



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 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

2022



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 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

2022

RESUMO

Este trabalho tem como objetivos a investigação de como a resposta eletro óptica de um sensor de imagem com aplicações espaciais varia em função da sua temperatura de operação e de suas várias tensões de polarização, a obtenção de um melhor entendimento de como sensores de imagem baseados em silício se comportam e o desenvolvimento de um sistema de controle térmico ativo para sua caracterização. Assim, pretende-se otimizar o desempenho radiométrico e reduzir o consumo elétrico de equipamentos que empregam esse sensores de imagem, entre os quais um sensor de estrelas em desenvolvimento no INPE. A partir da revisão bibliográfica realizada sobre Sensores de Pixel Ativo (3T-APS CMOS), observou-se a existência de alguns tipos de ruídos de origem térmica, sendo de maior destaque o ruído associado à corrente de escuro (*dark current*), apresentando uma dependência exponencial com a temperatura. Desse modo, para estudo do comportamento do sensor de imagem STAR-1000 em função da temperatura, projetou-se um sistema para controle ativo da temperatura do sensor para instalação em seu kit de desenvolvimento. Este kit de desenvolvimento vai permitir determinar as condições ótimas (temperatura e tensões de polarização) de operação do STAR-1000, o que possibilitará redução de custos e ganhos na qualidade das imagens obtidas por este. Quanto à montagem do projeto, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso a partir de modelo já testado e usinou-se o bloco térmico em alumínio para contato direto com o sensor APS. Implementou-se também um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) no código do Arduino, responsável pela resposta enviada ao módulo Peltier. O cálculo da resposta é feito a partir de medições de temperatura de um dos termistores inseridos no mesmo bloco térmico do sensor. A relação entre temperatura e resistência dos termistores foi obtida com base na linearização de dados do termistor MF51E103E3950 (Cantherm), fornecidos pelo fabricante. Com estes resultados pode-se prototipar o circuito para controle térmico ativo do sensor de imagem STAR-1000 para instalação no kit de desenvolvimento. A fim de dar continuidade a este projeto de Iniciação Científica estão programadas as atividades: Fabricação final do circuito de controle térmico ativo no INPE; Implementação de código melhorado envolvendo termistor de monitoramento do lado quente da pastilha termoelétrica; Análise e determinação da temperatura ótima de operação do sensor, levando-se em conta o custo de um sistema de refrigeração e os ganhos na qualidade das imagens; Investigação experimental de como a resposta eletro óptica de um sensor de imagem com aplicações espaciais varia em função da sua temperatura de operação e de suas várias tensões de polarização.

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

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - <i>Photodiode Operation</i>	10
Figura 2 - Arquitetura de Pixel CMOS APS-3T.....	10
Figura 3 - Solução Proposta.....	12
Figura 4 - Esquemático do Circuito Proposto.....	13
Figura 5 - Efeito dos Parâmetros de um Controlador PID.....	15
Figura 6 - Simulação do Circuito em Software Autodesk Tinkercad.....	16
Figura 7 - Teste Iniciais em <i>Protoboard</i>	16
Figura 8 - Placa de Circuito Impresso Desenvolvida.....	17
Figura 9 - Bloco Térmico e Detalhes da Acoplagem dos Termistores.....	17
Figura 10 - Teste de Integração do Kit de Desenvolvimento com o Bloco Térmico.....	18
Figura 11 - Sistema de Dissipação Térmica.....	19
Figura 12 - Testes de Funcionamento do Sistema de Dissipação.....	19

LISTA DE GRÁFICOS

	<u>Pág.</u>
Gráfico 1 - <i>Dark Current</i> x <i>Temperature</i>	11
Gráfico 2 - $T \times \ln(R/1\Omega)$ para 268,15K a 298,15K.....	14
Gráfico 3 - $T \times \ln(R/1\Omega)$ para 298,15K a 323,15K.....	14
Gráfico 4 - Curva de Resposta para <i>Setpoint</i> de 15°C.....	20
Gráfico 5 - Curva de Resposta para Variação de <i>Setpoint</i> (15 para 10°C).....	20

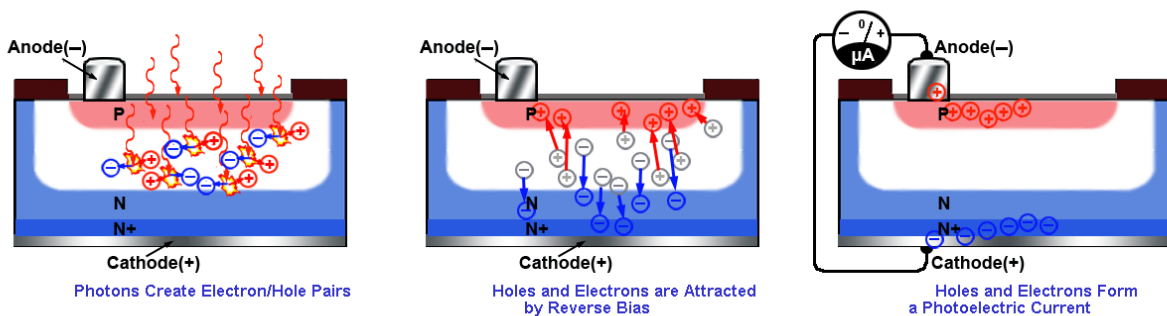
SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
3 CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

1 Introdução

Os sensores de imagem são dispositivos semicondutores que operam com tensões e correntes de baixa intensidade e funcionam a partir da absorção de fótons. Estas partículas incidem em suas matrizes de elementos fotossensíveis, gerando pares elétron-lacuna que são aprisionados nos fotodiodos dos pixels para uma posterior conversão da carga em sinal elétrico.

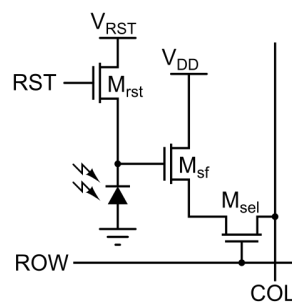
Figura 1 - Photodiode Operation



Fonte: COATES (2020)

Todavia, a presença de ruídos nestes dispositivos representa uma grande problemática no que tange à deterioração das imagens. Durante a realização do trabalho anterior, notou-se que a agitação térmica de suas partículas origina dois fenômenos nos sensores APS: o ruído térmico e a corrente de escuro. O ruído térmico é proveniente da movimentação aleatória dos portadores de carga ocasionada por esta agitação. No caso do sensor STAR-1000 em análise, a principal contribuição a esse ruído é o ruído de reset nos pixels, durante o acionamento do transistor Mrst.

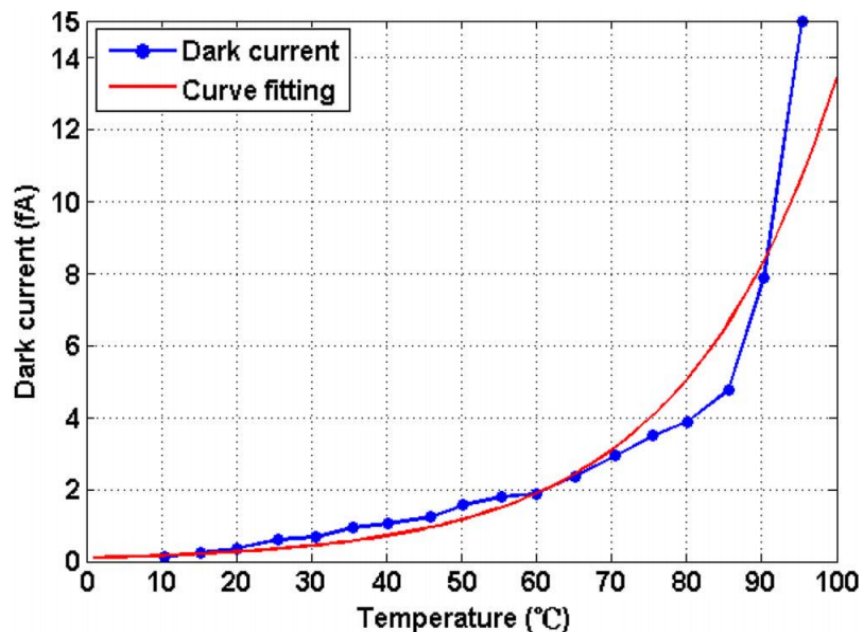
Figura 2 - Arquitetura de Pixel CMOS APS-3T



Fonte: WIKIPEDIA (2008)

Já no que se refere ao segundo fenômeno, além de acarretar uma redução da faixa dinâmica disponível para o sinal fotoelétrico, a corrente de escuro é ocasionada pela possível acumulação no fotodiodo, dos portadores de carga gerados. Este processo ocorre quando um elétron adquire energia suficiente para se deslocar da banda de valência para a de condução. A relação existente entre corrente de escuro e temperatura é aproximadamente exponencial, e dobra seu valor a cada acréscimo de aproximadamente 10°C (FIALHO, 2007).

Gráfico 1 - *Dark Current x Temperature*



Fonte: LIN et al. (2010)

Desse modo, para se estudar o comportamento do sensor STAR-1000 em função da temperatura e buscar a eliminação da componente determinística (valor médio) da corrente de escuro por meio da caracterização do sensor e conhecimento preciso de sua temperatura, desenvolveu-se neste projeto um sistema para controle ativo da temperatura do sensor, representado pelo diagrama presente na Figura 3, para instalação em seu kit de caracterização no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Figura 3 - Solução Proposta

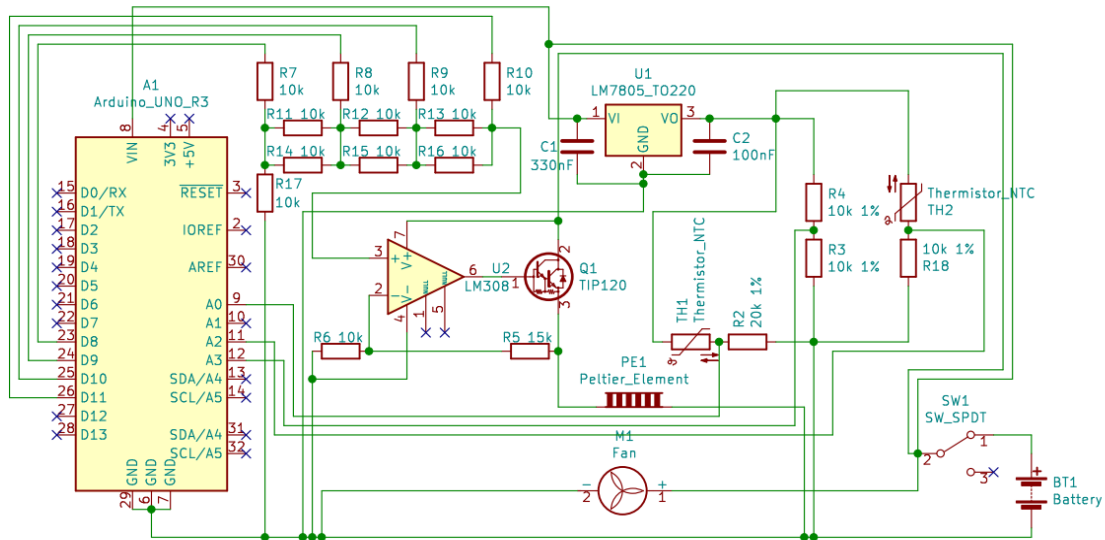


Fonte: Adaptado de PERRENOUD (2021)

2 Desenvolvimento

A solução proposta para realização do sistema de controle de temperatura é dada pelo seguinte esquemático:

Figura 4 - Esquemático do Circuito Proposto



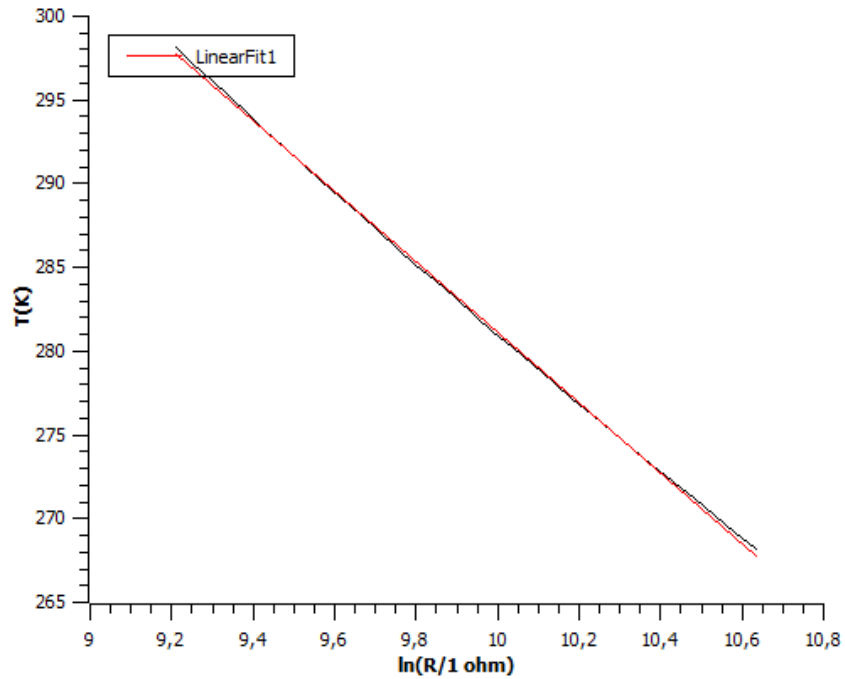
Fonte: Elaborado pelo autor

Seu funcionamento ocorre a partir da amostragem de temperatura realizada por termistores TH1 e TH2 inseridos em um bloco térmico de alumínio em contato direto com o sensor STAR-1000, e da realização do cálculo indireto da resistência dos termistores NTC. Os valores de suas resistências são alcançados a partir das tensões lidas nos divisores resistivos formados entre estes elementos e suas respectivas resistências em série. Com base nestas tensões, na tensão lida entre R4 e R3 (necessária para compensar possíveis variações no conversor A/D do Arduino ou na saída de U1) e no conhecimento do valor de R2, R18, R3 e R4, o software implementado no Arduino consegue chegar aos valores das resistências apresentados por cada termistor. Em posse desses valores, aplicam-se estes em duas Leis de Controle, apontadas no decorrer desta seção, sendo uma para o resistor do lado quente e a outra para o do lado frio da pastilha. Assim se obtêm e registram-se suas respectivas temperaturas, para uma posterior utilização pelo controlador PID implementado. Apenas a temperatura do lado frio é considerada pelo controlador (*input*), sendo a do lado quente registrada apenas para motivos de monitoramento até o presente momento.

Para obtenção dessas leis, foram analisados os dados de temperatura de 268,15K a 323,15K (sendo subdivididos de 268,15K-298,15K e 298,15K-323,15K) e resistência (R)

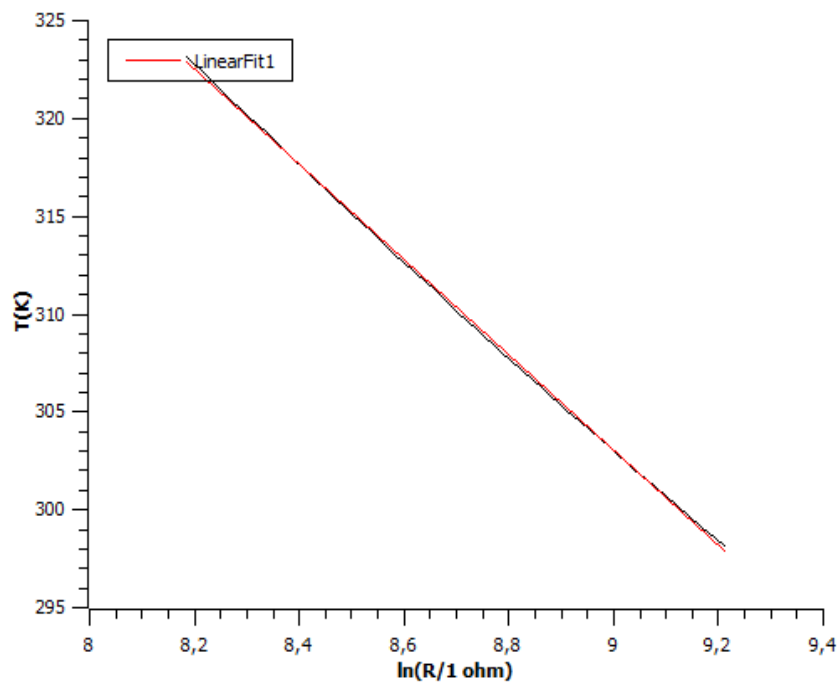
do termistor MF51E103E3950 (Cantherm) fornecidos pelo fabricante. Após a plotagem do gráfico relacionando a temperatura com a resistência, por meio do método de troca de variáveis, fez a substituição de R por $\ln(R/1\Omega)$ em relação ao eixo cartesiano Ox, assim:

Gráfico 2 - T x $\ln(R/1\Omega)$ para 268,15K a 298,15K



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 - T x $\ln(R/1\Omega)$ para 298,15K a 323,15K



Fonte: Elaborado pelo autor

Linearizando a curva gerada, chega-se às seguintes equações para uma maior precisão nas medidas dos lados frio (T_{cs}) e quente (T_{hs}):

$$T_{cs} = [- 21,0299 \cdot \ln(R/1\Omega)] + 491,458$$

$$T_{hs} = [- 21,5913 \cdot \ln(R/1\Omega)] + 496,954$$

Com relação às configurações do controlador PID implementado, define-se este para ser *Proportional on Measurement*, fazendo com que a saída apresente um comportamento mais suave perante uma mudança no *setpoint* (temperatura alvo). Seus parâmetros foram definidos para $K_p = 20$ (reduzir o tempo de resposta e o erro de estado estacionário), $K_i = 50$ (eliminar completamente o erro de estado estacionário) e $K_d = 10$ (aumentar a agilidade e a estabilidade do sistema). Estes valores foram selecionados por tentativa e erro, buscando uma resposta de saída rápida e estável.

Figura 5 - Efeito dos Parâmetros de um Controlador PID

RESPOSTA	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	Erro de estado estacionário (Steady-State Error)
K_p	Reduz	Aumenta	Pouco efeito	Reduz
K_i	Reduz	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Pouco efeito	Reduz	Reduz	Não muda

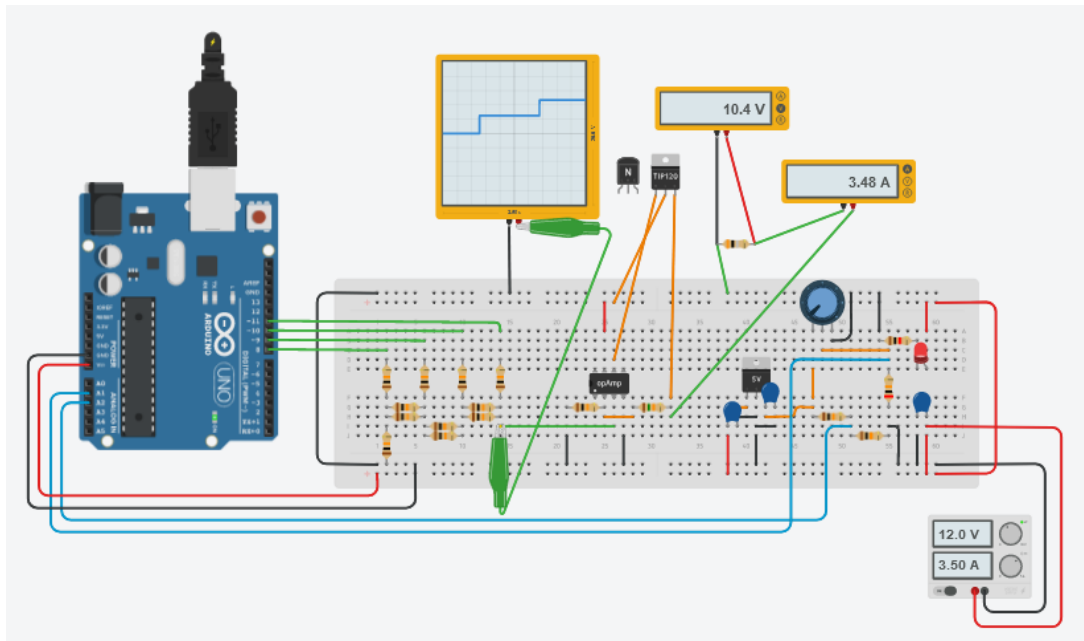
Fonte: MUNIZ (2017)

Após esta etapa, o sinal enviado pelo controlador (*output*) passa por um conversor digital-analógico simples de rede R-2R, com precisão de 4 bits, ligado a um amplificador operacional de ganho 2,5 ($gain = \frac{R5+R6}{R6}$), até chegar ao módulo Peltier TE-83-1.0-1.5. O controle do DAC se dá por um código de manipulação direta das portas (PORTB: pinos D8 a D13) do microcontrolador, proporcionando uma otimização de sua memória e maior velocidade de resposta. Assim se obtém uma resposta proporcional e amplificada enviada à pastilha termoeletrica Peltier.

Realizados os testes do circuito nos softwares Autodesk Tinkercad e LTspice XVII, como mostrado na Figura 6, passou-se para a prototipagem do sistema, inicialmente realizada em *protoboard* e seguida pelo desenvolvimento da placa de circuito impresso,

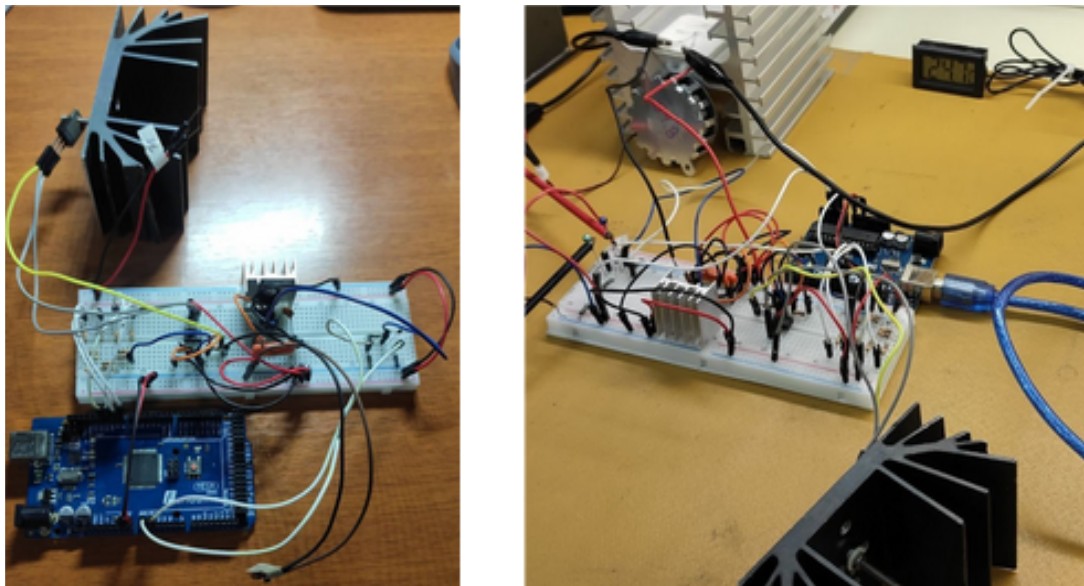
sendo acrescentados um capacitor de desacoplamento e um led para apontar o estado *on* do circuito.

Figura 6 - Simulação do Circuito em Software Autodesk Tinkercad



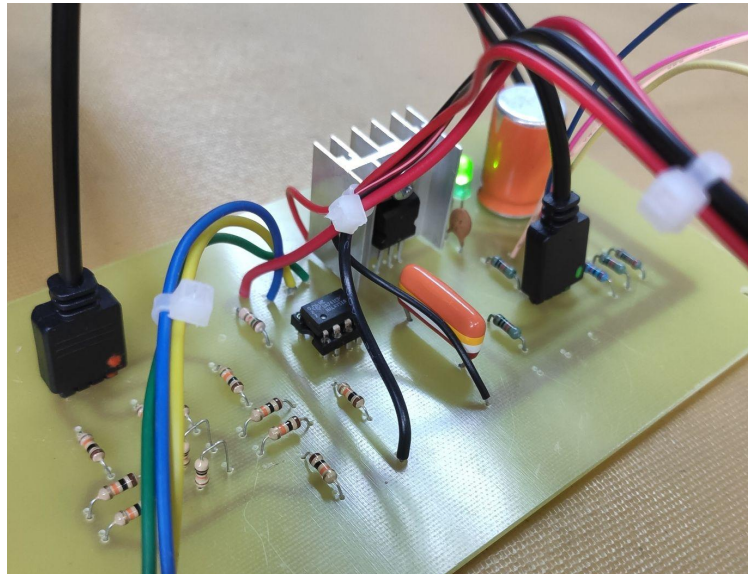
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 - Teste Iniciais em *Protoboard*



Fonte: Elaborado pelo autor

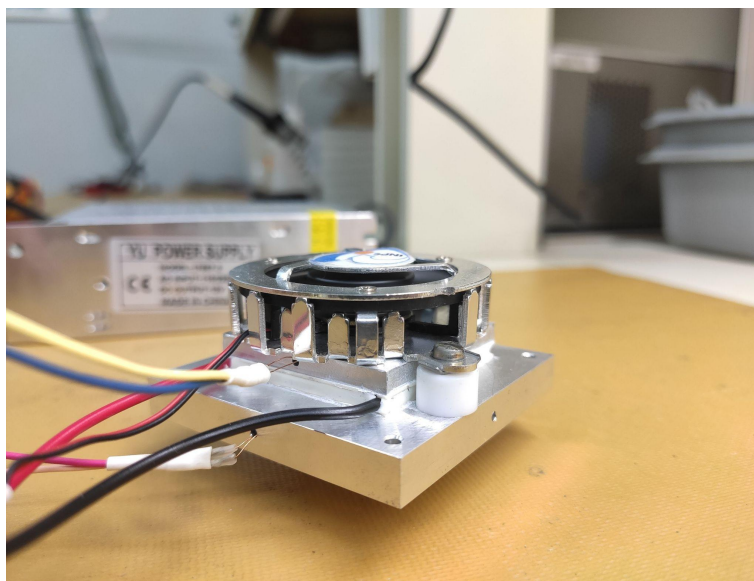
Figura 8 - Placa de Circuito Impresso Desenvolvida



Fonte: Elaborado pelo autor

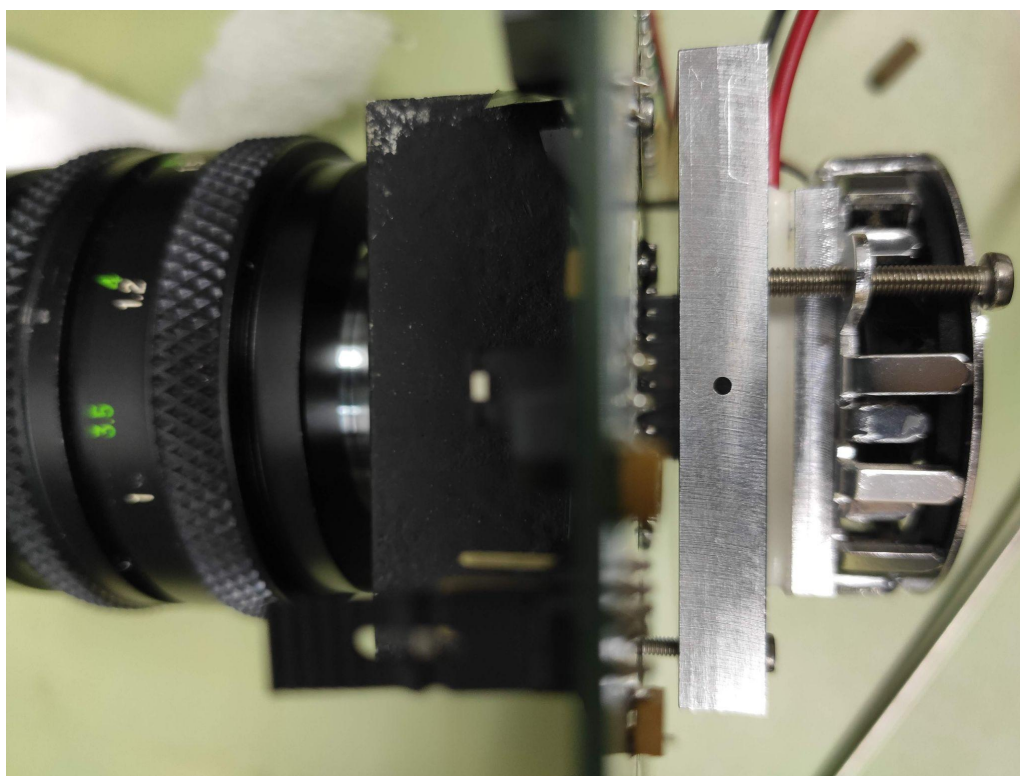
Uma importante característica sobre o kit de caracterização do sensor STAR-1000 para montagem da planta do sistema está presente na base do imageador. Trata-se de um furo de aproximadamente 2,5cm x 2,5cm na placa de circuito impresso do kit de desenvolvimento, permitindo o contato direto entre o sensor e o bloco metálico ligado ao módulo Peltier para controle de temperatura durante uma caracterização eletro-óptica do imageador. Assim, foi usinado o bloco de alumínio a partir dessas especificações para um melhor contato térmico, e perfurados os locais de alojamento dos termistores.

Figura 9 - Bloco Térmico e Detalhes da Acoplagem dos Termistores



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 - Teste de Integração do Kit de Desenvolvimento com o Bloco Térmico



Fonte: Elaborado pelo autor

3 Conclusões

Assim, mostra-se essencial o desenvolvimento e integração do sistema para controle ativo da temperatura do imageador para o kit de desenvolvimento a fim de eliminar a componente determinística da corrente de escuro. Os dados também sugerem que esta seja uma alternativa interessante quanto a custos e ganhos na qualidade das imagens obtidas quando comparada à outras alternativas de refrigeração.

No decurso das realizações dos testes experimentais, notou-se a necessidade de uma modificação projetual quanto ao sistema de dissipação de calor da pastilha Peltier. Buscando uma maior eficiência de refrigeração e diminuição do volume ocupado pelo sistema, localizado abaixo do kit, trocou-se a ventoinha que vinha sendo utilizada por um sistema de refrigeração à água.

Figura 11 - Sistema de Dissipação Térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

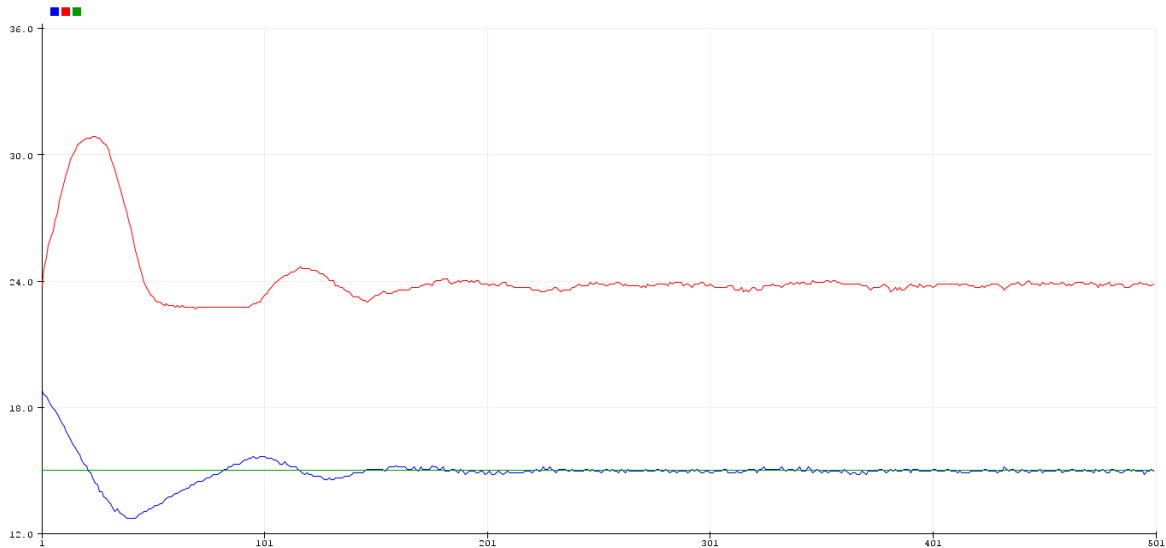
Figura 12 - Testes de Funcionamento do Sistema de Dissipação



Fonte: Elaborado pelo autor

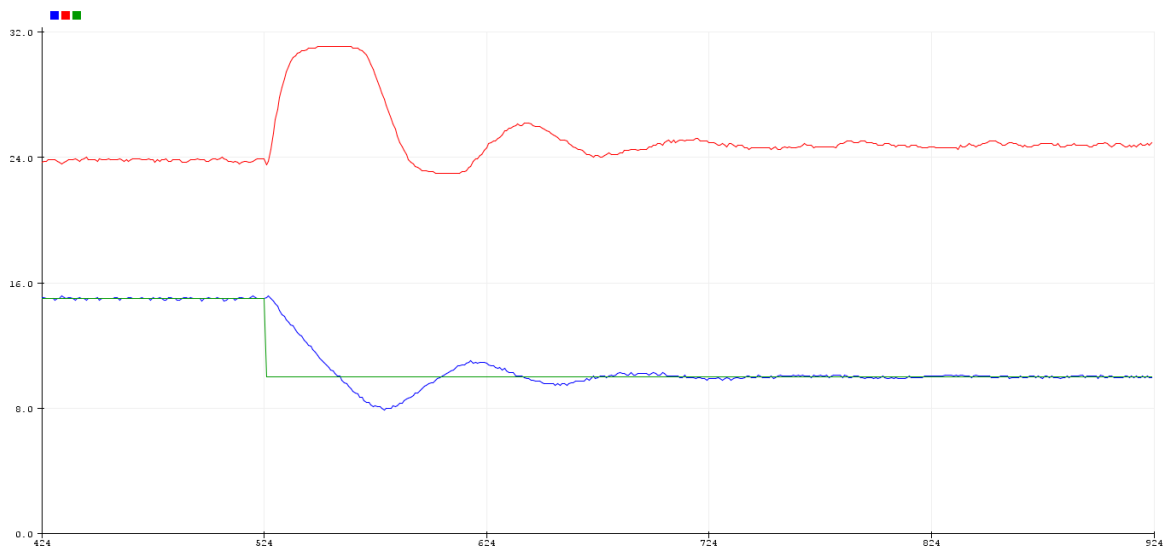
Os resultados obtidos pelo sistema de refrigeração proposto neste projeto seguem positivos. Os gráficos obtidos para a temperatura do sensor para diferentes *setpoints* são (considerando a curva verde como o valor do *setpoint*, a curva vermelha, o valor da temperatura do lado quente da pastilha, e a azul como a temperatura do lado frio):

Gráfico 4 - Curva de Resposta para *setpoint* de 15°C



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 - Curva de Resposta para Variação de *setpoint* (15 para 10°C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Referências Bibliográficas

COHEN, M.; DAVID, J-P. Radiation-induced dark current in CMOS active pixel sensors. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.47, No.6, 2000.

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.

FOSSUM, E. Active pixel sensors: Are CCD's dinosaurs? Proc. SPIE 1900, Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors III, 1993.

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.

SALOMON, P.; FOSSUM, E.; CLARK, C.; DENNISON, E. Active Pixel Sensors for Autonomous Spacecraft Applications. Proc. SPIE 2810, Space Sciencecraft Control and Tracking in the New Millennium, 1996.

SMITH, C. Principles and practice of automatic process control. John Wiley & Sons, Ed. 2, 1998.

THEUWISSEN, A. CMOS image sensors: State-of-the-art and future perspectives. 33rd European Solid State Circuits Conference, 2007.

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.

```
1  /*
2  CONTROLE ATIVO DE TEMPERATURA (PID) - INPE
3
4  PERRENOUD, H. (2022)
5  Orientador: Márcio A. A. Fialho
6  */
7
8  //configuracao PID
9  #include <PID_v1.h>//(BEAUREGARD, 2011)
10 double Setpoint, Input, Output;
11 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, 20, 50, 10, P_ON_M, REVERSE);
12
13 //controle loopdelay
14 unsigned long millisTempoI=millis();
15 unsigned long millisTempoF=millis();
16
17 //conexoes de monitoramento
18 const int pinTH1=A0, //cold side
19         pinTH2=A2, //hot side
20         pinDivres=A3; //parametro
21
22 //resistencia do divisor resistivo (TH2 e R2) e temperatura "cold side"
23 const double R2=20000.0;
24 double rTH1;
25 double tCS;
26
27 //resistencia do divisor resistivo (TH3 e R18) e temperatura "hot side"
28 const double R18=10000.0;
29 double rTH2;
30 double tHS;
31
32 //ciclo de amostragem sensor (A1/A3)
33 const int nSamples=5;
34
35 void setup(){
36     Serial.begin(9600);
37     for(int i=8; i<12; ++i){
38         pinMode(i, OUTPUT);
39     }PORTB=0x00;
40
41     //inicilizacao PID
42     Input=tCS-273.15;
43     Setpoint=12;
44     myPID.SetMode(AUTOMATIC);
45 }
46
47 void loop(){
48     //registrador tempo inicial para loop delay
49     millisTempoI=millis();
50
51     //amostragem sensor (A1/A3)
52     int numTH1=0;
53     int numTH2=0;
54
55     int sumTH1=0;
56     int sumTH2=0;
57     for (int i=0; i<nSamples; ++i){
58         sumTH1+=analogRead(pinTH1);
59         sumTH2+=analogRead(pinTH2);
60         delay (10);
61     }
62     numTH1=sumTH1/nSamples;
63     numTH2=sumTH2/nSamples;
64
65     //parametro referencial de calculo resistencia (Divisor Resist)
66     double vcc=(2*analogRead(pinDivres))* (5.0/1024.0);
67
68     //calculo resistencia (TH1)
69     double vTH1=numTH1*(vcc/1024.0);
70     rTH1=(vcc*R2)/vTH1-R2;//(QUADROS, 2019)
71
72     //calculo resistencia (TH2)
73     double vTH2=numTH2*(vcc/1024.0);
74     rTH2=(vcc*R18)/vTH2-R18;
75
76     //calculo temperatura Pelt Cold Side (TH1)
77     tCS=(-21.0299*log(rTH1))+491.458;//linearização de -5C - 25C => 268,15K - 298,15K
78
79     //calculo temperatura Pelt Hot Side (TH2)
80     tHS=(-21.5913*log(rTH2))+496.954;//linearização de 25C - 50C => 298,15K - 323,15K
81
82     /*
83     Os sinais recebidos pelas portas A0, A2 e A3 são utilizados para cálculo da
84     resistência dos Termistores. Conforme a temperatura diminui (Termistor NTC)
```

```

85 maior será sua resistência, provocando uma diminuição no sinal recebido em A1 e,
86 consequentemente, no DAC.
87 */
88
89 //resposta controle PID
90 Input=tCS-273.15;
91 myPID.Compute();
92
93 //transformação escala 0~255 PID_Output -> 0~15 DAC_Input(4 bits)
94 PORTB=map(Output,0,255,0,15);
95
96 //plotter serial temperatura peltier
97 Serial.print(tCS-273.15);
98 Serial.print(" ");
99 Serial.print(tHS-273.15);
100 Serial.print(" ");
101 Serial.println(Setpoint);
102 Serial.println();
103
104 /*
105 //monitor serial de diagnostico
106 Serial.println("\nHot Side Temp.");
107 Serial.println(tHS-273.15);
108 Serial.println("\nCold Side Temp.");
109 Serial.println(tCS-273.15);
110 Serial.println("\nPID control:");
111 Serial.println(Output);
112 Serial.println("\nDAC response:");
113 Serial.println(PORTB);
114 Serial.println("\n");
115 */
116
117 //registrador tempo final para loop delay
118 millisTempoF=millis();
119
120 //loop delay de 1000ms
121 delay (1000-(millisTempoF-millisTempoI));
122 }

```