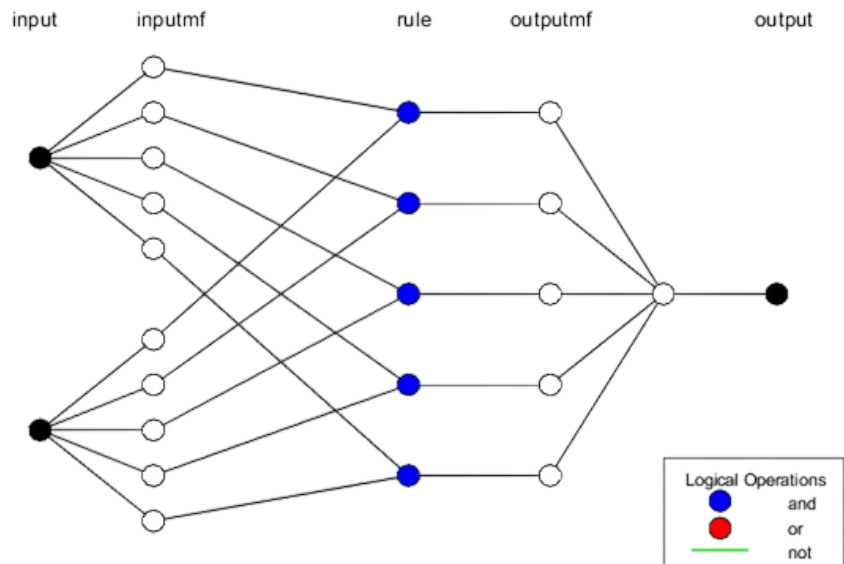
saída esperada foi calculada por meio da aplicação da fórmula de Magnus-Tetens:

$$\gamma(T, UR) = \ln\left(\frac{UR}{100} \exp\left(\frac{bT}{c + T}\right)\right) = \ln\left(\frac{UR}{100}\right) + \frac{bT}{c + T};$$

$$T_{po} = \frac{c\gamma(T, UR)}{b - \gamma(T, UR)};$$

Sendo que T_{po} é a temperatura do ponto de orvalho, T é a temperatura atual do ar (bulbo seco) e UR , a umidade relativa do ar (%).

Figura 15 - Estrutura do Modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, estabelece-se a relação entre a temperatura do ponto de orvalho e as variáveis de temperatura e umidade relativa do ar. Com isso, monta-se a Tabela 2 com os dados para treinamento do modelo desenvolvido.

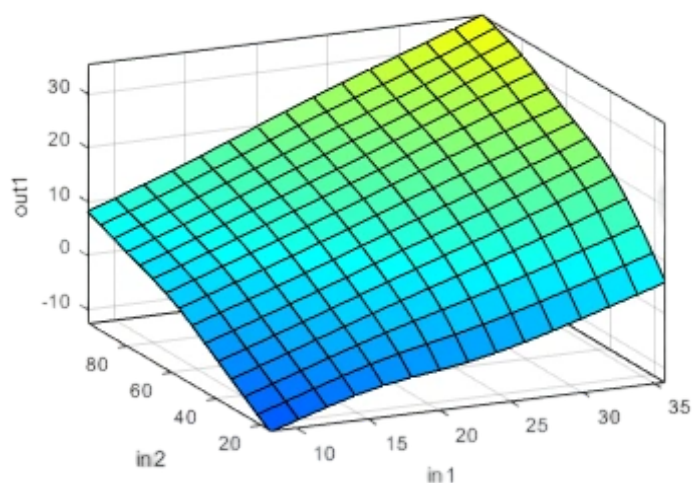
Tabela 2 - Dados para Treinamento.

dadosOrd.xlsx			
	A	B	C
	dadosOrd		
	VarName1	VarName2	VarName3
	Number	Number	Number
1	8.8000	49	-1.3251
2	14	47	2.8634
3	33.9000	15	3.6113
4	20.5000	35	4.5068
5	23.6000	29	4.5149
6	14.5000	55	5.5652
7	27.6000	25	5.7855
8	9.2000	80	5.9302
9	10	78	6.3413
10	23.2000	34	6.4594
11	28.1000	26	6.7763
12	12.1000	70	6.7935
13	35.7000	17	6.8410
14	35.8000	17	6.9210
15	21.2000	40	7.0558
16	8.1000	95	7.3474
17	26.9000	29	7.3478
18	31	23	7.4199

Fonte: Elaborado pelo autor.

A superfície de saída obtida para o modelo proposto está presente na Figura 16, demonstrando um desempenho satisfatório para a aplicação de acordo com as métricas adotadas, com um erro médio quadrático mínimo de treinamento de 0,07, um erro médio quadrático mínimo de verificação de 0,09, desvio padrão de 0,09 e correlação de 0,99.

Figura 16 - Superfície de Saída.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de comparação, também foi elaborada uma planilha comparativa das saídas. Seguindo o mesmo padrão anterior, a coluna 1 representa a temperatura, coluna 2, a umidade relativa do ar, a coluna 3 traz a saída a partir da aplicação da fórmula de Magnus-Tetens e a colunas 4, a saída do modelo proposto.

Tabela 3 - Tabela Comparativa Parcial.

dadosOrd.xlsx				
	A	B	C	D
	dadosOrd			
	VarName1	VarName2	VarName3	VarName4
	Number	Number	Number	Number
1	8.8000	49	-1.3251	-1.3249
2	14	47	2.8634	2.8627
3	33.9000	15	3.6113	3.7228
4	20.5000	35	4.5068	4.4986
5	23.6000	29	4.5149	4.5392
6	14.5000	55	5.5652	5.5635
7	27.6000	25	5.7855	5.8161
8	9.2000	80	5.9302	5.9395
9	10	78	6.3413	6.3448
10	23.2000	34	6.4594	6.4154
11	28.1000	26	6.7763	6.7714
12	12.1000	70	6.7935	6.7885
13	35.7000	17	6.8410	6.8302
14	35.8000	17	6.9210	6.9211
15	21.2000	40	7.0558	7.0795
16	8.1000	95	7.3474	7.3548
17	26.9000	29	7.3478	7.3088
18	31	23	7.4199	7.4265

Fonte: Elaborado pelo autor.

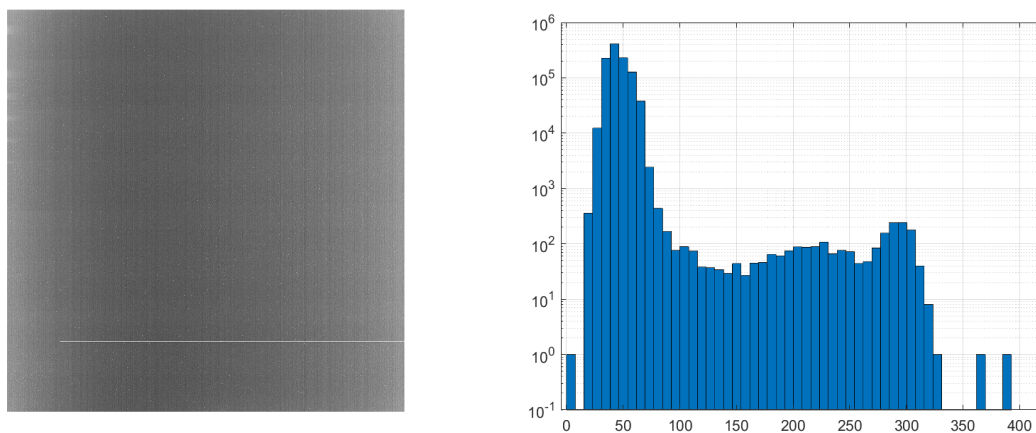
Solucionados os problemas, foram realizadas baterias de teste, para diferentes *setpoints* de temperatura sob as seguintes condições:

- temperatura ambiente de 26,3°C;
- umidade do ar de 40%;
- pressão de vapor H_2O de 3,4 kPa;
- pressão parcial de vapor igual a 1,4 kPa;
- umidade absoluta de 0,01 kg/m³;
- ajuste no valor da tensão de referência de escuro de 92 mV para 1,31 V.

Após o ajuste no valor dessa tensão, reinicializou-se o computador para checagem de possíveis alterações causadas por fatores externos. O comportamento da imagem deste ajuste se manteve.

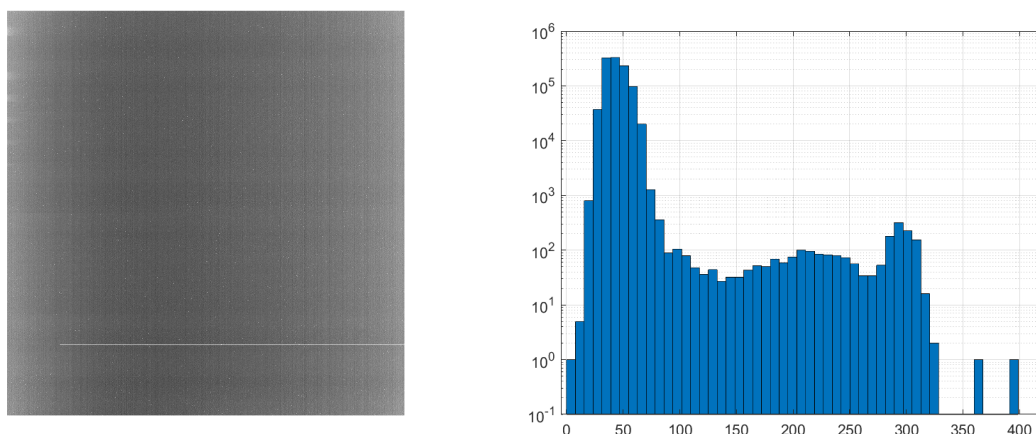
A bateria de imagens geradas foi obtida para duas temperaturas diferentes, uma para 26,3°C (sistema de controle de temperatura desligado), 25°C, 20°C, 15°C, e para 10°C (sistema ligado). Posteriormente, analisaram-se as imagens registradas e foram plotados seus respectivos histogramas normalizados e em escala monolog no eixo y, por meio do *software* MATLAB:

Figura 17 - Imagem e Histograma a 26,3°C.



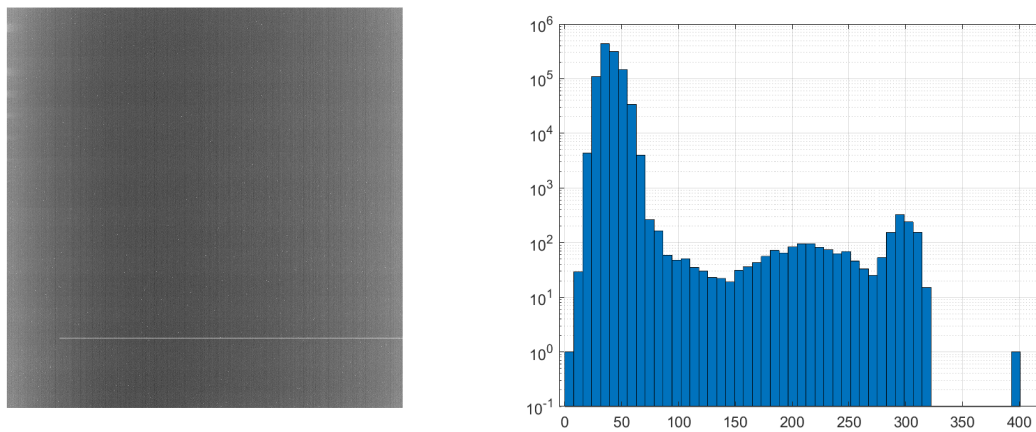
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Imagem e Histograma a 25°C.



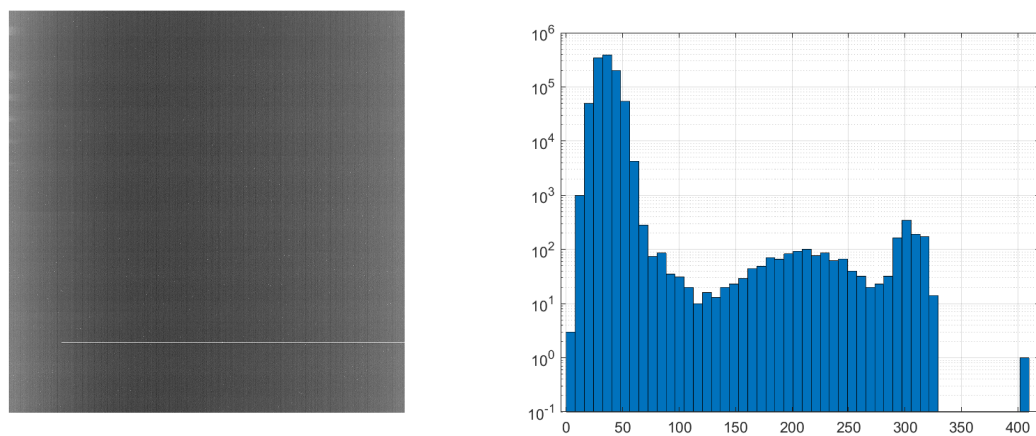
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Imagem e Histograma a 20°C.



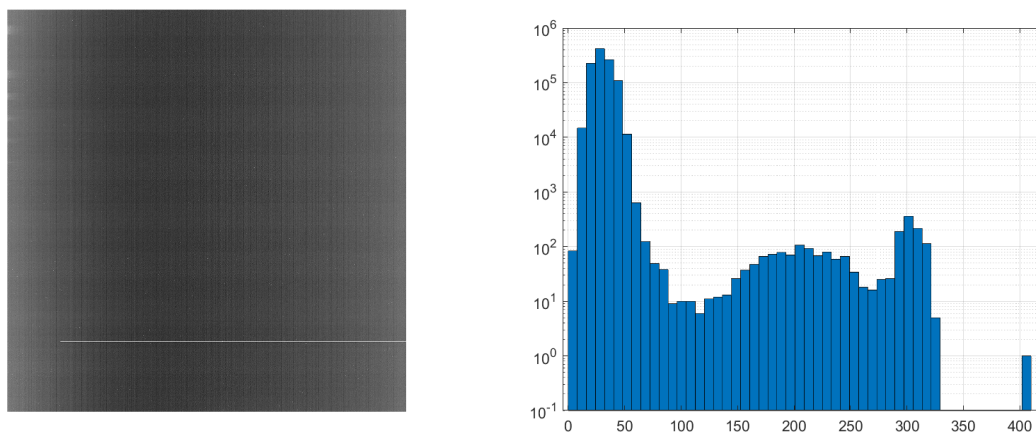
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Imagem e Histograma a 15°C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Imagem e Histograma a 10°C.



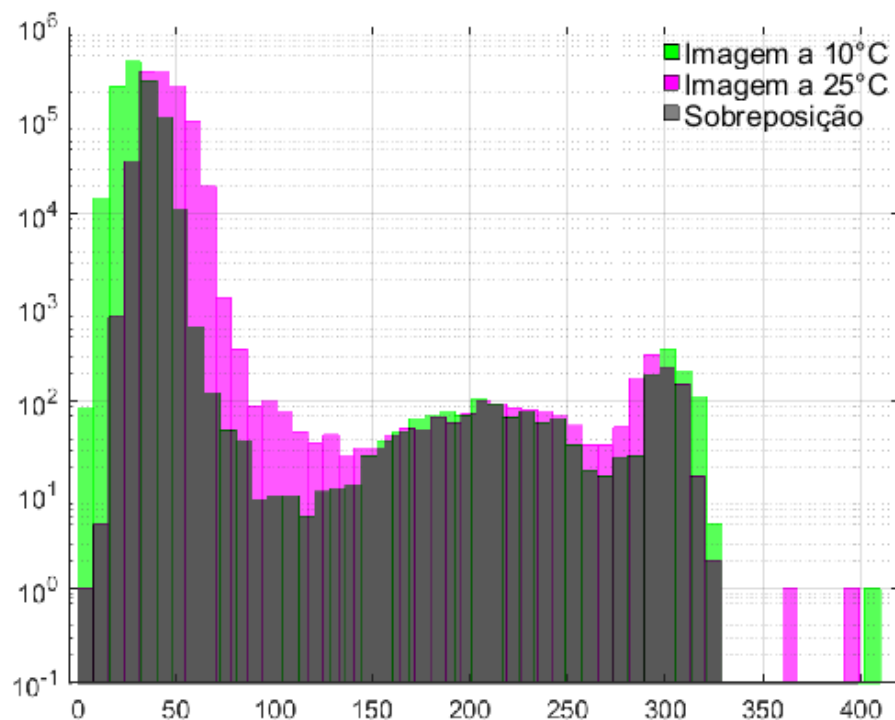
Fonte: Elaborado pelo autor.

3 Conclusões

Assim, mesmo com as dificuldades referentes ao código VHDL e a temperatura do ponto de orvalho, as soluções propostas e o circuito para controle ativo da temperatura demonstraram bom desempenho para a realização dos testes.

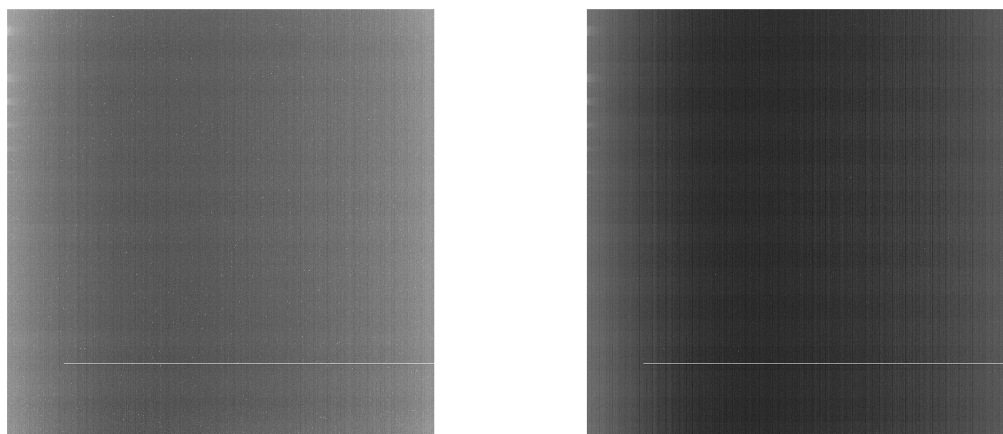
Os histogramas obtidos para as baterias de teste realizadas as temperaturas de 25°C e 10°C, demonstram uma variação considerável na quantidade de *pixels* mais escuros. A frequência destes aumenta, enquanto a de valores mais altos (*pixels* claros) diminui, demonstrando um escurecimento da imagem de aproximadamente 40%, proveniente da redução da componente determinística da corrente de escuro.

Figura 22 - Sobreposição Comparativa (MATLAB).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Comparação Qualitativa de Escurecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas realizações apresentadas, espera-se que este trabalho possa contribuir de alguma forma para que o país siga em direção ao fortalecimento da autonomia nacional no âmbito do desenvolvimento de sistemas espaciais.

Referências Bibliográficas

FIALHO, M. **Estudo comparativo entre dois algoritmos de identificação de estrelas para um sensor de estrelas autônomo de campo largo.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

LIN, D.; WANG, C.; WEI, C. **Quantified Temperature Effect in a CMOS Image Sensor.** IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.57, No.2, 2010.

MUNIZ, S. **Resumo sobre Controladores PID.** Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, 2017.

PERRENOUD, H. **Caracterização térmica, elétrica e radiométrica de um sensor de imagem CMOS APS para aplicações espaciais.** Relatório final de bolsa de iniciação científica - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022.

APÊNDICE A - CÓDIGO PARA CONTROLE ATIVO DE TEMPERATURA

Nesta seção introduz-se o código utilizado para controle ativo de temperatura do sensor STAR-1000 utilizando o controlador PID.

Bloco de código 1: Código utilizado para controle ativo de temperatura do sensor

```
C/C++
/*
  ACTIVE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM (PID) - ATCS v.02
  NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH - INPE

  PERRENOUD, H. (12/06/2023 - dd/mm/aaaa)
  Dr. Márcio A. A. Fialho
*/

//PID configuration
#include <PID_v1.h> //(BEAUREGARD, 2011)

////////////////////////////////////
int ATCS = 1; //Activate Temperature Control System (1=ON and 0=OFF)
double Setpoint = 25; //target temperature
////////////////////////////////////

double Input, Output;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, 20, 50, 10, P_ON_M, REVERSE);

//loop delay control
unsigned long millisTempoI = millis(),
             millisTempoF = millis();

//monitoring connections
const int pinTH1 = A0, //cold side
        pinTH2 = A2, //hot side
        pinDivres = A3; //parameter

//"sensor" temperature
double tSENS;

//voltage divider resistance (TH2 and R2) and "cold side" temperature
const double R2 = 20000.0;
double rTH1;
double tCS;

//voltage divider resistance (TH3 e R18) and "hot site" temperature
const double R18 = 10000.0;
double rTH2;
```



```

double tHS;

//sensor sampling cicle (A1/A3)
const int nSamples = 5;

//parameters for resistance calculation
double vTH1 = 0;
double vTH2 = 0;
double vcc = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //PORTB configuration
  for (int i = 8; i < 12; ++i) {
    pinMode(i, OUTPUT);
  } PORTB = 0x00;

  //PID initialization
  Input = tCS - 273.15;
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
}

void loop() {
  //initial time register for loop delay use
  millisTempoI = millis();

  //sensor sampling (A1/A3)
  int numTH1 = 0;
  int numTH2 = 0;
  int sumTH1 = 0;
  int sumTH2 = 0;
  for (int i = 0; i < nSamples; ++i) {
    sumTH1 += analogRead(pinTH1);
    sumTH2 += analogRead(pinTH2);
    delay(10);
  }
  numTH1 = sumTH1 / nSamples;
  numTH2 = sumTH2 / nSamples;

  //reference parameter for resistance value (Divisor Resist)
  vcc = (2 * analogRead(pinDivres)) * (5.0 / 1024.0);

  //resistance value (TH1)
  vTH1 = numTH1 * (vcc / 1024.0);
  rTH1 = (vcc * R2) / vTH1 - R2; //(QUADROS, 2019)

  //resistance value (TH2)
  vTH2 = numTH2 * (vcc / 1024.0);

```

```

rTH2 = (vcc * R18) / vTH2 - R18;

//Peltier Cold Side (TH1) temperature calculation (ATCS ON)
tCS = (log(rTH1) - 23.3636)/(-0.047531); //MATLAB linearization of -5C - 25C
=> 268,15K - 298,15K
//Log(R) = -0.047531 * T + 23.3636

//Image Sensor (TH1) temperature calculation (ATCS OFF)
tSENS = (log(rTH1) - 22.2816)/(-0.043837); //MATLAB linearization of 20C -
30C => 293,15K - 300,15k
//Log(R) = -0.043837 * T + 22.2816

//Peltier Hot Side (TH2) temperature calculation (ATCS ON)
tHS = (log(rTH2) - 21.4064)/(-0.040944); //MATLAB linearization of 25C - 50C
=> 298,15K - 323,15K
//Log(R) = -0.040944 * T + 21.4064
/*
The A0, A2 and A3 input signals are used for thermistor resistance value
calculation.
As the temperature decreases (NTC Thermistor), its resistance value goes
greater,
reducing the signal obtained in A1 and, as consequence, on the Digital Analog
Converter.
*/

if (ATCS == 0){
    //serial monitor output
    Serial.println("\n\n\n(ATCS=OFF) Sensor Temp.");
    Serial.println(tSENS - 273.15);
}

if (ATCS == 1) {
    //PID control signal
    Input = tCS - 273.15;
    myPID.Compute();

    //0~255 PID_Output -> 0~15 DAC_Input(4 bits)
    PORTB = map(Output, 0, 255, 0, 15);

    /*
    //serial monitor output
    Serial.println("\n\n\n(ATCS=ON) Setpoint Temp.");
    Serial.println(Setpoint);
    Serial.println("\n\n\n(ATCS=ON) Cold Side Temp.");
    Serial.println(tCS - 273.15);
    Serial.println("\n\n\n(ATCS=ON) Hot Side Temp.");
    Serial.println(tHS - 273.15);
    */
}

```

```

        //serial plotter output
        Serial.print(tCS - 273.1);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(tHS - 273.15);
        Serial.print(" ");
        Serial.println(Setpoint);
        Serial.println();
    }

    //final time register for loop delay use
    millisTempoF = millis();

    //1000ms loop delay
    delay (1000 - (millisTempoF - millisTempoI));
}

```

APÊNDICE B - CÓDIGO PARA EXIBIÇÃO DE IMAGEM E HISTOGRAMA

Nesta parte, apresenta-se as funções utilizadas para exibição das imagens obtidas pelo sistema e cálculo de seus histogramas no MATLAB.

Bloco de código 2: Função para exibição de imagem

```
Unset
%%function imgrange = imgshow(img, brgfactor = 1, brgbias = 0)
% Exibe imagem gerada pelo SEA
% Por Marcio A. A. Fialho - 05/set/2022

function imgrange = imgshow(img, brgfactor, brgbias)
if nargin < 3
    brgbias = 0;
end
if nargin < 2
    brgfactor = 1;
end

figure;
imgt = img';
imgrange = minmax(imgt);
a = imgrange(1);
b = imgrange(2);

% Correção coloração da imagem gerada para menor |b-a|
% Por Henrique P. Duarte - 24/jun/2023
fprintf('Valor mínimo (a): %f\n', imgrange(1));
fprintf('Valor máximo (b): %f\n', imgrange(2));
if b < 1023
    aux = 1023 - b;
    b = imgrange(2) + aux;
    fprintf('Novo valor máximo (b): %f\n', b);
end
% Fim da adição

black = a - brgbias;
white = black + (b-a)/brgfactor;

imshow(imgt, [black white]);

fprintf('imgrange = [%f %f]   disp_range = [%f %f]\n', ...
    a, b, black, white);

end
```

Bloco de código 3: Função para cálculo de histogramas em escala logarítmica

```
Unset
%%function [n, xout] = histlogimg (data, nbins)
% Gera histograma de imagens com eixo vertical logaritmico
% Por Marcio A. A. Fialho - 05/set/2022

function [n, xout] = histlogimg (data, nbins)

% Baseado na resposta de Walter Roberson no post :
%
https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/13005-histogram-y-axis-to-logarithmic-scale
% acessado em 01/09/2022

figure;
minval = 0.1 + eps;
[n, xout] = hist(rr(data), nbins);
bar(xout, max(n, minval), 'barwidth', 1, 'basevalue', minval);
set(gca, 'YScale', 'log');
grid on;

% Correção definição dos limites do eixo x padrão
% Por Henrique P. Duarte - 11/ago/2023
xlim([-5 420]);
% Fim da adição

end
```

APÊNDICE C - DIAGRAMA DE SINAIS DO CIRCUITO IMPLEMENTADO NA CPLD

Neste apêndice, são trazidas grande parte das modificações realizadas (destacadas em caneta no diagrama) no circuito carregado na CPLD para obtenção das baterias de teste. O diagrama apresentado na próxima página foi obtido com base nos arquivos .vhf gerados pela ferramenta de síntese.

