



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

## **APLICAÇÃO DE CONTROLE “FEEDFORWARD” NO RADIÔMETRO DE MONITORAMENTO DE IRRADIÂNDIA SOLAR**

Maycon André Mateus de Santana

Relatório de iniciação científica,  
orientada pelo Dr. Ricardo Toshiyuki  
Irita e pelo Dr Waldeir Amaral Vilela,  
referente ao período de 1 abril a 31 de  
agosto de 2021.

INPE  
São José dos Campos  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento ao INPE pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Agradecimento ao CNPq pela concessão de bolsa.

## RESUMO

Este trabalho, iniciado em abril de 2021, tem como objetivo aprimorar o sistema de controle de temperatura do instrumento de medição de irradiância solar, radiômetro absoluto, em desenvolvimento neste Instituto. Esse radiômetro se baseia no monitoramento de radiação por substituição elétrica, onde um sistema de controle é utilizado para aquecer e manter a temperatura do sensor constante tanto na ausência como na incidência de radiação e, pelo monitoramento da corrente nestas duas situações, calcula a variação da potência elétrica que corresponde à radiação incidente. Sabe-se que o sistema de controle possui um papel crucial na resposta, mudando drasticamente a precisão do instrumento de acordo com o dimensionamento dele. O método de controle utilizado atualmente no instrumento é o método feedback por PID e o sistema é constituído pelo microcontrolador *ATmega* que monitora a temperatura do sensor e a corrente do fio aquecedor e, ainda, atua através do sinal PWM sobre um transistor para alimentar o fio. O método de controle apresentou precisão satisfatória, porém não suficientemente próxima aos instrumentos em funcionamento no exterior (100ppm). Desta forma, este trabalho consiste em adicionar/aplicar modelo alternativo de controle para melhorar a precisão, com o método *feedforward*. Este método de controle de temperatura é baseado em usar um sinal característico, medido previamente, para adiantar um sinal de controle que diminua o tempo de resposta do instrumento à variação de temperatura do sensor devido à incidência de radiação, assim, diminuindo o tempo de estabilização, oscilações e conseqüentemente maior precisão ao medir a irradiância. Até o presente momento foram realizadas buscas de assuntos relacionados à bibliografia na literatura e o início do estudo sobre elas, tal como o radiômetro em desenvolvimento no INPE e da teoria de controle. Foram realizadas montagens e testes de sistemas de controle em bancada para melhor compreensão e solução nos modos de controle. Como uma das próximas etapas está prevista a elaboração de um projeto básico do controlador *feedforward* em bancada.

Palavras-chave: Radiômetro absoluto. Método de substituição elétrica. Sistema de controle de temperatura. Retroalimentação PID. Controle antecipatório (*feedforward*).

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 Variação da TSI no último século.....	11
Figura 1.2 Conceito básico do radiômetro absoluto. (Irita et al., 2019). ....	12
Figura 1.3 Montagem para aquisição de sinais do radiômetro.....	12
Figura 1.4 Bancada de testes radiômetro absoluto. ....	13
Figura 1.5 Processo realizado no algoritmo iterativo.....	15
Figura 1.6 Processo realizado no algoritmo não-iterativo. ....	16
Figura 1.7 Processo realizado no algoritmo paralelo. ....	16
Figura 1.8 Método de Ziegler-Nichols .....	18
Figura 2.1 Arduino Uno R3.....	21
Figura 2.2 Thermistor NTC 10K $\Omega$ .....	22
Figura 3.1 Circuito calibração sensor NTC.....	24
Figura 3.2 Fluxograma programa curva do thermistor. ....	24
Figura 3.3 Fluxograma programa constantes PID.....	25
Figura 3.4 Circuito controle PID. ....	26
Figura 3.5 Fluxograma programa constantes PID.....	27
Figura 3.6 Circuito de controle cilindro radiômetro.....	28
Figura 4.1 Curva de resposta thermistor NTC.....	29
Figura 4.2 Resposta Degrau. ....	30
Figura 4.3 Obtenção das constantes.....	30
Figura 4.4 Resposta Degrau .....	31
Figura 4.5 Curva de resposta.....	32
Figura 4.6 Curva de resposta, controle atual .....	33
Figura 4.7 Resposta Degrau sensor NTC radiômetro .....	33
Figura 4.8 Cálculo das constantes, radiômetro cilindro.....	34
Figura 4.9 Bancada de testes para controle desenvolvido.....	35
Figura 4.10 Resposta degrau para o cilindro radiômetro .....	35

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GDF	Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos
TSI	Irradiância Solar Total (Total Solar Irradiance)
ADC	Conversor Analógico Digital (Analogic Digital Converter)
PWM	Modulação por largura de Pulso (Pulse Width Modulation)
PID	Sistema de controle Proporcional-Integrativo-Derivativo
NTC	Negative Temperature Coefficient

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos abordados no relatório .....	9
2 Estudo teórico.....	10
2.1 Estudos preliminares .....	10
2.2 Importância da medição da irradiação solar .....	10
2.3 Radiômetro absoluto por substituição elétrica. ....	11
2.4 Protótipo radiômetro absoluto.....	12
2.5 Teoria de controle.....	14
2.5.1 Método de controle por <i>feedback</i> PID.....	14
2.5.2 Algoritmo iterativo.....	15
2.5.3 Algoritmo não-iterativo .....	15
2.5.4 Algoritmo paralelo .....	16
2.5.5 Definição dos parâmetros .....	17
2.5.6 Método de obtenção das constantes.....	18
2.6 Conclusão dos estudos.....	19
3 parte PRÁTICA.....	20
3.1 Componentes principais utilizados .....	20
3.1.1 Microcontrolador ATmega 328P.....	20
3.1.2 Termistores NTC 10k $\Omega$ .....	21
3.1.3 Software de aquisição de dados PLX-DAQ.....	22
3.1.4 Bibliotecas adicionais.....	22
3.2 Montagens em bancada para obtenção das medidas de interesse .....	23
3.2.1 Curva de resposta para calibração do elemento sensor (NTC 10k $\Omega$ Thermistor).....	23
3.2.2 Obtenção das constantes do PID.....	25
3.2.3 Controle de temperatura do elemento aquecedor.....	26
3.2.4 Controle de temperatura cilindro. ....	28
4 Resultados obtidos e discussões.....	29

4.1 Curva de resposta thermistor NTC .....	29
4.2 Obtenção das constantes do PID .....	30
4.3 Controle de temperatura do elemento aquecedor .....	31
4.4 Comparação com o sistema de controle atual do radiômetro.....	32
5 CONCLUSÃO .....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

Está em andamento no INPE o desenvolvimento de instrumento de medição de irradiância solar absoluto-TSI. Neste instrumento, a medição da radiação é feita através do método da substituição elétrica, onde a irradiação captada é medida indiretamente através da variação de uma grandeza elétrica, no caso, a corrente elétrica. O corpo do sensor que é mantido a uma temperatura constante (potência constante) através do controle do aquecimento de uma resistência enrolada a ele, sofre uma perturbação da temperatura com a incidência de radiação. A perturbação é corrigida pela realimentação (ou controle) adotada, que por conseguinte, provoca a variação da corrente elétrica que percorre pela resistência para manter a temperatura constante.

Neste contexto, a complexibilidade de implementação depende do nível de precisão desejado no projeto e conseqüentemente no método de controle adotado. Usualmente, inicia-se a escolha de um controlador realimentado (modo “feedback”) com compensador proporcional(P), integrador(I) e derivativo(D).

Porem estes controladores não são suficientes para diminuir o erro inicial do processo de realimentação, principalmente para períodos curtos, como no projeto do radiômetro. Para diminuir este problema, abordar-se-á a implementação de uma realimentação do tipo “feedforward”, onde deve ser inserido características de sinais já conhecidos para melhorar a resposta do sinal onde o sinal da radiação será inserido tanto na entrada do controlador como no sensor mantido a uma temperatura conhecida através de circuito aquecedor.

Neste relatório são abordadas as atividades realizadas, bem como os resultados obtidos no período de abril a agosto de 2021. Onde foram realizadas buscas de assuntos relacionados a bibliografia na literatura e o início do estudo sobre elas, tal como o radiômetro em desenvolvimento no INPE e da teoria de controle. Foram ainda realizadas as montagens e testes de sistemas de controle em bancada para melhor compreensão e solução nos modos de

controle. Nos próximos itens seguem as descrições mais detalhadas das atividades e os respectivos resultados.

### **1.1 Objetivos abordados no relatório**

O relatório aborda a primeira parte do projeto de iniciação que incluem: compreender de forma teórica o radiômetro desenvolvido e prototipado, entendendo suas limitações atuais pelo meio do estudo do radiômetro por substituição e dos métodos de controle utilizados, realizar montagens para pôr em prática os conhecimentos teóricos adquiridos e ao mesmo tempo compreender de forma mais profunda o funcionamento do radiômetro prototipado, propor melhorias e, por fim, verificar a aplicabilidade do método de controle por *feedforward*, em suma, os objetivos são:

- Estudos preliminares do radiômetro por substituição elétrica, método de controle por *feedback* PID, *hardware* utilizado.
- Montagens práticas que simulem o trabalho realizado pelo radiômetro atualmente, para melhor compreensão.
- Aquisição e análise de sinais de controle por *feedback* para início de verificação de aplicabilidade do método de controle por *feedforward*.

## **2 ESTUDO TEÓRICO**

### **2.1 Estudos preliminares**

Aqui é exposto uma parte resumida dos estudos preliminares realizados para melhor compreensão do projeto do radiômetro absoluto, criando assim, uma base teórica sólida para a implementação do controle *feedforward* a ser finalizado no próximo período de iniciação científica.

### **2.2 Importância da medição da irradiação solar**

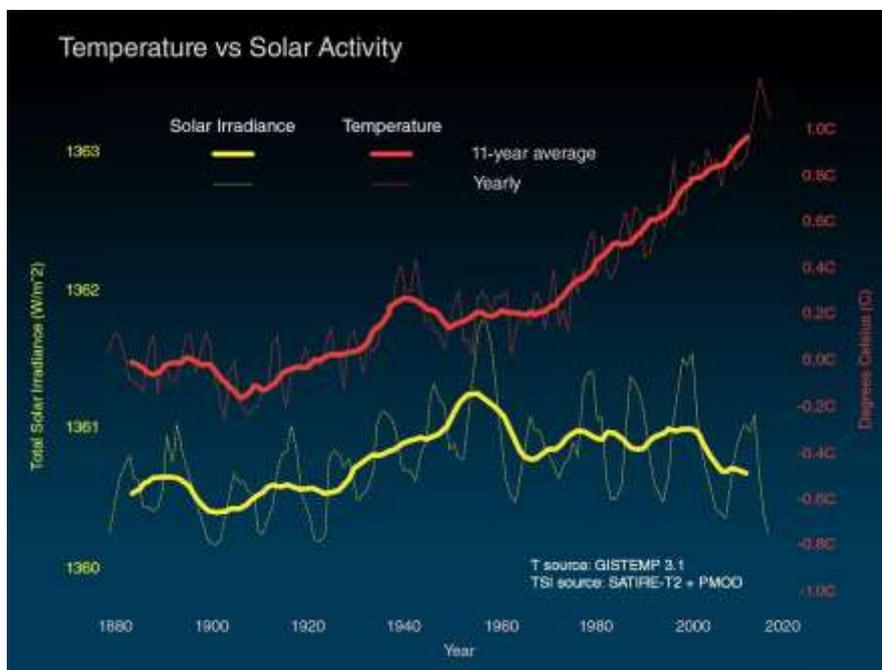
Entender o comportamento do clima terrestre é de fundamental importância, pois permite, não só a realização de previsões meteorológicas como também a compreensão dos fenômenos envolvidos. O clima possui inúmeras variáveis que fazem parte do balanço energético, tanto no âmbito macro como microscópico, mas é a radiação solar que chega à Terra que é a sua principal fonte de energia e, portanto, o principal fator responsável pelo clima terrestre (KOPP, 2014). A Irradiância Solar Total (TSI) é utilizada como variável em vários modelos matemáticos meteorológicos, que permitem simular as mudanças climáticas globais.

A energia provinda do Sol em forma de radiação é expressa pela grandeza TSI (*Total Solar Irradiance*) ou Irradiância Total Solar que corresponde a quantidade de energia presente em todo espectro eletromagnético das ondas solares incidentes por unidade de área. O monitoramento da variação do TSI é importante para áreas de meteorologia, agricultura e aeroespacial de forma geral.

E para usufruir dessa utilidade é necessário que a medição do TSI seja realizada de forma precisa, rápida, e acurada por um instrumento dedicado, para isso o INPE possui um projeto de radiômetro absoluto, radiômetros que medem o TSI, que visa a análise dos fenômenos solares em ambiente de

espaço profundo, na figura 1.1 abaixo é possível observar as variações da TSI no último século.

Figura 1.1 Variação da TSI no último século.



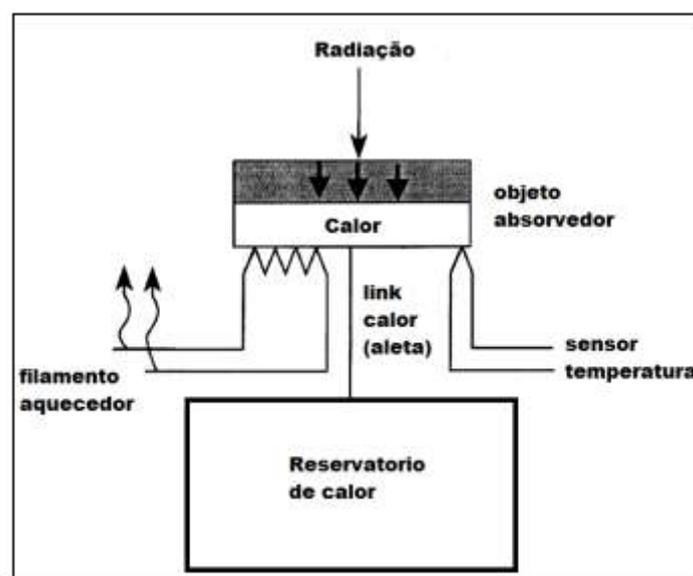
Fonte: <https://www.ecodebate.com.br/2020/02/06/o-sol-esta-causando-o-aquecimento-global-nao/> Acesso em 25/07/2021.

### 2.3 Radiômetro absoluto por substituição elétrica.

Os radiômetros utilizados para a mediação da TSI são chamados de radiômetros absolutos, ele possui este nome devido ao fato de expressar sua grandeza medida por meio de unidades básicas do SI relacionando com fenômenos físicos também expressos por unidades do SI. Outra expressão utilizada para se referir a este tipo de radiômetro é justamente de radiômetro por substituição elétrica, pois relaciona o efeito do aquecimento devido à potência ótica com a quantidade de aquecimento através de uma corrente elétrica (potência elétrica). Essa técnica é usada para medir potência radiante por unidade de área (irradiância) de um feixe incidente em um elemento absorvedor (CARLESSO et al., 2019). Portanto, o conceito básico deste tipo de radiômetro pode ser explicado através da figura 1.2. O elemento sensor é

constituído por objeto absorvedor conectado ao reservatório de calor através de um caminho de calor (*heat link* ou aleta). A medição é feita através da leitura indireta da variação da potência que alimenta o filamento utilizado para manter o corpo do sensor a uma temperatura constante. A incidência de radiação solar no elemento sensor resulta na diminuição da corrente necessária para manter o valor de temperatura (IRITA et al., 2019).

Figura 1.2 Conceito básico do radiômetro absoluto. (Irita et al., 2019).

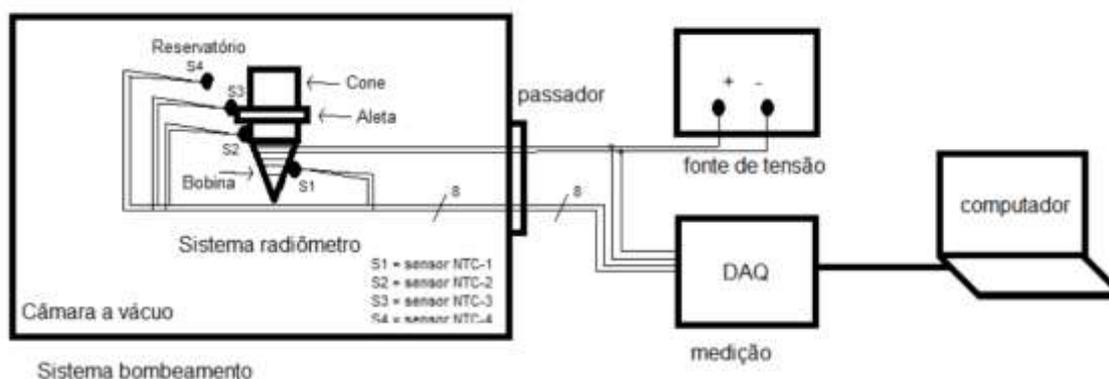


Fonte: Adaptado de (Parr et. al, 2005)

## 2.4 Protótipo radiômetro absoluto

A montagem do radiômetro tem formato demonstrado na figura 1.3, onde a medição ocorre no bloco DAQ (Aquisição de dados) onde os componentes microcontroladores, conversores e *data loggers* estão incluídos.

Figura 1.3 Montagem para aquisição de sinais do radiômetro.



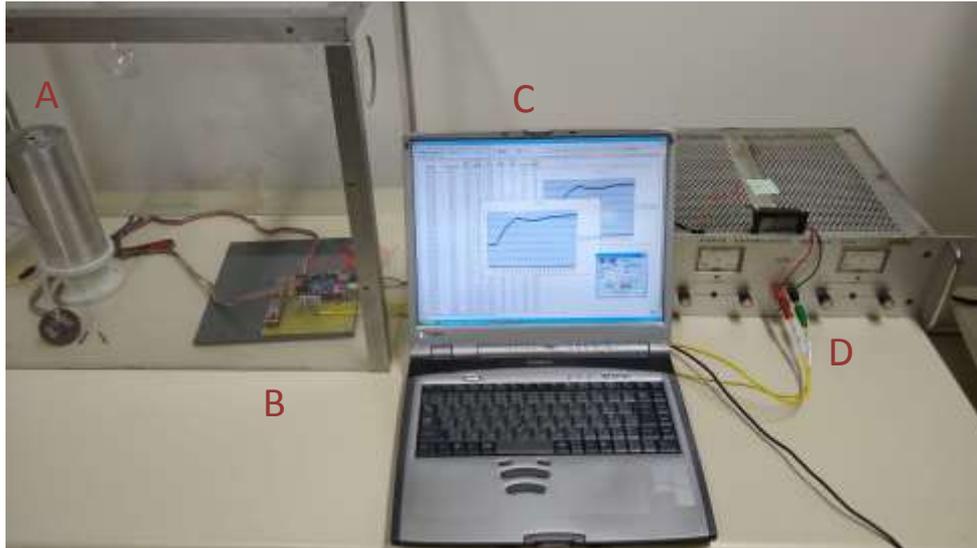
Fonte: Adaptado de Irita et al., 2019

O projeto de radiômetro absoluto do INPE se baseia na medição de irradiância solar por substituição elétrica, e é controlada pelo microcontrolador *ATMega* utilizando controle por *feedback* PID (*Proporcional integral derivative controller*) ou controlador proporcional integral derivativo. No método por substituição elétrica o corpo do sensor é mantido a uma temperatura constante (potência constante) através do controle do aquecimento de uma resistência enrolada a ele, sofre uma perturbação da temperatura com a incidência de radiação. A perturbação é corrigida pela realimentação (ou controle) adotada, que por conseguinte, provoca a variação da corrente elétrica que percorre pela resistência para manter a temperatura constante.

Neste contexto, a complexibilidade de implementação depende do nível de precisão desejado no projeto e conseqüentemente no método de controle adotado.

A figura 1.4 mostra a bancada com o protótipo desenvolvido no trabalho de Lopes, 2020. Nas indicações A, B, C e D da figura 1.4, é possível identificar respectivamente, o radiômetro absoluto, o sistema de controle, o sistema de aquisição de dados (DAQ) e a fonte de tensão que fornece energia para o sistema.

Figura 1.4 Bancada de testes radiômetro absoluto.



Fonte: A autoria própria.

## 2.5 Teoria de controle

### 2.5.1 Método de controle por *feedback* PID.

Como no radiômetro a irradiação é calculada pela variação da corrente necessária para manter o reservatório de calor em um estado de temperatura constante com a incidência de radiação, então é necessário um sistema de controle para manter essa temperatura no *setpoint*, no protótipo criado esse sistema de controle utilizado foi o sistema de controle por *feedback* PID, que calcula o erro como a diferença da variável medida e o *setpoint* desejado. Assim o controlador visa minimizar o erro por meio de alterações a alguma variável manipulável que influencia diretamente no sinal de saída. O algoritmo de controle utilizado envolve três parâmetros constantes e é comumente chamado de controle de três termos: proporcional, integrativo e derivativo, cuja sigla é PID representando cada parâmetro respectivamente, de maneira simplificada P é o parâmetro que se refere ao erro presente, I se refere ao acúmulo dos erros passados e D é uma previsão dos erros futuros baseado na taxa de variação atual, a soma ponderada desses três parâmetros é utilizada para alterar o processo por meio das variáveis mencionadas anteriormente.

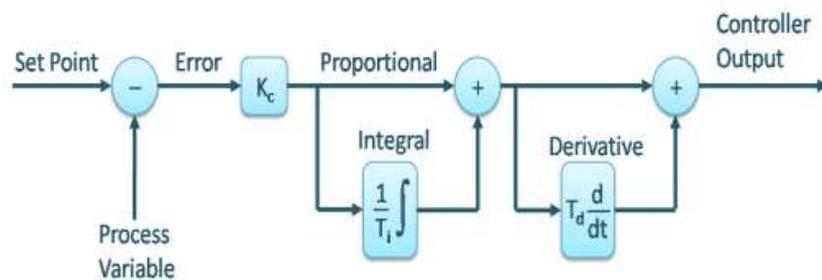
Existem diferentes maneiras de implementar o método de controle PID, em particular 3 configurações são mais utilizadas, a implementação de algoritmo iterativo, algoritmo não iterativo e algoritmo paralelo, cada tipo de algoritmo se comporta de maneira diferente e possuem sua própria área de excelência.

### 2.5.2 Algoritmo iterativo

Nessa implementação do controle PID, a saída é calculada em etapas de forma sequencial, primeiramente o erro é aplicado nos parâmetros proporcionais e integrativos e então o resultado é aplicado ao parâmetro derivativo, a figura 1.5 abaixo demonstra o processo de implementação desse algoritmo. E a equação 1 representa o incremento a ser considerado em função da temperatura.

Figura 1.5 Processo realizado no algoritmo iterativo.

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \times \left[ 1 + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (1)$$



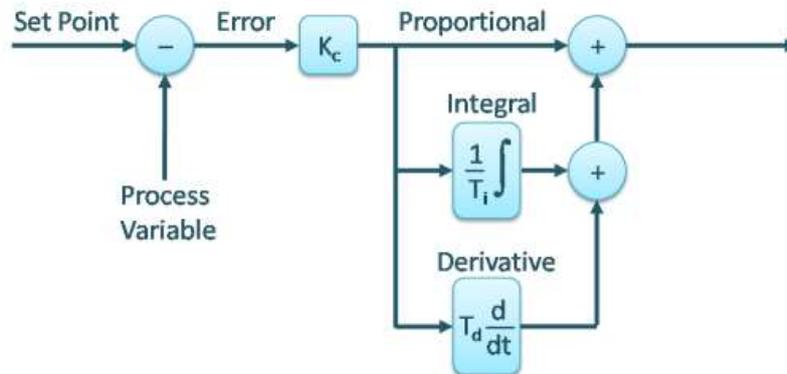
Fonte: University of Jordan (2016)

### 2.5.3 Algoritmo não-iterativo

Nessa implementação do controle PID, a saída é calculada de forma paralela, ou seja, o erro atua em cada parâmetro separadamente e o resultado final é a soma dos resultados obtidos, o que diferencia esse algoritmo do algoritmo paralelo é o fato dos parâmetros integrativos e derivativos ( $T_i$  e  $T_d$ ) não dependem do parâmetro proporcional  $K_p$ , demonstrado na figura 1.6 abaixo. Do mesmo modo, a equação 2 representa o incremento a ser considerado em função da temperatura.

Figura 1.6 Processo realizado no algoritmo não-iterativo.

$$u(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2)$$



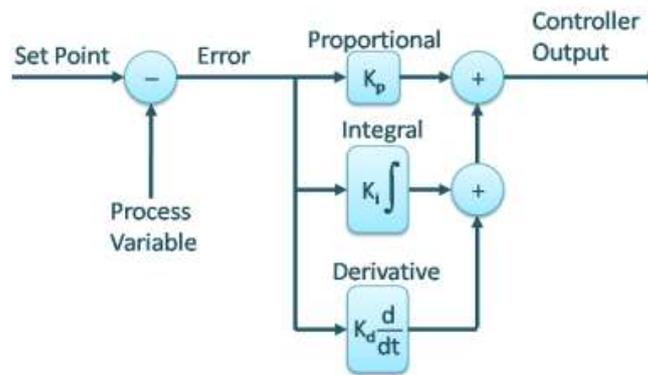
Fonte: University of Jordan (2016)

#### 2.5.4 Algoritmo paralelo

O algoritmo paralelo é quase idêntico ao algoritmo não-iterativo, em ambos os casos o erro é atuado por cada parâmetro separadamente e a saída é a combinação dos resultados obtidos, porém no algoritmo paralelo os parâmetros integrativos e derivativos ( $K_i$  e  $K_d$ ) são calculados com base no parâmetro proporcional, a figura 1.7 abaixo demonstra a similaridade com o algoritmo não-iterativo. E a equação 3 representa o incremento a ser considerado em função da temperatura.

Figura 1.7 Processo realizado no algoritmo paralelo.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$



Fonte: University of Jordan (2016)

### 2.5.5 Definição dos parâmetros

As contribuições de cada parâmetro para a saída, podem ser calculadas utilizando o seu valor pré-definido e realizando as operações que são definidas no seu próprio nome, então para a contribuição proporcional segue a equação 4:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (4)$$

Onde  $K_p$  é o parâmetro proporcional e  $e(t)$  é o erro em relação ao *setpoint*, agora note que caso o  $K_p$  seja muito elevado, o erro pode se tornar negativo e vice-versa, assim criando oscilações e caso  $K_p$  seja muito pequeno o sistema não irá responder alterações ao erro de forma eficaz.

A saída em função da constante integrativa pode ser obtida pela equação 5:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Portanto, a saída se dá pela soma dos erros em função do tempo escalado pelo parâmetro de integrativo, note então que caso o fator integrativo seja muito alto, o erro ao longo do tempo tende a diminuir e a saída se aproxima do *setpoint*.

Para o parâmetro derivativo, a saída é resultado da taxa de variação do erro multiplicado pela constante derivativa (equação 6):

$$Dout = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

Então o fator derivativo atua contra a influência dos outros parâmetros, caso a variação da saída esteja muito positiva, o fator derivativo tende a se contrapor de forma negativa, portanto, valores altos do fator derivativo diminuem o *overshoot*.

### 2.5.6 Método de obtenção das constantes.

Apesar das grandes vantagens e da utilidade do método de controle PID, para o usufruí-lo de maneira completa é necessário determinar as constantes mencionadas no capítulo anterior, e como cada sistema é diferente e é influenciado por diversas variáveis as constantes não podem ser tabeladas e devem ser encontradas para cada aplicação e portanto a melhor maneira de se obter as constantes é de maneira empírica, porém existem métodos para facilitar esse processo e que resultam em constantes próximas ou similares aos ideais, diminuindo assim, o trabalho necessário para encontrá-las.

E uma das formas de se encontrar as constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  é através do método (semi-empírico) gráfico de Ziegler-Nichols, onde submete-se o sistema a energia máxima de fornecimento, gerando assim, uma curva resposta em regime estacionário, conhecido como curva de reação, vide figura 1.8. Nesta curva encontra-se as constantes temporais  $L$ , que representa o tempo gasto do sistema de sair do estágio inicial até começar o ganho a ele imposto, e o  $T$ , que representa o tempo gasto da saturação do sistema encontrado através do ponto que cruza a reta da saturação ( $K$ ) e a reta tangente à curva no regime transitório do sistema, que têm seu início em  $L$  (OGATA, 2014).

Figura 1.8 Método de Ziegler-Nichols



Fonte: adaptado de OGATA, 2014

Com os valores de  $L$  e  $T$ , encontra-se os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  (OGATA, 2014) através da equação 7.

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L}; K_i = \frac{K_p}{2L}; K_d = 0,5 \cdot K_p \cdot L \quad (7)$$

## 2.6 Conclusão dos estudos

Observou-se pela literatura que usualmente inicia-se a escolha de um controlador realimentado (modo “feedback”) com compensador proporcional(P), integrador(I) e derivativo(D). Porém estes controladores em alguns casos, não são suficientes para diminuir o erro inicial do processo de realimentação, principalmente para períodos curtos, como no projeto do radiômetro. Nas medições atuais, os sinais apresentam ainda um “overshoot” muito grande, o que provoca o atraso da sua estabilização e conseqüente acúmulo de erros na medição. Para diminuir este problema, abordar-se-á a implementação de uma realimentação do tipo “feedforward”, onde deve ser inserido características de sinais já conhecidos para melhorar a resposta do sinal onde o sinal da radiação será inserido tanto na entrada do controlador como no sensor mantido a uma temperatura conhecida através de circuito aquecedor.

Assim, tem-se que o propósito deste projeto é modificar o sistema de controle utilizado atualmente de tal maneira a implementar um método de controle *feedforward*, de modo híbrido, com a adição dele ao sistema de controle já existente.

### **3 PARTE PRÁTICA**

A parte prática engloba basicamente o entendimento do sistema de aquisição de dados e o controle do radiômetro baseado no uso do microcontrolador ATmega 328P. A seguir segue a descrição dos componentes utilizados e as etapas de montagem e aquisição dos sinais de interesse do radiômetro.

#### **3.1 Componentes principais utilizados**

Para realizar as montagens foram utilizados os seguintes componentes ao longo do projeto:

##### **3.1.1 Microcontrolador ATmega 328P**

Se trata do microcontrolador desenvolvido pela Atmel® (desde 2016, Microship®) e conhecido por ser de fácil acesso, prático e de baixo custo. Ele possibilita acesso a uma plataforma de *hardware open-source* e uma interface amigável no computador conhecido como Arduino, que utiliza a linguagem *Processing* baseada na linguagem C/C++ (SOUZA et al, 2011). Em particular o ATMEGA 328P é utilizada como parte da plataforma UNO (vide figura 2.1, onde é apresentado o aspecto físico da plataforma).

Devido a sua versatilidade, na presente etapa, toda a interface e aquisição de dados e de controle foram realizadas utilizando essa plataforma de prototipagem.

A seguir são apresentadas as características de hardware desta plataforma:

- Tensão de Operação: 5V
- Tensão de Entrada: 7-12V
- Portas Digitais: 14 (6 podem ser usadas como PWM)
- Portas Analógicas: 6
- Corrente Pinos I/O: 40mA
- Corrente Pinos 3,3V: 50mA

- Memória Flash: 32KB (0,5KB usado no bootloader)
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Velocidade do Clock: 16MHz

Figura 2.1 Arduino Uno R3



Fonte: ARDUINO (2020)

### 3.1.2 Thermistores NTC 10kΩ

Os termistores NTCs são conhecidos por atuarem como sensores de temperatura, pois sua resistência varia em função da temperatura e é possível, então, através de cálculos obter a temperatura do termistor. Em particular, nos sensores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) a sua resistência varia de forma decrescente com o aumento da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura menor a resistência. Para obter a temperatura em função da resistência é utilizado a fórmula da equação 8, equação de Steinhart (Bryan Padilla, 2020), onde os coeficientes A, B e C são resultantes de um sistema de equações para R (resistência do termistor) conhecidos em temperaturas  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T = 50^{\circ}\text{C}$  e  $T = 100^{\circ}\text{C}$ .

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (8)$$

Para este projeto foi utilizado somente um termistor NTC de 10KΩ (a 25 °C) para realizar as medições de temperatura. A figura 2.2 ilustra o NTC utilizado de 3 mm de diâmetro.

Figura 2.2 Thermistor NTC 10K $\Omega$



Fonte: <https://www.arduinoomega.com/termistor-ntc-10k-ohm-faixa-de-55-a-125c>  
acessado em 09/08/2021

### 3.1.3 Software de aquisição de dados PLX-DAQ

Para a aquisição de dados em tempo real, foi utilizado um macro desenvolvido pela Parallax Inc. e Hebel (2007) na linguagem VISUAL BASIC, que através de comunicação serial e por meio de comandos enviados do Arduino, os dados são visualizados no Excel® em tempo real em formato específico, permitindo assim, a interpretação dos resultados em tempo real, tornando mais fácil a observação de erros nos estágios iniciais de captura e armazenamento de dados (*logging*).

### 3.1.4 Bibliotecas adicionais

Além de componentes básicos e fundamentais como resistores, transistores, fontes, também foram utilizadas bibliotecas específicas para cada montagem, de modo a melhorar a qualidade do *software* utilizado e permitir que o tempo fosse utilizado para melhor entendimento do sistema.

As bibliotecas utilizadas foram:

- *SmoothThermistor* desenvolvida por Gianni Van Hoecke (2016), utilizada para calcular a temperatura do thermistor em função de sua resistência utilizando a equação de *SteinHart* previamente mencionada. Disponível em <https://github.com/giannivh/SmoothThermistor> Acesso em 05/08/2021.

- PID\_v1 desenvolvida por Brett Beauregard (2015), implementa o controle por *feedback* PID, necessita das constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  previamente calculadas, utiliza o algoritmo de implementação paralelo como base, também foi utilizada no protótipo do radiômetro absoluto desenvolvido por Lopes (2020).

## 3.2 Montagens em bancada para obtenção das medidas de interesse

### 3.2.1 Curva de resposta para calibração do elemento sensor (NTC 10k $\Omega$ Thermistor)

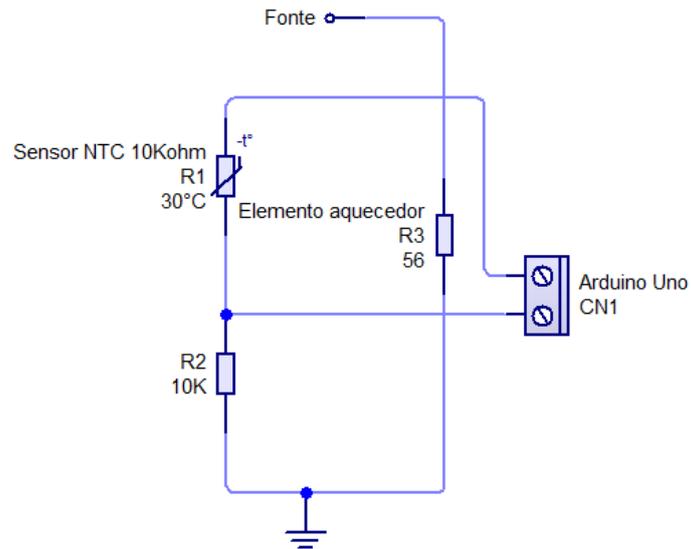
Como dito anteriormente, calibrar o elemento sensor é de extrema importância para o funcionamento correto do radiômetro, portanto, uma das montagens realizadas nesse projeto foi o levantamento da curva de resposta do thermistor NTC de 10 k $\Omega$ . Este levantamento da curva permite o cálculo do seu coeficiente *beta* necessário para utilizar a equação de *Steinhart*. Assim foi feita uma montagem de bancada utilizando:

- Fonte de tensão SPCH-70100 com tensão de entrada 100V-240V Bivolt e tensão de saída 8.5V até 5.65A de corrente máxima. Para alimentar o elemento aquecedor.
- Termopar do tipo K com pinos banana para ser utilizado como temperatura de referência, possui limite de temperatura de 250°C para trabalho contínuo, utilizado em conjunto com o multímetro ICEL MD-6111.
- Resistor de baixa resistência e alta potência, 56 $\Omega \pm 5\%$  e potência 2W, para atuar como elemento aquecedor.
- Arduíno Uno para realizar o cálculo da resistência e imprimi-las no *serial monitor*.

Considerando esses elementos foi produzido o seguinte circuito demonstrado pela figura 3.1, que consiste da fonte de 8.5V para aquecer o

resistor de  $56\Omega$ , a saída 3.3V do arduíno que serve como fonte de tensão para realizar os cálculos baseados no divisor de tensão, foi utilizada a saída de 3.3V em contrapartida a saída de 5V pois ela está menos suscetível a ruído.

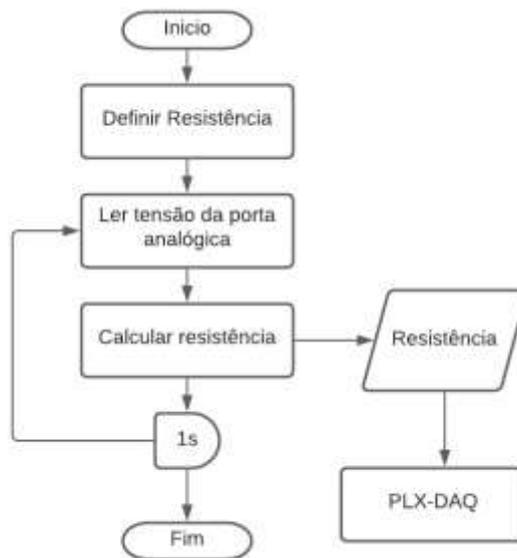
Figura 3.1 Circuito calibração sensor NTC



Fonte: Autoria própria.

E o programa resultante para aquisição dos dados da curva tem como fluxograma demonstrado na Figura 3.2, que define a resistência como variável, lê a tensão incidente na porta analógica escolhida, calcula o valor da resistência do sensor NTC baseado no divisor de tensão com o resistor de  $10k\Omega$ , envia a resistência obtida em formato de *string* para o *serial monitor* do arduíno que é captado pelo PLX-DAQ e gravado, este processo se repete a cada 1 segundo.

Figura 3.2 Fluxograma programa curva do thermistor.

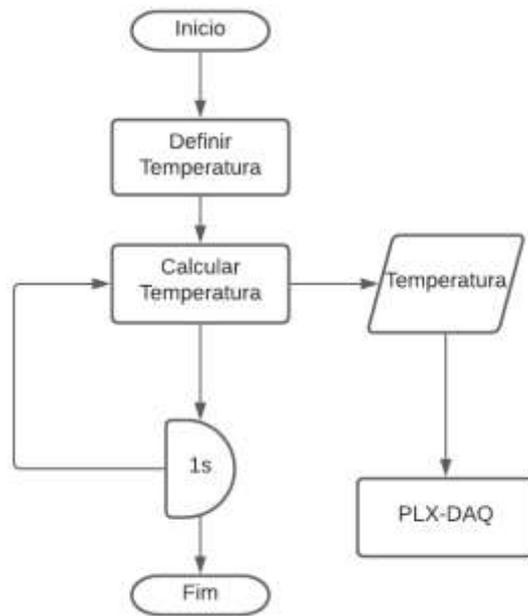


Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Obtenção das constantes do PID

Foram realizadas montagens de bancada para a obtenção das constantes de PID. Como mencionado anteriormente, o método utilizado para determinar as constantes do controlador foi o método de Ziegler-Nichols, e para executar esse método é necessário a obtenção da curva de reação. Para tanto, deve-se estimular o sistema a ser controlado, aplicando uma tensão constante, e esperar a saturação do parâmetro a ser controlado, no caso, a temperatura. A montagem é basicamente o mesmo circuito utilizado para obter a curva de calibração do elemento sensor NTC, porém com mudanças no fluxograma, evidenciado pela figura 3.3 abaixo, onde ao invés de calcular a resistência é calculada a temperatura utilizando a biblioteca *SmoothTermistor* mencionada anteriormente, o restante do programa é executado de maneira idêntica ao programa relacionado a curva de reação.

Figura 3.3 Fluxograma programa constantes PID.



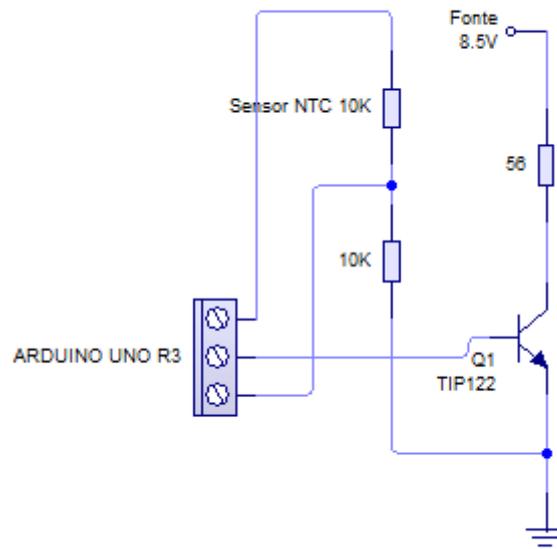
Fonte: Autoria própria.

Os resultados são exibidos na próxima seção.

### 3.2.3 Controle de temperatura do elemento aquecedor

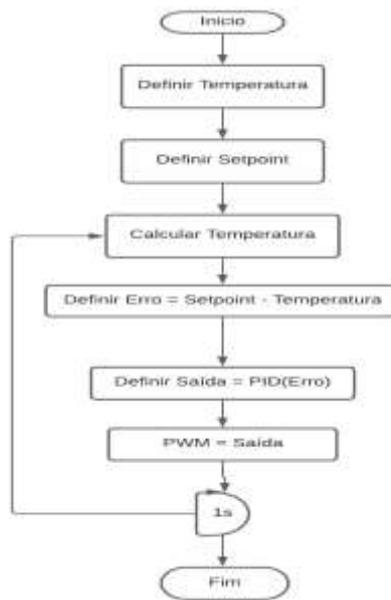
Após calibrar o sensor de temperatura e obter as constantes de PID, foi realizada uma montagem para testar o sistema de controle inicial, onde foi definido um *setpoint*, ou seja, manter o elemento aquecedor nesta temperatura. Para essa montagem o circuito resultante ficou como demonstra a figura 3.4, possuindo um transistor TIP-122 para ser acionado como chave pelo Arduino, que permitirá a passagem de corrente pelo resistor assim o aquecendo e a temperatura será monitorada pelo mesmo método da obtenção das constantes anterior.

Figura 3.4 Circuito controle PID.



E o fluxograma da Figura 3.5 sofreu algumas alterações comparado com o anterior, neste caso é utilizado a biblioteca PID\_v1 para o controle da temperatura, portanto calcula-se a temperatura de modo idêntico ao fluxograma anterior, subtrai-se ela do *setpoint* e este valor é definido como erro, utiliza-se o erro como parâmetro para o método de controle PID que tem como saída um valor PWM entre 0-255, caso o resultado seja 255, o transistor será chaveado 255 vezes em 1 segundo, caso seja 0 o transistor não será chaveado, ocorrendo de modo análogo para os valores entre 0 e 255, assim regulando a temperatura do resistor.

Figura 3.5 Fluxograma programa constantes PID.

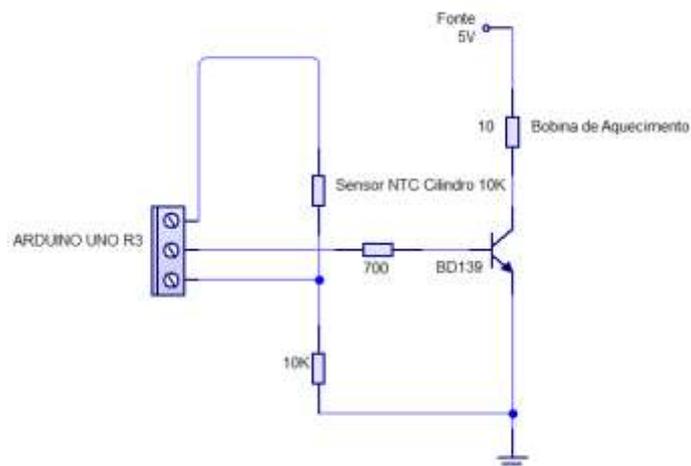


Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Controle de temperatura cilindro.

Para fins de comparação entre o sistema de controle desenvolvido por Lopes (2020) e o sistema desenvolvido na etapa inicial deste projeto, foi construído uma variante do circuito visto acima, substituindo os transistores utilizados e os sensores, assim obtendo o circuito da Figura 3.6 abaixo, onde foi colocado um resistor de  $700\Omega$  em série com 5V do Arduino para fornecer a corrente de saturação do coletor do transistor BD139 e a resistência da bobina de aquecimento é  $10\Omega$  ao invés de  $56\Omega$  providos pelo resistor anterior.

Figura 3.6 Circuito de controle cilindro radiômetro.



Fonte: Aatoria própria.

Apesar das alterações físicas do sistema, não foi necessária nenhuma alteração de *software* para o novo sistema.

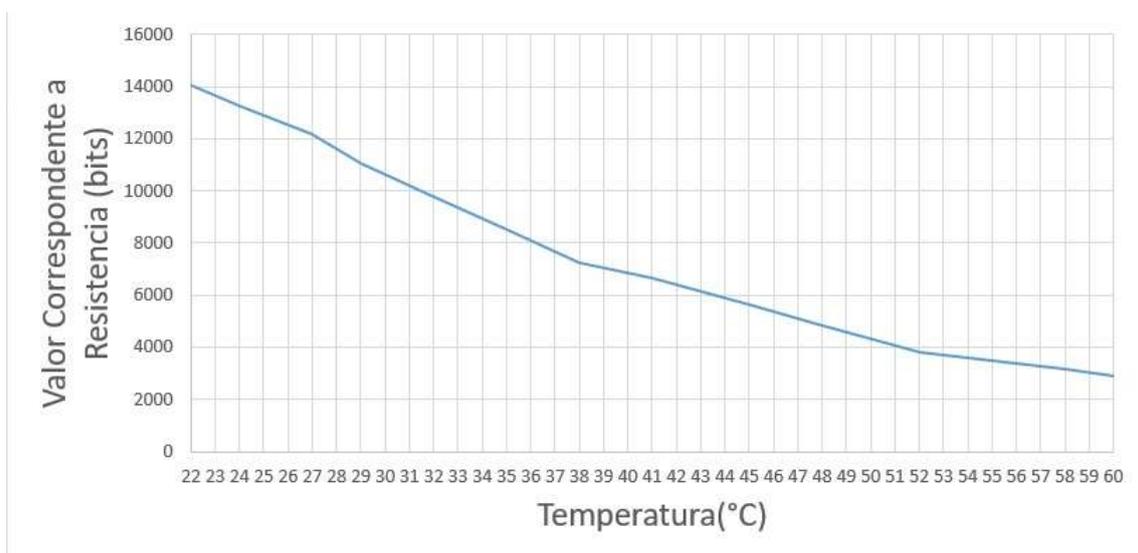
## 4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSOES

Aqui são mostrados os resultados obtidos na montagem, para isso foram reunidos os gráficos resultantes de cada montagem e no final são comparados ao sistema de controle feito por Lopes,2020 (com o sistema proposto neste projeto).

### 4.1 Curva de resposta thermistor NTC

Após a montagem do circuito mencionado anteriormente, foi feito a execução do sistema e a aquisição dos dados, a montagem foi realizada em temperatura ambiente 22°C as 11:30 da manhã, até o resistor atingir 60°C, e o resultado obtido foi como consta na figura 4.1, onde a resistência é representada pelo valor correspondente em bits no conversor analógico digital em função da temperatura em °C.

Figura 4.1 Curva de resposta thermistor NTC.



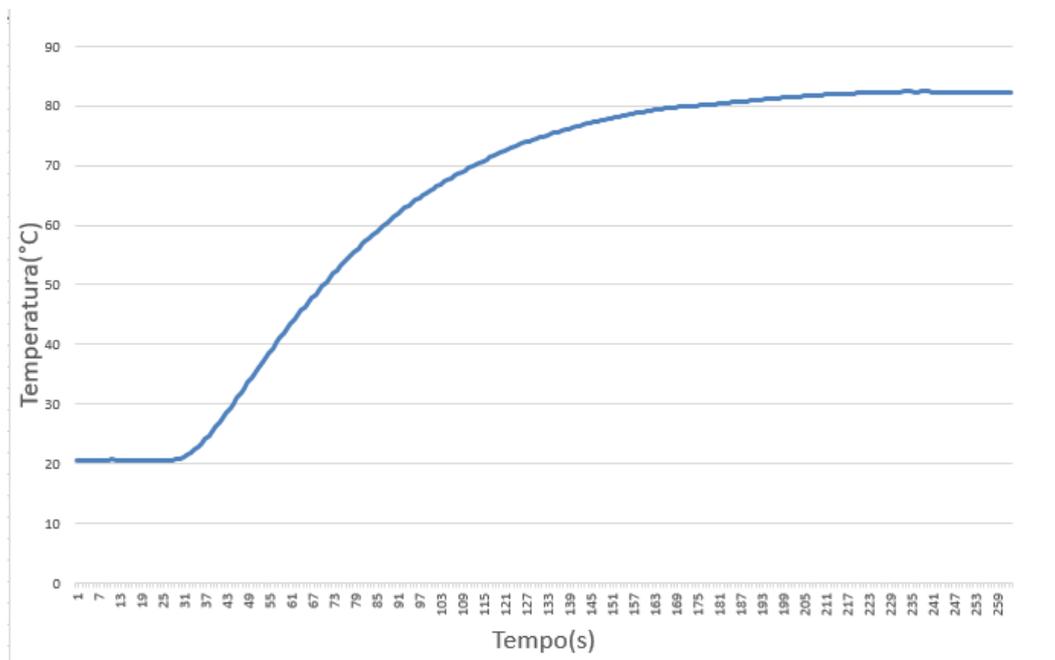
Fonte: Aatoria própria.

Utilizando os pontos gravados no Excel, foi possível calcular o coeficiente *Beta*, para um *valor de* aproximadamente 4095, valor que foi utilizado no próximo resultado obtido.

#### 4.2 Obtenção das constantes do PID

A resposta degrau obtida para a determinação das constantes do PID foi realizada em temperatura ambiente de 20°C e alimentada pela fonte de tensão de 8.5V, a figura 4.2 abaixo mostra a resposta obtida:

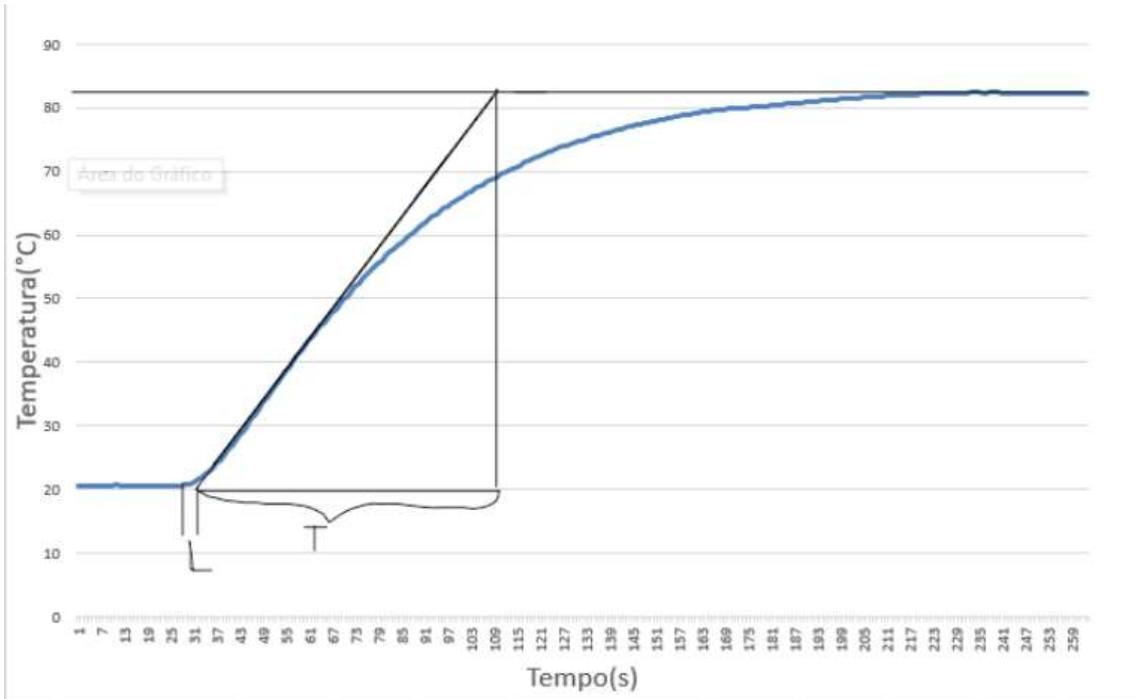
Figura 4.2 Resposta Degrau.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando o gráfico foi possível obter  $L = 3$  e  $T = 75$ , evidenciado pela Figura 4.3, assim resultando em  $K_p = 30$ ,  $K_i = 5$  e  $K_d = 45$ .

Figura 4.3 Obtenção das constantes.

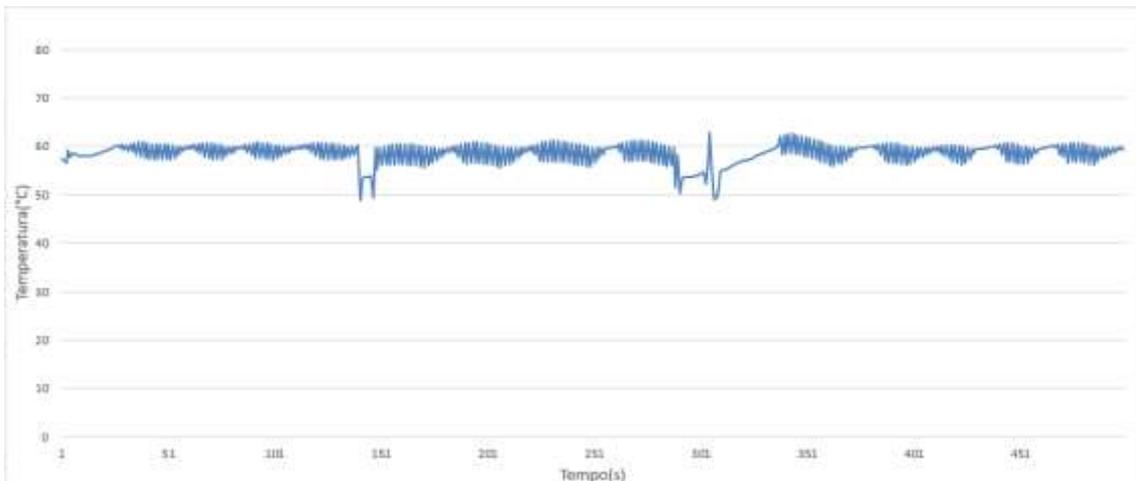


Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Controle de temperatura do elemento aquecedor

Utilizando os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  obtidos na montagem anterior foi possível simular o controle de um elemento aquecedor, utilizando o resistor de  $56\Omega$ , fonte de 8.5V, *setpoint* ajustado a  $60^\circ\text{C}$ , tempo de amostragem de 1 segundo. O resultado obtido é evidenciado na figura 4.4, onde mostra somente a região de saturação, próxima ao *setpoint* de  $60^\circ\text{C}$ .

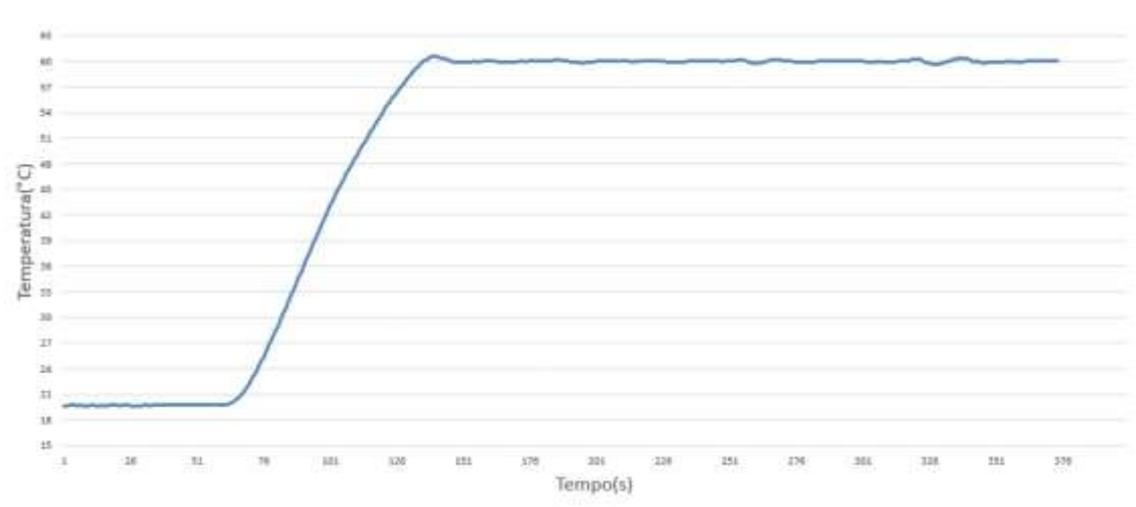
Figura 4.4 Resposta Degrau



Fonte: Autoria própria.

É possível verificar a grande ocorrência de oscilações no sinal de saída, então após obter resultados não satisfatórios, foi feita a definição das constantes utilizando o método empírico de Ziegler-Nichols e utilizando esse método as constantes obtidas foram de  $K_p = 294$ ,  $K_i = 29.4$  e  $K_d = 735$ , após isso ao realizar a montagem nas mesmas condições ambientes a curva de resposta fica evidenciada baseada na figura 4.5 abaixo:

Figura 4.5 Curva de resposta



Fonte: Autoria própria.

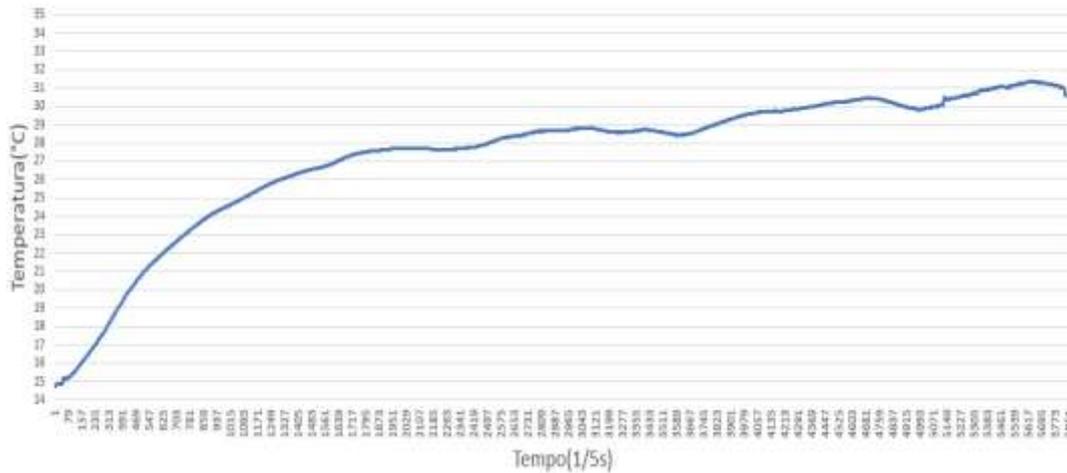
Conclui-se baseado nas figuras acima que as constantes são melhores pelo método empírico, porém, cabe colocar que esse método é demorado pela necessidade de montagem experimental e pode introduzir incerteza por erro do operador, sendo desejável ele já ter uma experiência prévia com sistemas de controle PIDs.

#### 4.4 Comparação com o sistema de controle atual do radiômetro

O sistema de controle desenvolvido nesse projeto tem como proposta diminuir o erro da irradiância medida e para isso é necessário que este novo sistema produza um erro menor que o sistema atual e, portanto, é necessário compará-los, para isso foi feito um levantamento da curva de resposta do radiômetro ao sistema de controle atual (Lopes,2020) e ao sistema de controle desse projeto.

Os resultados obtidos do sistema de controle atual são evidenciados pela figura 4.6 abaixo, e foram realizados com a fonte de tensão em 5V, temperatura ambiente de 20° e *setpoint* de 30°, tempo de amostragem de 0,2s.

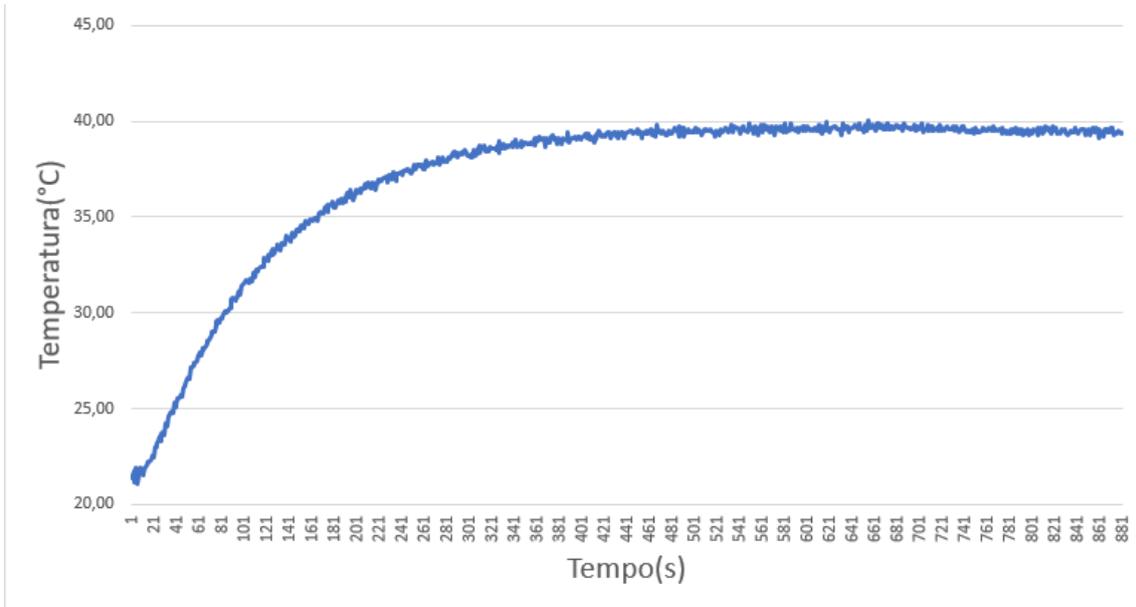
Figura 4.6 Curva de resposta, controle atual



Fonte: Autoria própria.

Para compararmos com a curva de resposta desse projeto, primeiramente é necessário recalculas as constantes do PID utilizando como base o tempo de resposta do radiômetro e não do resistor que estava sendo utilizado anteriormente, portanto ao utilizar os sensores NTC do radiômetro realizamos a obtenção da resposta degrau em condições de temperatura ambiente de 21°C e Fonte de 5V, o resultado é evidenciado na figura 4.7.

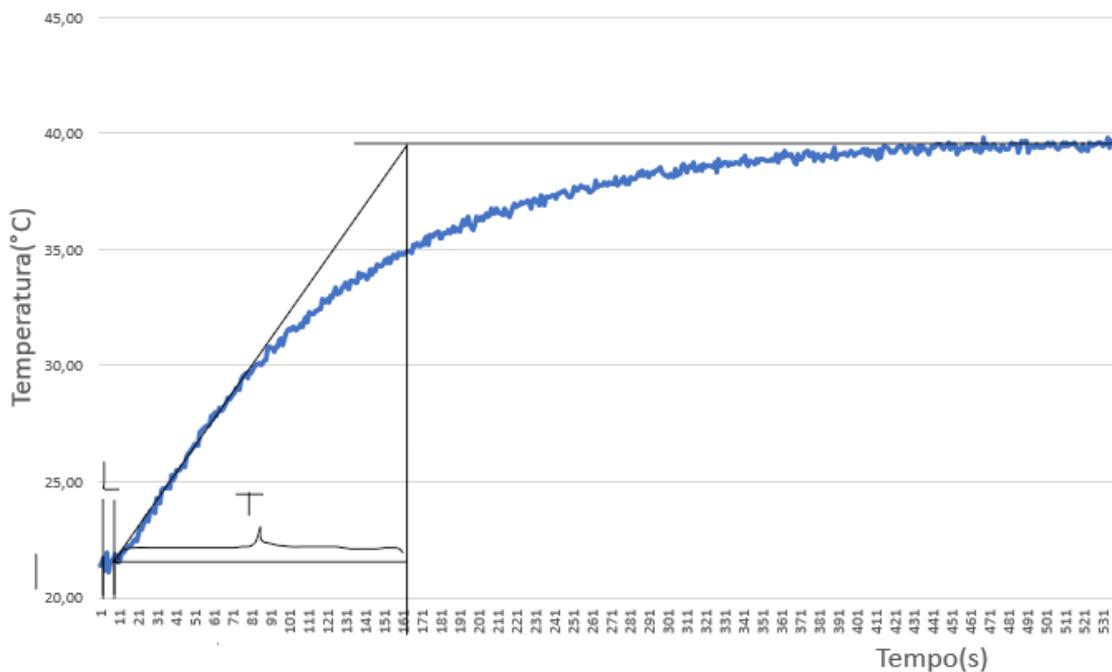
Figura 4.7 Resposta Degrau sensor NTC radiômetro



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção da resposta degrau foi calculado novamente os coeficientes pelo método de Ziegler-Nichols obtendo-se  $K_p = 38$ ,  $K_i = 3.8$  e  $K_d = 95$ , utilizando os valores de  $T = 158$  e  $L = 5$ , evidenciado pela figura 4.8.

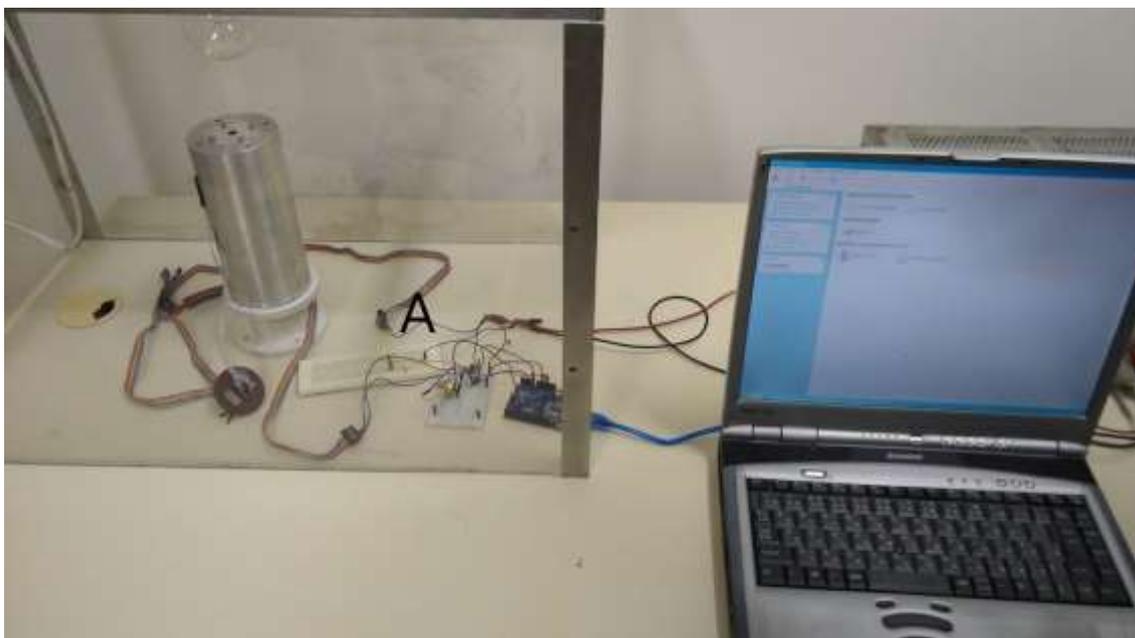
Figura 4.8 Cálculo das constantes, radiômetro cilindro



Fonte: Autoria própria.

Com os valores das constantes calculadas, foi possível obter a resposta degrau do radiômetro ao controle projetado até então, a figura 4.9 abaixo demonstra a bancada de teste montada para realizar tal simulação de controle.

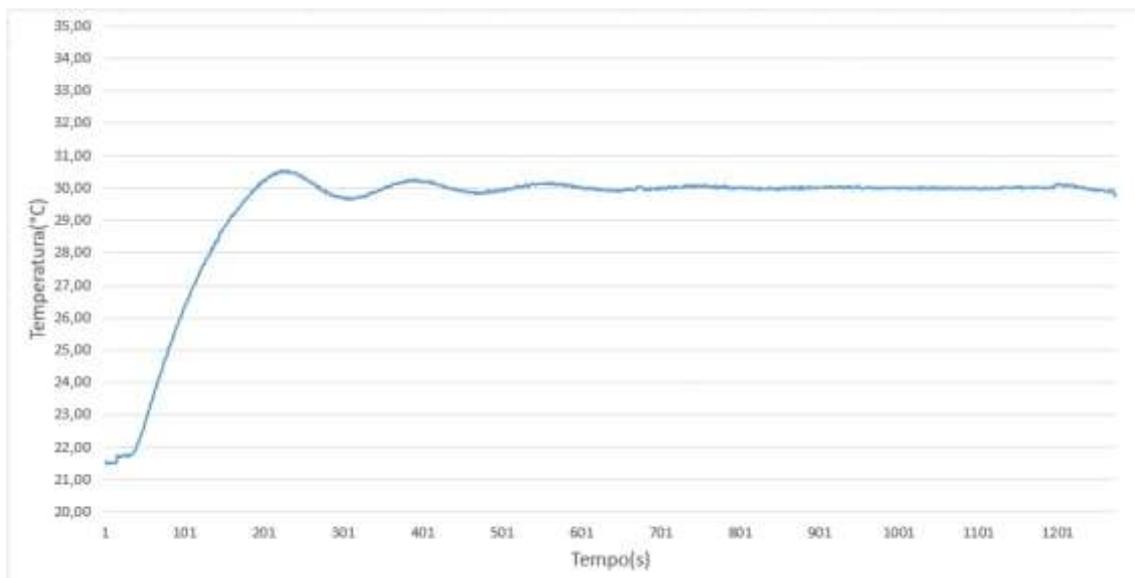
Figura 4.9 Bancada de testes para controle desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

É possível notar por figura 4.9 A, que a única mudança em comparação ao protótipo inicial foi o sistema de controle, tanto o radiômetro quanto o ambiente de aquisição de dados continuam idênticos. Após montar a bancada foi realizado o controle com temperatura ambiente de 21°C e Fonte de 5V, os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 4.10 abaixo.

Figura 4.10 Resposta degrau para o cilindro radiômetro



Fonte: Autoria própria.

É possível notar que os novos resultados obtidos de controle são mais precisos e possuem um tempo de resposta menor que o do sistema atual (Lopes,2020), porém ainda possui o *overshoot* inicial indesejado e algumas oscilações pequenas que podem atrapalhar nas medições mais precisas, por isso, é fundamental que ocorra ainda mudanças para o método de controle.

## 5 CONCLUSÃO

Nesta etapa da iniciação científica, ao longo dos 5 meses de bolsa, foram realizados os estudos teóricos sobre o funcionamento de um radiômetro absoluto e os sistemas de controle de temperatura. E após esses estudos pode-se ter o embasamento básico para poder replicar o sistema de controle desenvolvido por Lopes (2020), conseguindo aumentar a precisão com algumas alterações do controle inicial. Após a montagem e testes do sistema reproduzido pode-se concluir que houve sim uma melhora em relação ao modelo inicial, porém esta melhora ainda não é o suficiente para atender os requisitos necessários, tanto na precisão de pelo menos 100 ppm, como no tempo de resposta evidenciado pelo *overshoot* visto em todas as respostas ao sinal degrau apresentadas. Observado isso, está previsto no próximo período

de Iniciação Científica, para dar sequência, aplicar o método de controle por retroalimentação *“feedforward”*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bryan Padilla, Temperature Sensing with Thermistors, Texas Instruments (2020). Disponível em <https://www.ti.com/lit/wp/slay054/slay054.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2021.

CARLESSO, F. et al. **Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2019, v. 41, n. 2, p. 1-10

KOPP, Greg. **An assessment of the solar irradiance record for climate studies**. *EDP Sciences*, [S. l.], p. A14-P1 - A14-P9, 28 jan. 2014. DOI 10.1051/swsc/2014012. Disponível em: <https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/abs/2014/01/swsc130036/swsc130036.html>. Acesso em: 17 jul. 2021.

IRITA, R. T.; LOPES, A. G. ; BERNI, L. A. ; VILELA, W. A. ; SAVONOV, G. S. ; CARLESSO, F. ; VIEIRA, L. E. A. ; MIRANDA, E. L.(2020) . **RADIÔMETRO SOLAR POR SUBSTITUIÇÃO ELÉTRICA - ESTUDO PRELIMINAR DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. São Paulo-SP, 2020.

LOPES, A. G. ; BERNI, L. A. ; VILELA, W. A. ; IRITA, R. T. ; SAVONOV, G. S. ; CARLESSO, F. ; VIEIRA, L. E. A. ; MIRANDA, E. L. . **Radiômetro absoluto para medição da TSI**. In: X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2019, São José dos Campos. Acervo digital dos Workshops dos Cursos em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2019.

LOPES, A. G. **Estudos preliminares para o desenvolvimento de um radiômetro de substituição elétrica**. Dissertação em Engenharia e Tecnologia Espaciais. São José dos Campos INPE, 2020.

University of Jordan, **PID Controller** (2016), Disponível em <http://engineering.ju.edu.jo/Laboratories/07-PID%20Controller.pdf>. Acesso em: 5 ago 2021.

SOUZA, R.A. ; PAIXÃO, C.A. ; UZÊDA, D.D ; DIAS, A.M. ; DUARTE, S.; AMORIM, S.H. ; **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, 1702 (2011)

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. 809 p. ISBN 978-85-4301-375-6. Disponível em: [https://www.cefala.org/~adelino/Livros/Ogata\\_2010\\_Engenharia\\_de\\_Controlo\\_Moderno.pdf](https://www.cefala.org/~adelino/Livros/Ogata_2010_Engenharia_de_Controlo_Moderno.pdf). Acesso em: 10 ago. 2021.

DATLA, R.; PARR, A. Introduction to Optical Radiometry. In: PARR, A.; DATLA, R.; GARDNER, J. **Optical Radiometry**. San Diego CA EUA: Elsevier Inc., 2005. E-book. ISBN 0 12 475988 2.