

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMATICA INDUSTRIAL

RENAN PORTELA JORGE

**MINIFORNO ELÉTRICO APLICADO NA FABRICAÇÃO DE  
DISPOSITIVOS EM FIBRA ÓTICA**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

J82m Jorge, Renan Portela  
2018 Miniforno Elétrico Aplicado na Fabricação de Dispositivos em Fibra Ótica / Renan Portela Jorge. – 2018.  
57 f. : il. ; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de concentração: Fotônica em Engenharia, Curitiba, 2018.

Bibliografia: f. 56–57.

1. Miniforno Elétrico. 2. Fibra Ótica. 3. Controlador Digital de Temperatura. 4. Controle de temperatura. 5. Interação homem-máquina. 6. Fotônica em Engenharia. 7. Engenharia Elétrica – Dissertações. I. De Oliveira, Valmir. II. Chiamenti, Ismael. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

---

Biblioteca Central do Campus Curitiba – UTFPR

Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB – 9/794

**RENAN PORTELA JORGE**

**MINIFORNO ELÉTRICO APLICADO NA FABRICAÇÃO DE  
DISPOSITIVOS EM FIBRA ÓTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira  
Coorientador: Prof. Dr. Ismael Chiamenti

**CURITIBA**

**2018**

Título da Dissertação N° 805

**MINIFORNO ELÉTRICO APLICADO NA FABRICAÇÃO DE  
DISPOSITIVOS EM FIBRA ÓTICA**

por

**RENAN PORTELA JORGE**

**Orientador:** Prof. Dr. Valmir de Oliveira

**Coorientador:** Prof. Dr. Ismael Chiamenti

Esta Dissertação foi apresentada como requisito à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS - Área de concentração: Fotônica em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial– CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, às 14 do dia 25 de Setembro de 2018. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos Doutores:

---

Prof. Dr. Rafael Eleodoro de Goes  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Ismael André Heisler  
(UFPR)

---

Prof. Dr. Valmir de Oliveira  
(UTFPR)

Visto da coordenação:

---

Prof. André Schneider de Oliveira, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho à todos a  
pesquisadores que superaram os desafios  
que lhes foram impostos de maneira a se  
tornarem profissionais/pessoas melhores.

## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter acontecido sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Primeiramente agradeço aos meus pais por todo carinho e apoio que me deram ao longo deste mestrado, sem esse suporte o mestrado teria sido um desafio ainda maior.

Agradeço aos colegas de mestrado que além de terem me ajudado a passar pelos desafios acadêmicos, também me ajudaram com suas amizades

Agradeço minha "irmã de mestrado", Camila, por toda a ajuda que me deu e todas as ótimas conversas que tivemos.

Aos professores pelas lições acadêmicas e profissionais transmitidas

Ao CNPq e UTFPR um muito obrigado pelo apoio, estrutura que me deram.

Um agradecimento especial ao meu orientado professor Valmir, por ter acreditado em mim, no meu trabalho e no meu potencial. Obrigado pelo conhecimento, valores e conversas que tivemos, estes nunca serão esquecidos.

Enfim, agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Our virtues and our failings are  
inseparable, like force and matter. When  
they separate, man is no more”.

(Nikola Tesla)

## Resumo

JORGE, Renan Portela. **MINIFORNO ELÉTRICO APLICADO NA FABRICAÇÃO DE DISPOSITIVOS EM FIBRA ÓTICA**. 2018. 57 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O miniforno elétrico descrito nesta dissertação foi desenvolvido com a finalidade de otimizar a fabricação e teste de dispositivos em fibra ótica que precisam de temperaturas elevadas. A otimização é obtida ao confinar a maior parcela do calor em região de 1 cm ao longo da direção axial da fibra. Assim, mesmo quando o miniforno opera na temperatura máxima (1000 °C) o trecho de fibra ótica fora da câmara de aquecimento não se fragiliza com estresse térmico resultante do processo.

O miniforno conta com uma Interface Homem Máquina (IHM) e um controlador digital, que é o responsável por amostrar e controlar a temperatura no interior da câmara de aquecimento, que foram desenvolvidos especificamente para esta aplicação. Por fim, os resultados obtidos da distribuição do calor no interior do miniforno, repetibilidade e do erro em regime permanente confirmam que o miniforno alcançou seus objetivos.

**Palavras-chave:** Miniforno Elétrico. Fibra Ótica. Controlador Digital de Temperatura.



## Abstract

JORGE, Renan Portela. **ELECTRICAL MINIFURNACE APPLIED IN FABRICATION FIBER OPTICAL DEVICES** . 2018. 57 p. Dissertation – Graduate Program in Electrical and Computer Engineering – Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2018.

The electrical minifurnace described in this dissertation was development with the goal of optimize the fabrication and test of fiber optics devices that needs high temperature. The optimize is obtained by confining the largest portion of the heat in region of 1 cm along the axial direction of the fiber. Therefore, even when the minifurnace operates in the maximum temperature (1000 °C) the fiber optic section outside the heating chamber does not become brittle with thermal stress resulting from the process.

The minifurnace have a man-machine interface and a digital controller, which is responsible for sampling and controlling the temperature inside the heating chamber, that were developed specifically for this application. Lastly, the results obtained of the heat distribution in the heating chamber, repeatability and of the error in permanent regime confirms that the minifurnace reached its objectives.

**Keywords:** Electrical Minifurnace. Fiber Optics. Temperature Digital Controller.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 – Modelo prático de um sensor termopar tipo K. . . . .	19
Figura 2 – Digrama de blocos de sistema de controle com malha de realimentação	24
Figura 3 – Parâmetros dinâmicos da resposta de um sistema de controle de malha fechada. . . . .	25
Figura 4 – Digrama de blocos de sistema de controle digital com malha de realimentação. . . . .	28
Figura 5 – Digrama de blocos de sistema de controle digital com malha de realimentação . . . . .	29
Figura 6 – Caixa de alumínio para proteção mecânica e molde para o concreto refratário. . . . .	31
Figura 7 – Molde negativo da câmara interna e da canela do miniforno. . . . .	31
Figura 8 – Cilindro em aço inox responsável por conduzir energia e suporte mecânico para resistência elétrica. . . . .	32
Figura 9 – Base do miniforno antes do lançamento do concreto. . . . .	32
Figura 10 – Base do miniforno depois da cura sem o molde de náilon e o tubo de látex. . . . .	33
Figura 11 – Modelo de sensor termopar utilizado. . . . .	34
Figura 12 – Resistência de NiCr-40 responsável pela geração de calor no interior da câmara de aquecimento. . . . .	34
Figura 13 – Montagem final do miniforno. . . . .	35
Figura 14 – Montagem final da câmara de aquecimento. . . . .	36
Figura 15 – Diagrama de componentes do miniforno elétrico. . . . .	37
Figura 16 – Diagrama elétrico do circuito de aquisição conectado ao microcontrolador.	38
Figura 17 – Diagrama elétrico do circuito de potência conectado ao microcontrolador.	39
Figura 18 – Fluxograma do comportamento dinâmico do <i>software</i> embarcado no microcontrolador. . . . .	41
Figura 19 – Filtro de média de amplitude limitada. . . . .	43
Figura 20 – Filtro de média de médias móveis. . . . .	43
Figura 21 – Painel frontal da interface homem máquina. . . . .	45
Figura 22 – Exemplo da resposta do miniforno para uma determinada lista <i>setpoints</i> .	47
Figura 23 – Imagem Termográfica do interior da câmara de aquecimento. . . . .	51
Gráfico 1 – Resposta ao degrau do sistema primeira ordem. . . . .	23
Gráfico 2 – Comparação da resposta experimental com a simulada. . . . .	50
Gráfico 3 – Sintonia PI do controlador digital. . . . .	50
Gráfico 4 – Distribuição da temperatura na canaleta do miniforno. . . . .	52
Gráfico 5 – Múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento do miniforno elétrico. .	53
Gráfico 6 – Desempenho em regime permanente do miniforno para diversos patamares de temperatura. . . . .	54

## Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrônimos

A/D	Analógico-Digital
API	<i>Application Programming Interface</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPGEI	Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
Cr	Cromo
D/A	Digital-Analógico
EDOL	Equação Diferencial Ordinária Linear
FET	<i>Field-Effect Transistor</i>
FOTON	Laboratório de Fotônica da UTFPR
IDE	Integrated Development Environment
IHM	Interface Homem Máquina
JBT	<i>Junction Bipolar Transistor</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
Ni	Níquel
OS	Operational System
PI	Proporcional-Integral
PWM	Pulse Width Modulation
RC	Resistor-Capacitor
RFBG	Regenerated Fibber Bragg Grating
SE	<i>Software Embarcado</i>
SLIT	Sistema Linear Invariante no Tempo
SWI	<i>Software Interruption</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZOH	Segurador de Ordem Zero

## Lista de Símbolos

$V_{GS}$	Tensão porta-fonte
$V_{GS(th)}$	Tensão de limiar porta-fonte
$R_{DS(on)}$	Resistência de dreno-fonte em saturação
$R_{D(Load)}$	Resistência conectada ao terminal de dreno
$emf_{Seebeck}$	Força eletromotriz gerado pelo efeito Seebeck
$G(s)$	Função de transferência do sistema
$C(s)$	Transformada de Laplace de saída sistema
$U(s)$	Transformada de Laplace de entrada sistema
$s$	Frequência complexa da transformada de Laplace
$K_e$	Ganho estacionário
$\tau$	Constante de tempo do sistema
$e(t)$	Sinal de erro atuante no domínio contínuo de tempo
$r(t)$	Sinal de referência no domínio contínuo tempo
$D(s)$	Compensador no domínio da frequência contínua
$H(s)$	Sensor no domínio da frequência contínua
$b(t)$	Sinal de realimentado no domínio contínuo de tempo
$t_d$	Tempo de atraso
$t_r$	Tempo de subida
$t_p$	Tempo de pico
$t_s$	Tempo de acomodação
$e_{ss}$	Erro em regime estacionário
$Ta$	Período de amostragem
$R^2$	Coefficiente de correlação

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	ESTADO DA ARTE	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	REVISÃO DOS COMPONENTES DO HARDWARE DO CONTROLE	17
2.1.1	Chave Eletrônica	17
2.1.2	Sensor Termopar	18
2.1.3	Transdutor de Temperatura	19
2.1.4	Especificações de <i>Hardware</i> do Microcontrolador	19
2.2	SISTEMAS DE CONTROLE AUTOMÁTICO	20
2.2.1	Modelagem Matemática de Sistemas de Controle	20
2.2.2	Função de Transferência	20
2.2.3	Função de Transferência de Sistemas de Primeira Ordem	21
2.2.4	Sistema de primeira ordem com malha de realimentação	23
2.2.5	Compensador Proporcional-Integral	26
2.2.6	Digitalização	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
3.1	FABRICAÇÃO DO MINIFORNO	30
3.2	HARDWARE E <i>Software</i> DE CONTROLE	36
3.2.1	Circuito de Aquisição de Temperatura	37
3.2.2	Circuito de Potência	38
3.2.3	<i>Software</i> Embarcado (SE)	40
3.2.3.1	Sistema Básico	40
3.2.3.2	Sistema Operacional (OS)	40
3.2.3.3	<i>Thread</i> Recepção	42
3.2.3.4	Interrupção de <i>Software</i> (SWI) Amostragem	42
3.2.3.5	<i>Thread</i> Controle	44
3.2.3.6	<i>Thread</i> Transmissão de Dados	44
3.2.4	Interface Homem Máquina (IHM)	44
3.3	DETERMINAÇÃO DOS GANHOS DO CONTROLADOR PI	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>49</b>
4.1	OBTENÇÃO DOS GANHOS DO COMPENSADOR	49
4.2	DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA	51
4.3	AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE	52
4.4	DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE	54

4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	54
4.6	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	55
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>56</b>

## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

Este capítulo irá apresentar uma visão global da pesquisa, incluindo: importância e justificativa da escolha do tema, delimitações do assunto, objetivos da pesquisa e estrutura do trabalho.

### 1.1 ESTADO DA ARTE

Sensores e atuadores modernos são, em geral, projetados com mais satisfação. Para tanto, a utilização de maquinários necessários à fabricação destes dispositivos precisam ser desenvolvidos ou remodelados com características específicas. Nesse contexto, uma subcategoria de equipamento ganha destaque nesta dissertação: os minifornos, normalmente empregados em áreas de sintetização de materiais (JIN et al., 2012) e de revestimento de componentes (YOO et al., 2014), p.ex.. Contudo, o seu uso também é requerido na área de manufatura de dispositivos em fibra ótica, principalmente, na fabricação de dispositivos como: redes de Bragg regeneradas em fibra Ótica (RFBG) (FOKINE, 2002) (CANNING et al., 2009) (CANNING et al., 2008), *tappers* em fibra ótica (BENGAL, 1991) e acopladores óticos (JONES, 1965), entre outros.

Tomando como exemplo a fabricação de RFBG, o uso de fornos convencionais não é apropriado, pois estes aquecem a região de interesse (normalmente um trecho de 4 – 5 mm de comprimento (OLIVEIRA et al., 2015)) e mais um trecho adicional de fibra (que dependendo do forno pode chegar a dezenas de centímetros). Esse “trecho adicional aquecido” acaba sendo um problema, pois quando a fibra ótica é exposta a longos períodos de tempo (na ordem de dezenas de minutos) a uma temperatura de  $\sim 1000^\circ\text{C}$  em atmosfera não controlada (condições normalmente encontradas no processo de fabricação da RFBG (FOKINE, 2002) (CANNING et al., 2009)) a sua superfície é

fragilizada. Como consequência, o manuseio e a instalação dessa fibra passa a ser um desafio mesmo mediante técnicas especializadas de encapsulamento (CORADIN et al., 2013) (DREYER et al., 2013).

A função do miniforno apresentado neste trabalho é a de fornecer uma solução otimizada na fabricação de dispositivos em fibra ótica que demandam tratamento térmico em temperaturas elevadas. Para tanto, otimizou-se a câmara de aquecimento do miniforno, desenvolveu-se um controlador digital específico e implementou-se uma interface homem máquina (IHM) com recursos de plotagem de gráficos e lista de comandos.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve o objetivo primordial o desenvolvimento de um miniforno capaz de confinar a maior parcela do calor numa região milimétrica mesmo quando a temperatura na câmara de aquecimento for de aproximadamente 1000 °C.

- Fabricar o miniforno;
- Projetar o *Hardware* (circuito de potência e aquisição) do controlador do miniforno;
- Desenvolver uma interface homem máquina (IHM) com recursos de plotagem e monitoração durante a operação do miniforno;
- Codificar o *software* embarcado no microcontrolador para controle do miniforno e transferência de dados com IHM;

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em: Fundamentação Teórica, Metodologia e Resultados e Discussões.

No capítulo de Fundamentação Teórica é feita uma breve explicação do princípio de funcionamento dos componentes mais críticos no desenvolvimento do *hardware* de controle. Por fim, detalha-se as teorias de controle clássico e digital utilizadas na obtenção do controlador digital.

Na Metodologia são apresentadas a fabricação do miniforno e o seu *hardware* controle: circuito de potência e aquisição, também são detalhados os *softwares* desenvolvidos neste projeto: *software* embarcado e interface homem e máquina (IHM). Por



último, detalha-se o processo de determinação dos ganhos do controlador proporcional-integral (PI).

No último capítulo dessa dissertação (Resultados e Discussões), apresenta-se os resultados obtidos na obtenção dos ganhos proporcional-integral (PI) do controlador do miniforno, dos ensaios de: distribuição térmica, de repetibilidade e de resposta em regime permanente. Por fim, encerra-se o capítulo com a discussão dos principais resultados e trabalhos futuros que mais para frente possam ser feitos com o miniforno.

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão descritos os componentes de *hardware* e os conceitos utilizados da teoria controle clássica e digital de sistemas físicos.

### 2.1 REVISÃO DOS COMPONENTES DO HARDWARE DO CONTROLE

Nesta seção será feita uma revisão sobre os principais componentes de hardware embarcados no controlador do miniforno elétrico, também são apresentadas as principais especificações do microcontrolador utilizado.

#### 2.1.1 Chave Eletrônica

O uso de chaves eletrônicas no controle de potência de cargas é amplamente difundido. Neste contexto, o uso do transistor de efeito campo de metal-óxido-semicondutor do tipo intensificação (MOSFET) de canal N ganha destaque.(MALVINO; BATTES, 2007)

No chaveamento de potência opera-se o MOSFET somente nas regiões de saturação e corte, pois é maneira mais eficiente de controlá-lo. A saturação ocorre no momento que as seguintes condições são alcançadas: tensão porta-fonte  $V_{GS}$  possui valor superior a tensão de limiar porta-fonte  $V_{GS(th)}$  e a resistência de dreno-fonte, quando transistor está conduzindo  $R_{DS(on)}$  é centenas de vezes menor que a resistência conectada ao terminal de dreno  $R_{D(load)}$ . Atingidas essas condições, a corrente de dreno e a tensão em  $R_{D(load)}$  são maximizadas. O corte ocorre quando  $V_{GS}$  possui valor inferior a  $V_{GS(th)}$ , resultando, numa corrente de dreno próxima de zero (circundo apenas a corrente de fuga no terminal dreno-fonte).(MALVINO; BATTES, 2007)

Optou-se por um transistor de efeito campo (FET) em comparação ao uso de transistores bipolares de junção (JBT); pois o FET, normalmente, opera com um *driver*

relativamente simples na ativação por tensão e também o seu tempo de desligamento, que é quando passa da condição de saturação para corte, ser de dezenas até centenas de vezes menor que o JBT.(MALVINO; BATTES, 2007)

A escolha de MOSFET ao invés de JFET é pelo fato do primeiro não precisar de um *driver* de corrente para adequar o sinal vindo do controlador digital. Por fim, a escolha de MOSFET intensificação ao invés MOSFET de depleção foi por uma questão de segurança, pois na ausência de  $V_{GS}$ , que no chaveamento discreto é o sinal de controle, a corrente de dreno é máxima no MOSFET intensificação (gerando alta potência na carga) e mínima no modelo depleção.(MALVINO; BATTES, 2007)

### 2.1.2 Sensor Termopar

O sensor termopar é um dos sensores elétricos mais utilizados na termometria. Este tipo de sensor gera uma tensão proporcional à temperatura, que é resultado do efeito *Seebeck*. Descreve-se esse efeito como a diferença do potencial elétrico interno entre terminais do termopar ou como a força eletromotriz ( $emf_{Seebeck}$ ) vista externamente entre terminais do termopar. (REED, 1993)

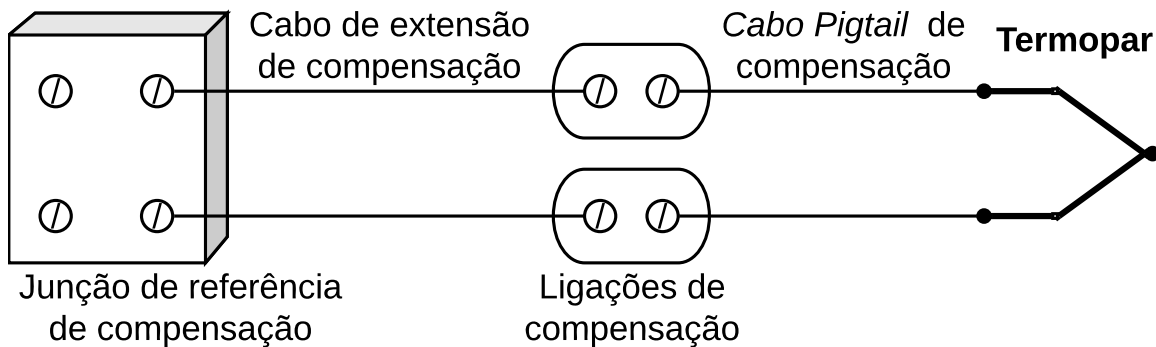
A origem da  $emf_{Seebeck}$  não é devido a junção entre diferentes materiais condutores elétricos (como normalmente se pensa), mas do resultado da não conformidade térmica destes materiais. A  $emf_{Seebeck}$  se origina nas pernas dos termopares mesmo estes não estando conectados a nenhum circuito elétrico.(REED, 1993)

Teoricamente, o termopar consiste de dois condutores de materiais diferentes acoplados por uma junção num determinado ponto. No entanto, os termopares práticos são fabricados com uma série de elementos adicionais: *pigtails*, extensões de comprimento, terminais, conectores e outros. O resultado é que esses elementos extras são inseridos no circuito termoelétrico e passam a contribuir com a  $emf_{Seebeck}$ . (HERZKOVITZ, 1993)

Na Figura 1 é apresentado o modelo prático do sensor termopar tipo K. Este é composto por cabos, ligações e junções de compensação e um termopar que, neste caso, é composto de duas ligas: no polo positivo níquel (Ni) com 10 % de cromo (Cr) e no polo negativo Ni com 5 % de alumínio e silício. Estas ligas nos polos do termopar K, permite que este opere numa faixa de temperatura de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Os valores  $emf_{Seebeck}$  para estas temperaturas são  $-5,89\text{ mV}$  e  $51,00\text{ mV}$ . (BURNS, 1993)

<sup>1</sup> Valor que pode variar dependendo do diâmetro do cabo  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$  (0,25 mm) até  $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2,5 mm)

Figura 1 – Modelo prático de um sensor termopar tipo K.



Fonte: Adaptado de (HERZKOVITZ, 1993).

### 2.1.3 Transdutor de Temperatura

O dispositivo utilizado para tratar os sinais advindos do termopar tipo K é um transdutor de temperatura programável Tx-Block da marca Novus<sup>®</sup>. A sua programação consiste em escolher qual sensor de temperatura vai ser utilizado (e.g. termopar K,E e o sensor PT-100) e qual a faixa de temperatura em que se deseja operar. A saída do Tx-Block é um sinal de corrente que varia de 4 mA (temperatura mais baixa programada) até 20 mA (temperatura mais alta programada), que é uma faixa de valores muito utilizada no projeto de sensores.

### 2.1.4 Especificações de *Hardware* do Microcontrolador

Neste projeto foi utilizado o microcontrolador LPC 1768<sup>®</sup> da Mbed<sup>®</sup>. Este tem algumas de suas especificações de *hardware* listadas abaixo:

- 1 unidade central de processamento (CPU) que opera na frequência de 100 MHz;
- 1 porta de comunicação USB 2.0 com interface RS-232;
- 8 conversores analógico/digital<sup>2</sup>(A/D) de 12-bits em 200 kHz;
- 6 conversores digital/analógico<sup>3</sup>(D/A);

<sup>2</sup> São dispositivos que convertem palavras digitais do computador para um nível de tensão.(FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

<sup>3</sup> São dispositivos que convertem um nível de tensão de um sensor para uma palavra digital usável pelo computador digital.(FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

- 6 saídas moduladas em largura de pulso<sup>4</sup>(PWM);

## 2.2 SISTEMAS DE CONTROLE AUTOMÁTICO

O sistema de controle automático tem como objetivo aferir a variável do processo (e.g. pressão, temperatura, tensão elétrica entre outros) e corrigi-la (ou limita-la) para que esta não se afaste do valor desejado (*setpoint*). (OGATA, 2011b)

Nos próximos itens dessa seção serão apresentados os principais conceitos utilizados para desenvolver o sistema de controle deste projeto.

### 2.2.1 Modelagem Matemática de Sistemas de Controle

O primeiro passo no projeto do sistema de controle é obtenção do modelo matemático. Este (normalmente definido por um conjunto de equações) deve ser capaz de descrever todas as características dinâmicas do sistema ou do objeto a ser controlado.

Um sistema de controle pode ser descrito por diversos modelos matemáticos, sendo assim, a decisão de qual modelo utilizar deve levar em consideração o tipo do sistema e a análise que se deseja fazer. Por exemplo, se há interesse em determinar a resposta em regime transitório e regime permanente de um sistema linear invariante no tempo (SLIT) de única entrada e saída, a representação por função de transferência é uma das mais indicadas. (OGATA, 2011c)

### 2.2.2 Função de Transferência

A função transferência representa a relação entre a entrada e a saída de um sistema (e.g. sistema elétrico, pneumático, hidráulico, térmico entre outros), desde que este possa ser descrito por meio de uma equação diferencial ordinária linear (EDOL) (OGATA, 2011c). Se atendida esta condição o SLIT é representado pela Equação 1.

$$a_0c^n + a_1c^{n-1} + \dots + a_{n-1}c + a_n = b_0u^m + b_1u^{m-1} + \dots + b_{m-1}u + b_mu \quad (n \geq m) \quad (1)$$

<sup>4</sup> PWM é uma técnica para gerar sinais analógicos por meios digitais. Isto é feito por meio de um controlador digital que gera um sinal de liga-desliga, este sinal simula valores de tensões entre 3,3V (neste microcontrolador) e 0V ao mudar a porção do tempo que o sinal fica ligado (*duty-cycle*) versus o tempo que fica desligado. (HIRZE, 2018)

Sendo que:

$a_0, \dots, a_{n-1}, a_n$  - são constantes associadas aos componentes de saída do sistema;

$b_0, \dots, b_{n-1}, b_n$  - são constantes associadas aos componentes de entrada do sistema;

$c$  - saída do sistema;

$u$  - entrada do sistema;

$m$  - derivada de maior ordem na saída do sistema;

$n$  - derivada de maior ordem na entrada do sistema;

A partir da Equação 1 e admitindo que condições iniciais do sistema são iguais a zero (partindo do repouso), este tem a sua função de transferência dada pela Equação 2.

$$G(s) = \left. \frac{\mathcal{L}[saida]}{\mathcal{L}[entrada]} \right|_0 = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2)$$

Sendo:

$G(s)$  - função de transferência do sistema;

$\mathcal{L}$  - operador de Laplace;

$C(s)$  - transformada de Laplace de saída sistema;

$U(s)$  - transformada de Laplace de entrada sistema;

$s$  - frequência complexa da transformada de Laplace;

$m$  - zero de maior ordem do sistema;

$n$  - polo de maior ordem do sistema;

Na modelagem das características dinâmicas de um sistema, é possível que este apresente uma função transferência relativamente complexa (com diversos polos e zeros), mas também é possível que este apresente somente um polo (e.g. circuitos resistor-capacitor (RC), certos sistemas térmicos entre outros) neste caso é dito que o sistema é de primeiro ordem. (OGATA, 2011c)

### 2.2.3 Função de Transferência de Sistemas de Primeira Ordem

Sistemas de primeira ordem são aqueles com a função de transferência mais simples encontrados na prática. Estes têm a sua função transferência dada pela

Equação 3.(OGATA, 2011a)

$$G(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K_e}{\tau_e s + 1} \quad (3)$$

Sendo que:

$K_e$  - ganho estacionário<sup>5</sup>;

$\tau$  - constante de tempo do sistema<sup>6</sup>;

Caso  $G(s)$  não seja conhecido é possível determiná-lo de maneira experimental. Para tanto, basta analisar  $C(s)$  quando utilizado um sinal  $U(s)$  conhecido (e.g. sinais no domínio do tempo do tipo degrau, rampa ou impulso). (OGATA, 2011a)

A escolha do  $U(s)$  mais adequado para determinar os parâmetros de  $G(s)$  é decidida com base no sinal de entrada que o sistema será submetido com maior frequência. Por exemplo, se a entrada do sistema de controle variar gradualmente, então a rampa em função do tempo é opção adequada, porém se a entrada variar bruscamente de um patamar para outro, a função degrau no tempo é mais indicada.(OGATA, 2011a)

Seguimos com a análise de  $C(s)$  quando aplicado uma entrada degrau de amplitude ( $U(s) = A/s$ ) num sistema de primeira ordem. Neste caso,  $C(s)$  é representado pela seguinte Equação 4.

$$C(s) = \frac{K_e}{\tau \cdot s + 1} U(s) = \frac{K_e}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{A}{s} \quad (4)$$

Onde  $A$  é amplitude da entrada degrau. Utilizando a transformada inversa de Laplace na Equação 4 temos que a saída do sistema no domínio do tempo ( $c(t)$ ) é dada pela Equação 5.

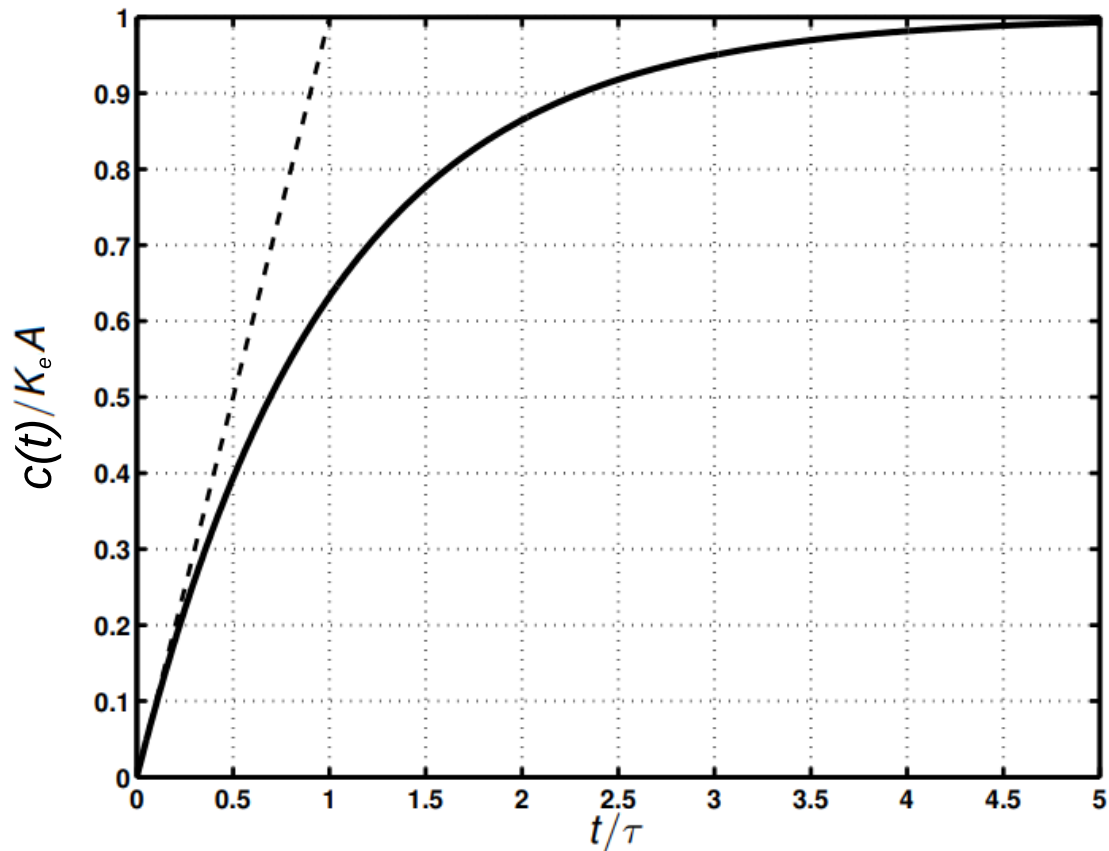
$$c(t) = K_e A (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

O Gráfico 1 apresenta o comportamento da saída adimensional  $c(t)/K_e A$  versus a o tempo adimensional  $t/\tau$ . Neste gráfico, observa-se que após  $5\tau$  o sistema de primeira ordem atinge o seu valor final e este fica em equilíbrio.

<sup>5</sup> Definido como a razão entre os valores finais da resposta e de uma determinada entrada considerada

<sup>6</sup> Indica a rapidez com que a resposta do sistema reage a uma perturbação em uma certa entrada

Gráfico 1 – Resposta ao degrau do sistema primeira ordem.



Fonte: Adaptado de (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989).

#### 2.2.4 Sistema de primeira ordem com malha de realimentação

Após modelagem matemática do sistema que se deseja controlar, convém decidir se este vai ser realimentado ou não.

No controle sem realimentação, ou malha aberta, o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Sendo assim, a precisão daquele depende exclusivamente da sua calibração. Na presença de distúrbios<sup>7</sup> o controle de malha aberta não vai alcançar o valor desejado. (OGATA, 2011b)

No controle com realimentação (malha fechada) o sinal de erro atuante ( $e(t)$ ), que é a diferença entre o sinal entrada ( $r(t)$ ) e o sinal de realimentação ( $b(t)$ ), é reinserido no controlador. Desta maneira, o erro é minimizado (ou até mesmo anulado) e a saída do sistema (variável do processo) atinge o valor desejado (*setpoint*). Em suma, o uso de malha fechada num sistema é recomendado quando: este é afetado por distúrbios e/ou

<sup>7</sup> Sinal que tende afetar de maneira adversa a resposta do sistema



precisar de regulagem periódica para manter a qualidade e/ou precisar de uma resposta mais rápida. (OGATA, 2011b)

Um exemplo de sistema realimentado é visto no diagrama de blocos<sup>8</sup> da Figura 2. Neste a transformada de Laplace da saída ( $C(s)$ ) e da entrada referência ( $R(s)$ ) se relacionam conforme a Equação 6:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} \quad (6)$$

Sendo:

$G(s)$  - função da transferência da planta;

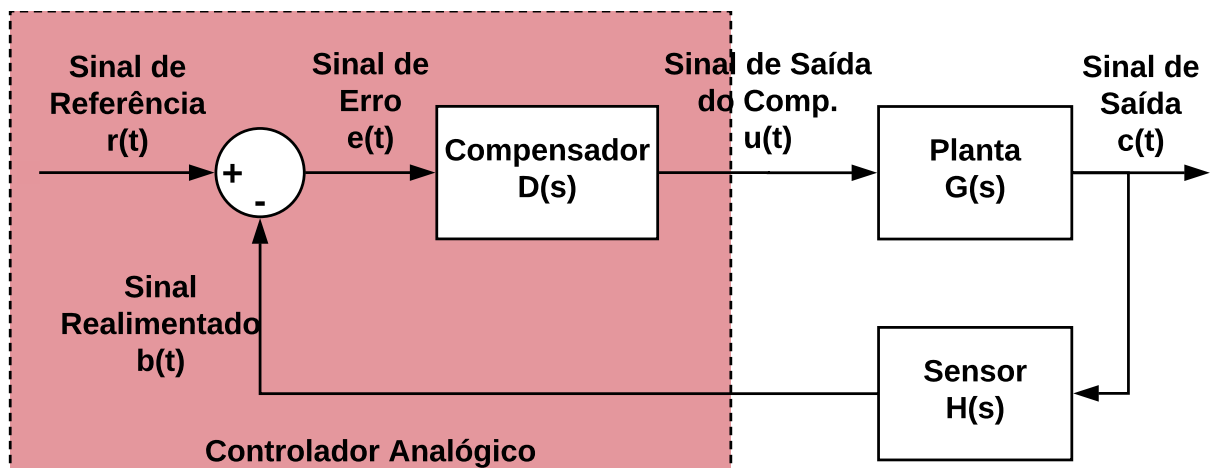
$e(t)$  - sinal de erro atuante no domínio tempo contínuo;

$r(t)$  - sinal de referência no domínio tempo contínuo;

$D(s)$  - função da transferência do compensador;

$H(s)$  - função da transferência do sensor;

Figura 2 – Diagrama de blocos de sistema de controle com malha de realimentação



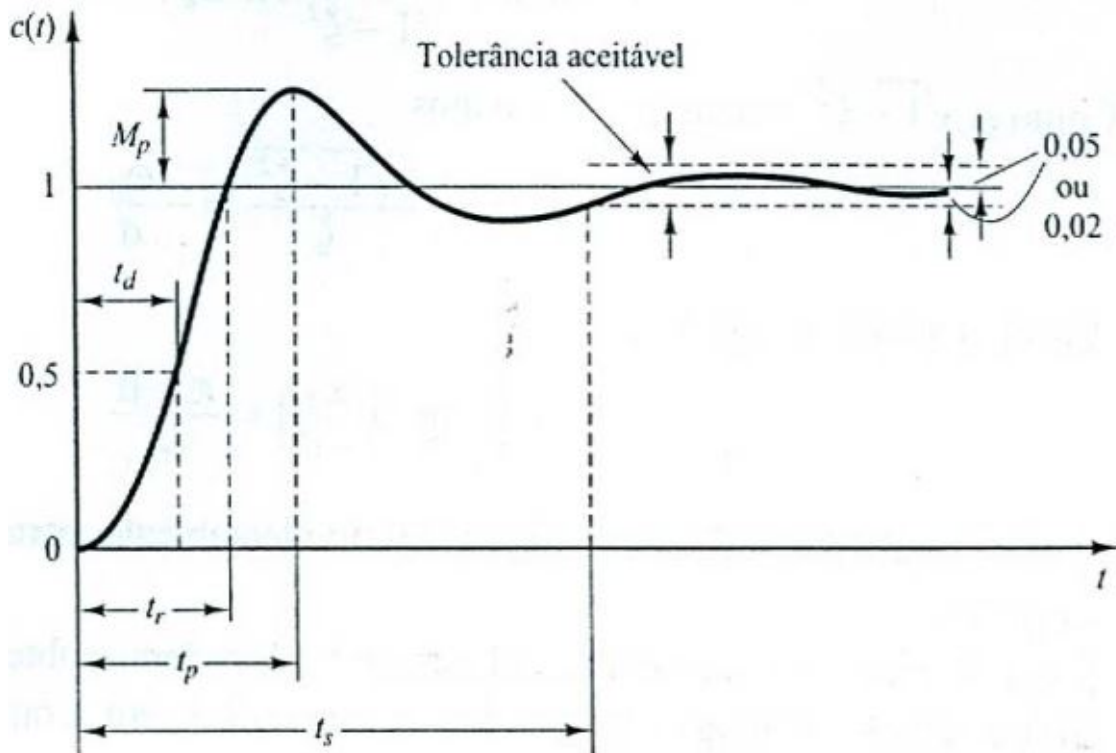
Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011b).

Uma vez obtidos os parâmetros da Equação 6 para o sistema de controle desejado, tem-se como próximo passo analisar a resposta em regime transitório e permanente do mesmo, essas devem atender a determinadas especificações de desempenho<sup>9</sup>. Dentre estas

<sup>8</sup> Representação gráfica que visa facilitar a visualização do relacionamento entre entradas e saídas dos diversos componentes que compõe o sistema. (OGATA, 2011b)

especificações as mais utilizadas na prática são vistas na Figura 3 e são listadas a seguir:

Figura 3 – Parâmetros dinâmicos da resposta de um sistema de controle de malha fechada.



Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011a).

- Tempo de atraso,  $t_d$ : é definido como o tempo necessário para que a resposta alcance metade do valor final pela primeira vez;
- Tempo de subida,  $t_r$ : é definido como o tempo necessário para que a resposta passe de 10% a 90% do seu valor final (esta faixa pode variar de 5 a 95% ou de 0 a 100% em situações mais críticas);
- Tempo de pico,  $t_p$ : é definido como o tempo necessário para que a resposta alcance o primeiro pico de sinal;
- Máximo sobressinal (*overshoot*),  $M_p$  (em percentual): é o valor máximo de pico da curva resposta;

<sup>9</sup> Estas especificações são, frequentemente, dadas em termos da resposta do sistema quando neste é aplicado uma entrada degrau no tempo sob condições iniciais nulas(OGATA, 2011a)

- Tempo de acomodação,  $t_s$ : é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores de 2% até 5% em torno do valor final;
- Erro em regime estacionário,  $e_{ss}$ : é a diferença entre o valor em regime permanente da resposta e o valor *setpoint*.

Contudo, as especificações de desempenho não devem ser mais restritivas do que necessário, pois estas exigirão componentes mais dispendiosos (e.g. sensores e atuadores mais precisos) que nem sempre agregam melhorias notáveis. (OGATA, 2011b)

### 2.2.5 Compensador Proporcional-Integral

Na seção anterior foi apresentado o digrama (Figura 2) de um sistema de controle em malha fechada com o compensador ( $D(s)$ ). Este pode ser qualquer dispositivo que modifique o comportamento dinâmico do sistema de maneira a fazer com que este cumpra a determinadas especificações do projeto de controle (e.g. tempo subida, *overshoot*, erro estacionário entre outros). Entre os compensadores, destaca-se o compensador proporcional-integral (PI), que é composto pelas ações proporcional e integral. (OGATA, 2011b)

A ação proporcional funciona como um amplificador de sinal com ganho ajustável. Esta ação fornece um ganho de energia conforme Equação 7. (OGATA, 2011c)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (7)$$

Sendo que  $K_p$  é o ganho proporcional. O revés da ação proporcional é que ela sozinha não é capaz de extinguir o erro estacionário ( $e_{ss}$ ) do sistema de controle quando este é submetido a uma entrada degrau no tempo. Na Equação 8, observa-se que quanto maior  $K_p$  é  $e_{ss}$ . Contudo, um valor de  $K_p$  elevado gera um sobre sinal muito acima do permitido para maioria dos projetos de controle. (OGATA, 2011a)

$$e_{ss} = \frac{1}{K_p + 1} \quad (8)$$

A ação integral também funciona como amplificador de ganho ajustável, mas diferentemente da ação proporcional o seu ganho é regulado pelos valores anteriores da

sua própria ação. Esta ação é descrita conforme a Equação 9. (OGATA, 2011c)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

Sendo que  $K_p$  é o ganho integral. A principal vantagem da ação integral se comparado ao proporcional é de que o erro estacionário  $e_{ss}$  ser igual zero. Entretanto, ao utilizar somente a ação integral na malha de controle é possível que ou o tempo de acomodação  $t_s$  seja elevado ou o sistema se torna instável<sup>10</sup>. (OGATA, 2011a)

Ao combinarmos as ações proporcional e integral (gerando o compensador PI), obtêm-se as vantagens destas e nenhuma desvantagem, já que uma ação complementa outra. O controlador PI definido pela Equação 10 funciona para uma gama de sistemas de controle que não necessitam de uma velocidade de resposta elevada<sup>11</sup>. (OGATA, 2011a)

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

### 2.2.6 Digitalização

Até o momento foi abordado o desenvolvimento de sistemas de controle no domínio do tempo contínuo. Neste domínio somente os controladores analógicos que possam integrar e diferenciar sinais (e.g. circuitos com amplificadores operacionais) são capaz de utilizar o equacionamento até agora apresentado. Desta maneira, para utilizar computador digital (e.g. microcontrolador) no controle de uma malha fechada é necessário aproximar as equações diferenciais para equações de diferenças que envolvam somente adição, subtração, multiplicação e divisão. (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

O diagrama da Figura 4 representa um sistema em malha fechada com um controlador digital. Este é composto pelos blocos: conversor analógico-digital (A/D), amostrador, *clock*, conversor digital-analógico (D/A), segurador de ordem zero (ZOH) e compensador digital ( $D(z)$ ).

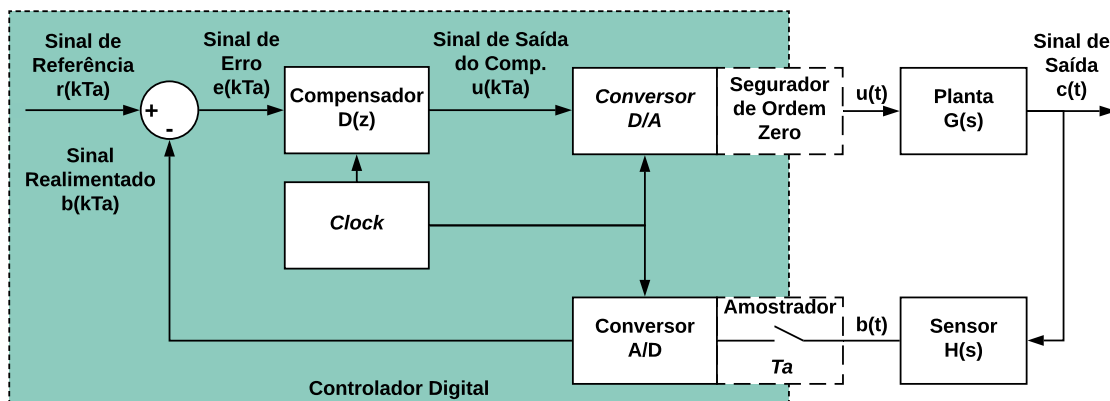
Iniciando análise dos blocos do controlador digital temos: o amostrador e conversor A/D. Estes convertem o sinal analógico  $b(t)$  para o sinal discreto quantizado (sinal

<sup>10</sup> Na tentativa de melhorar  $t_s$  a resposta do sistema poderá oscilar com valores de amplitudes cada vez maiores. (OGATA, 2011a)

<sup>11</sup> Se a resposta for lenta para os requisitos do sistema é necessário então adicionar a ação derivativa para corrigir a taxa erro e permitir valores mais elevados de ganho. (OGATA, 2011a)

digital)  $b(kTa)$  a cada  $Ta$  segundos ( $k$  é um número inteiro e  $Ta$  é o período de amostragem). Em seguida,  $b(kTa)$  é subtraído do sinal de referência ( $r(kTa)$ ) resultando no sinal erro ( $e(kTa)$ ), que é a entrada do compensador  $D(z)$ . Este é representado pela transformada Z, pois a transformada de Laplace não opera com sinais discretos e a transformada inversa Z resulta num conjunto de equações diretamente programável no controlador digital. (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

Figura 4 – Digrama de blocos de sistema de controle digital com malha de realimentação.



Fonte: Adaptado de (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

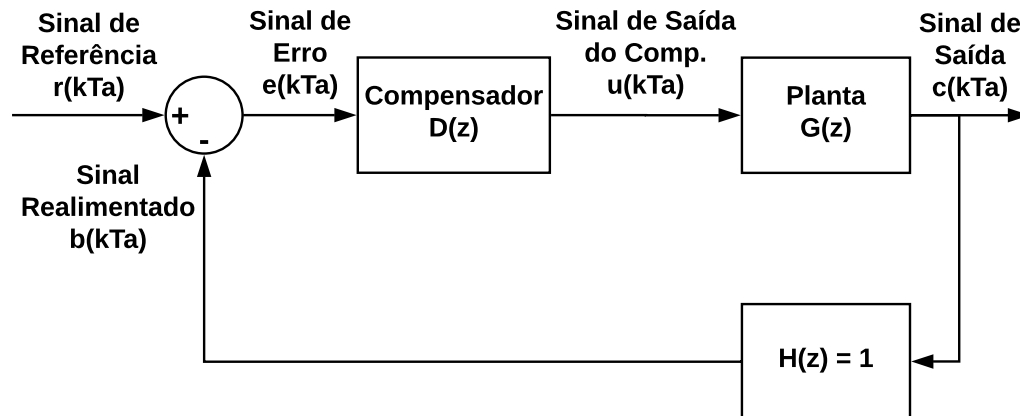
A saída do compensador digital ( $u(kTa)$ ) precisa passar o domínio do tempo contínuo para se tornar a entrada de  $G(s)$ . Este processo é feito pelos blocos conversor D/A e ZOH (mantém a mesma tensão durante todo período de amostragem).

Para encontrar as equações de diferenças de  $D(z)$  existem duas técnicas básicas: o equivalente discreto e o projeto discreto. O equivalente discreto consiste em projetar um compensador  $D(s)$  usando os métodos de controle clássico, então, aproximar  $D(s)$  usando um método discretização. A segunda técnica, projeto discreto, consiste em determinar as equações de diferenças diretamente (sem projetar  $D(s)$  inicialmente). (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

No projeto discreto é possível simplificar o diagrama da Figura 4 pelo Figura 5, para tanto é preciso encontrar função de transferência discreta da parte contínua. No caso de  $G(s)$  o seu equivalente discreto é dada pela Equação 11.

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left( \frac{G(s)}{s} \right) \quad (11)$$

Figura 5 – Digrama de blocos de sistema de controle digital com malha de realimentação



Fonte: Adaptado de (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

Uma vez obtido  $G(z)$ , o projeto de compensadores discretos muito se assemelha a dos compensadores analógicos, na realidade, as mesmas ideias podem ser aplicadas no projeto discreto. Sendo assim, a função transferência no domínio discreto do diagrama da Figura 5 é dada pela Equação 12. (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013)

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{D(z)G(z)}{1 + D(z)G(z)H(z)} \quad (12)$$

A fim de implementar as ações proporcional e integral no compensador  $D(z)$ , basta utilizar a Equação 13 para ação proporcional e a Equação 14 para ação integral.

$$u_p(kTa) = K_p e(kTa) \quad (13)$$

$$u_i(kTa) = u(kTa - Ta) + \frac{K_i}{T} e(k) \quad (14)$$

Uma vez que as ações proporcional e integral sejam colocadas em série, obtém-se o compensador PI. Este compensador foi o escolhido para controlar a temperatura na câmara de aquecimento do miniformo.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos empregados na fabricação do miniforno, no projeto hardware e *software* embarcado (SE) de controle, no desenvolvimento interface homem máquina (IHM) e na obtenção dos parâmetros de controle do miniforno.

#### 3.1 FABRICAÇÃO DO MINIFORNO

O processo de fabricação do miniforno com a base do seu revestimento externo. Esta foi feita com caixa em alumínio forjado sem tampa<sup>1</sup> de dimensões: 15 cm de comprimento, 15 cm de largura, 8,1 cm altura e 0,3 cm de espessura. Nesta base, fez-se três orifícios de  $\sim 7,5$  mm diâmetro e dois recortes de 10 mm de altura por 1,5 mm de largura. O resultado é apresentado no desenho da Figura 6.

O próximo passo foi fabricar o molde negativo da câmara de aquecimento e da canaleta (região passível de se acomodar a fibra ótica). Na Figura 7 é apresentado um desenho 3D do molde em náilon, este é uma junção de dois blocos que se interceptam no centro. O bloco delgado possui 150 mm de comprimento 10 mm de altura e 1,5 mm de largura. O bloco maior possui 10 mm de altura e largura por 60 mm de comprimento.

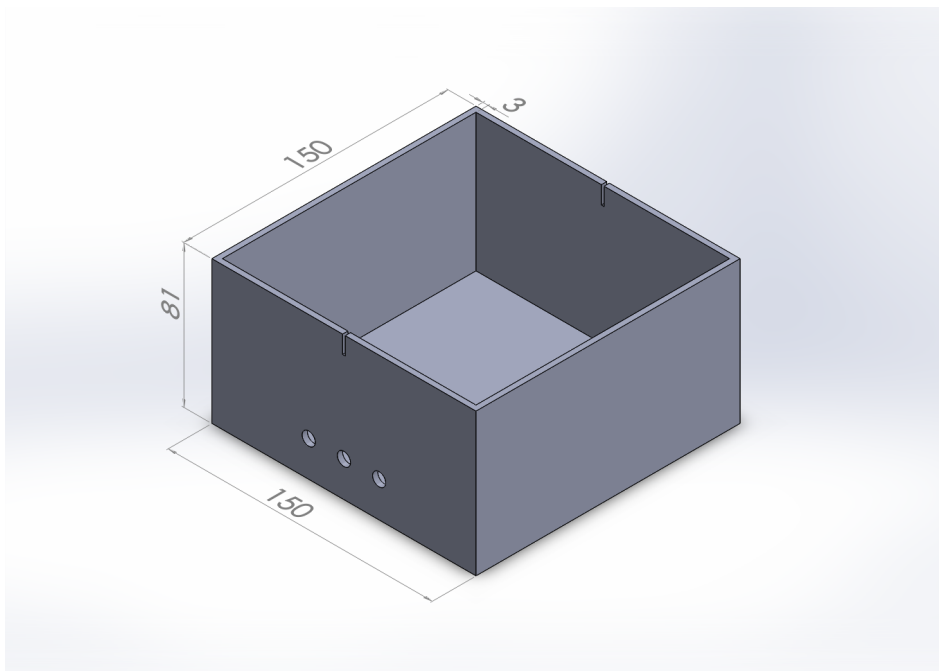
Na sequência, revestiu-se dois cilindros de aço inox<sup>2</sup>(7,5 mm de diâmetro por 140 mm de comprimento, conformados de maneira semelhante ao desenho da Figura 8) com um espaguete termo isolantes. Estes cilindros e mais um tubo flexível de látex (de mesmas dimensões que os cilindros em inox) são afixados à peça de náilon.

Logo após, lubrificou-se a peça de náilon e o tubo de látex com óleo comum. Estas mais os cilindros de inox foram posicionadas na caixa de alumínio conforme a Figura 9.

<sup>1</sup> A escolha por essas caixas se deu por estas fornecerem proteção contra choques mecânicos, facilidade no transporte e segurança no manuseio. A fácil aquisição, o baixo peso e custo ajudaram na escolha.

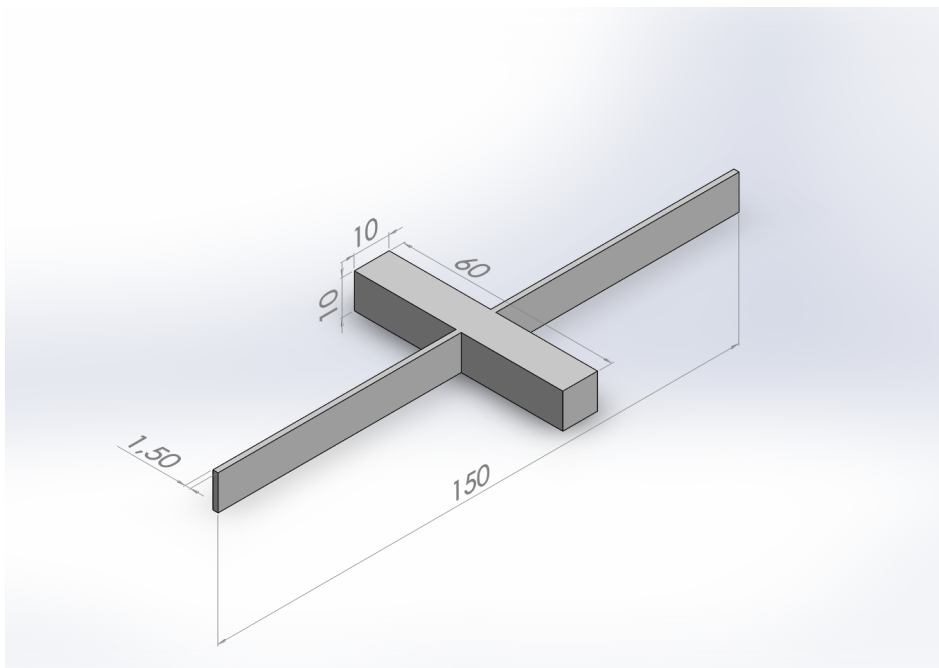
<sup>2</sup> Escolheu-se aço inoxidável devido este: suportar temperaturas na ordem de 1000 °C, apresentar resistividade elétrica muito baixa (comparada com a resistência elétrica), fácil usinagem e custo aceitável.

Figura 6 – Caixa de alumínio para proteção mecânica e molde para o concreto refratário.



Fonte: Autoria Própria.

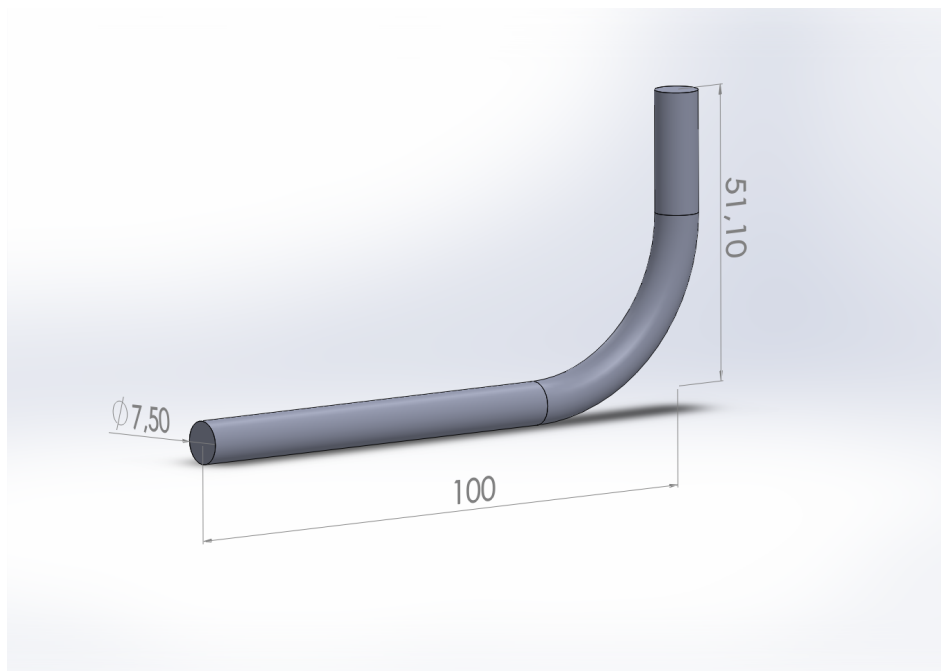
Figura 7 – Molde negativo da câmara interna e da canela do miniforno.



Fonte: Autoria Própria.

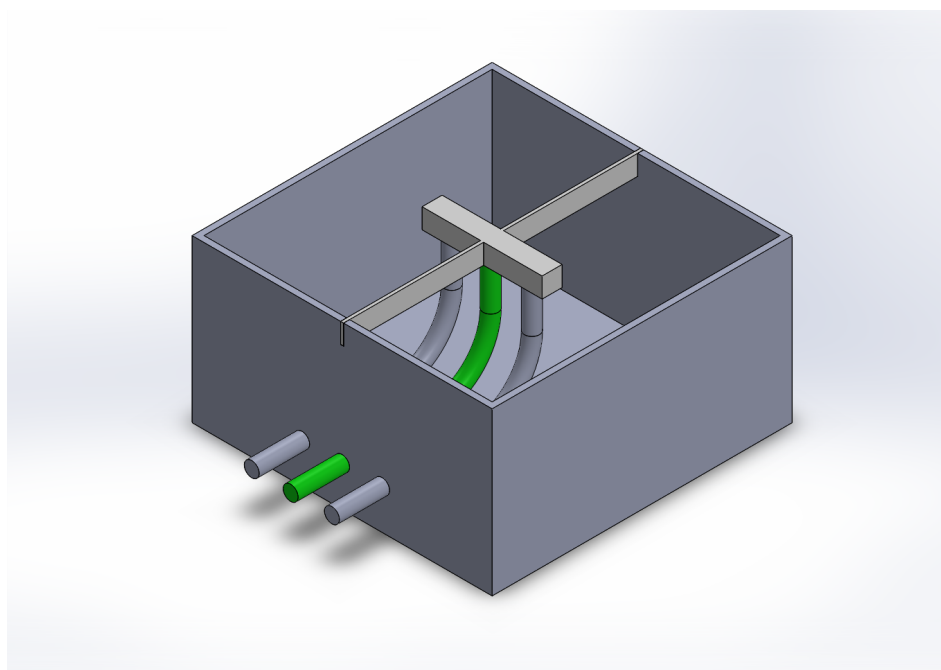


Figura 8 – Cilindro em aço inox responsável por conduzir energia e suporte mecânico para resistência elétrica.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 – Base do miniforno antes do lançamento do concreto.

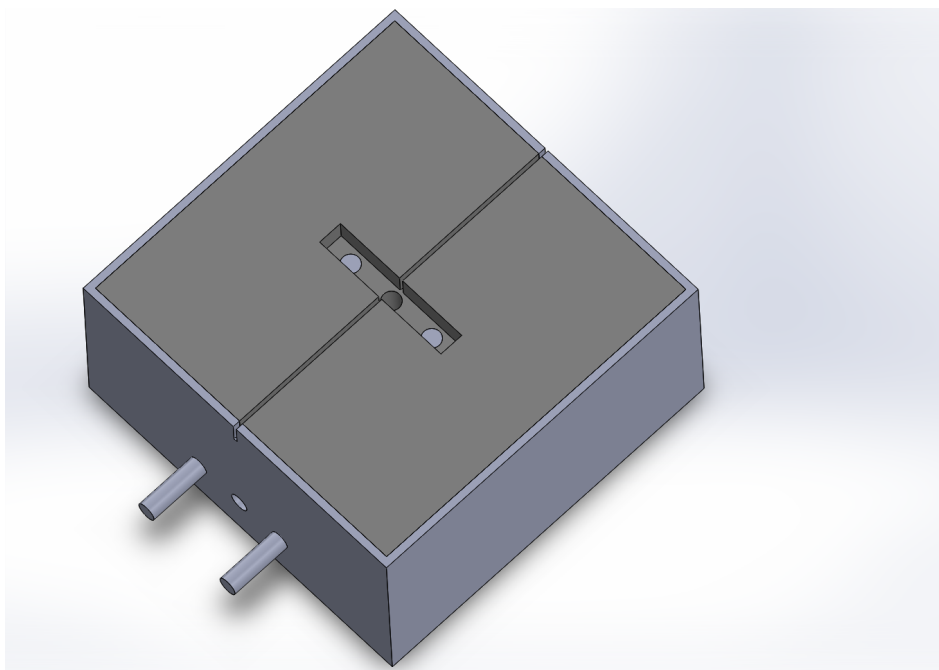


Fonte: Autoria Própria.

Na sequência, misturou-se concreto refratário da marca IBAR<sup>®</sup> (que tolera temperatura de até 1400 °C, com água (na proporção 8:2). A mistura foi lançada dentro da base do revestimento externo, provocou-se o adensamento através de vibração. Por fim, aguardou-se o processo de cura por aproximadamente 2 dias.

Após o processo de cura do concreto, removeu-se a peça de náilon e o tubo de látex. A remoção da peça de náilon gerou câmara de aquecimento e canaleta da fibra ótica, já a remoção do tubo de látex resultou na formação de conduíte para os cabos dos dois sensores de temperatura. O resultado é visto na Figura 10.

**Figura 10 – Base do miniforno depois da cura sem o molde de náilon e o tubo de látex.**



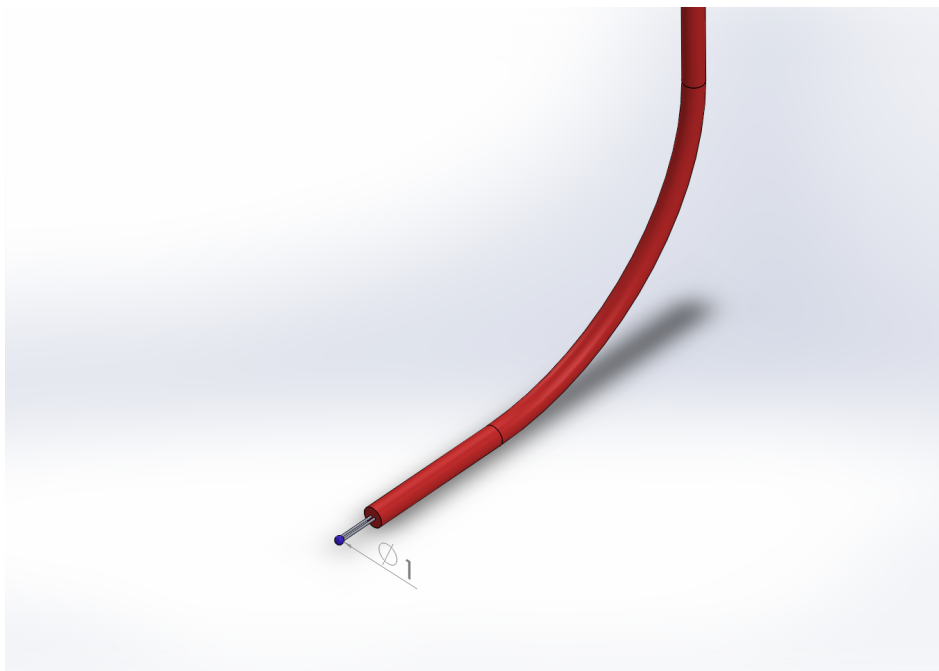
**Fonte: Autoria Própria.**

Na Figura 11 é apresentado o sensor temperatura, termopares tipo K (descritos na seção 2.1.2), a com uma extremidade esférica de 1 mm de diâmetro. O revestimento externo do sensor é um cabo 2,5 mm de espessura isolado por um tecido de fibra de vidro, que é capaz de suportar temperaturas acima dos 800 °C.

Por fim, iniciou-se a montagem final do miniforno na respectiva ordem:

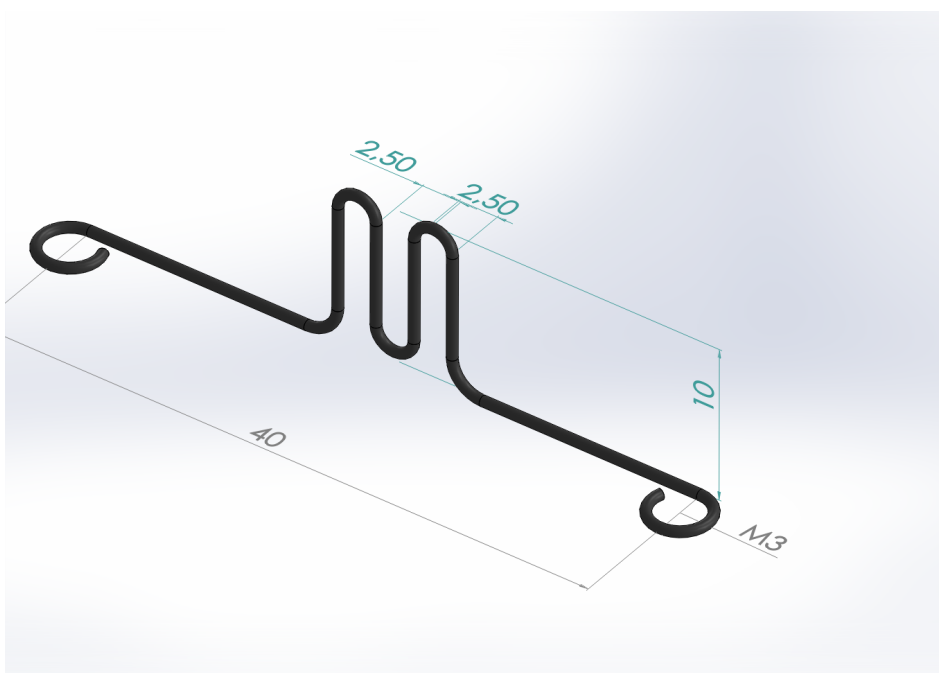
1. aparafusou-se a resistência NiCr (0,65 mm de diâmetro e 100 mm - não conformada) de formato semelhante ao da Figura 12 nos cilindros de inox (estes têm orifícios rosqueados de 3 mm diâmetro) com parafusos de mesmo material.

Figura 11 – Modelo de sensor termopar utilizado.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 – Resistência de NiCr-40 responsável pela geração de calor no interior da câmara de aquecimento.

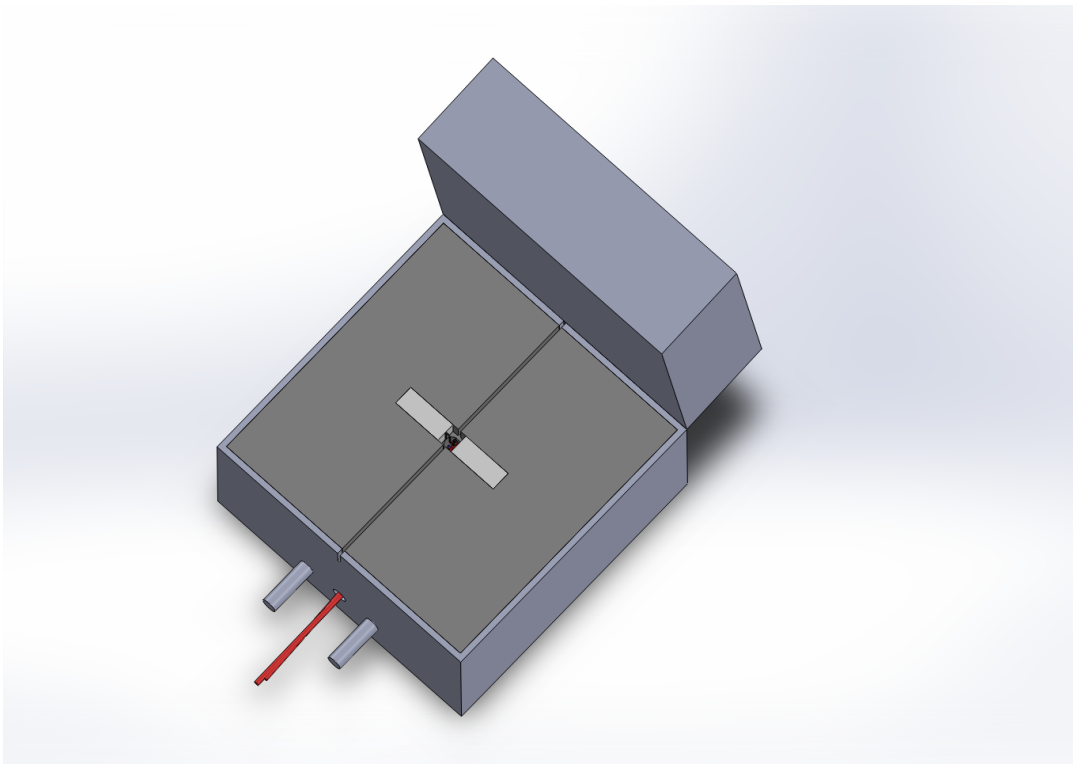


Fonte: Autoria Própria.

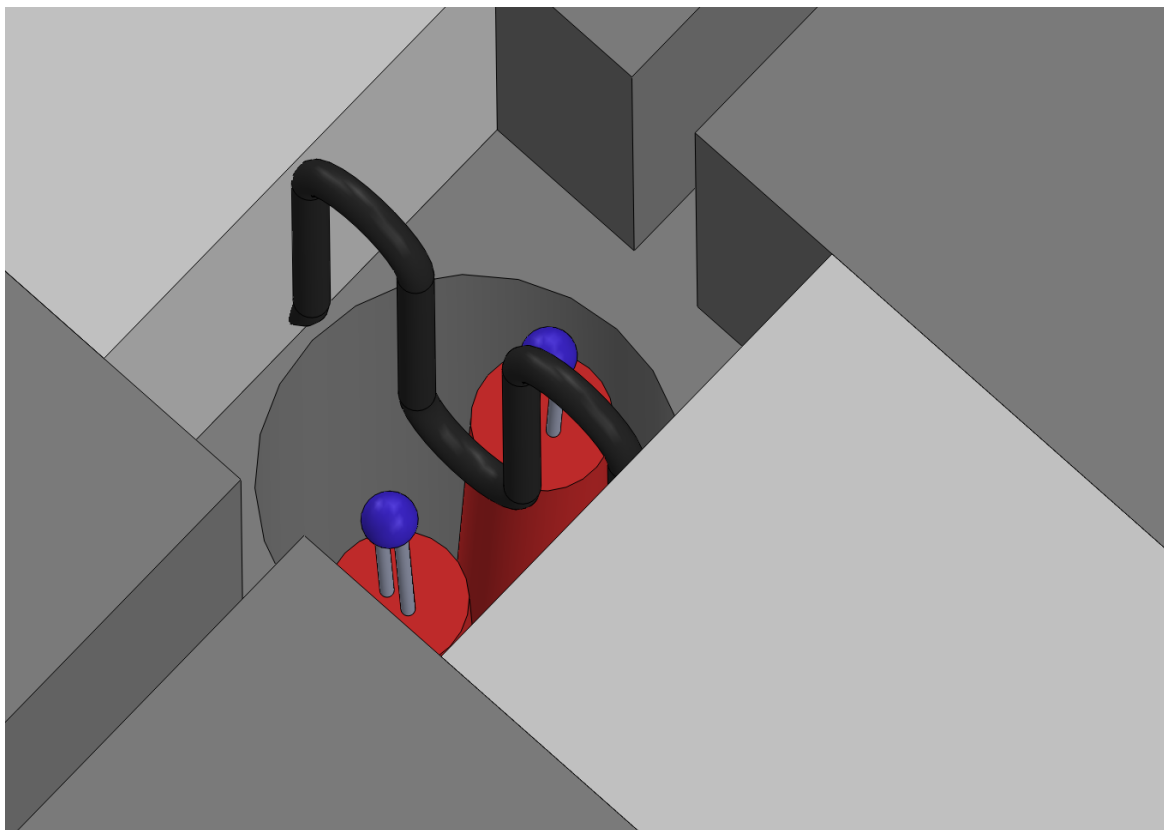
2. inseriu-se chumaços de lã de rocha (capazes de suportar temperaturas acima dos 1100 °C) para melhorar o confinamento da calor na câmara de aquecimento e fixar na posição final os termopares;
3. instalou-se a tampa em alumínio com concreto refratário no interior;
4. instalou-se alças e um mecanismo de trava para transporte;
5. aparafusou-se cabos elétricos (que serão conectados no *hardware* de controle) na extremidade (oposta a resistência de aquecimento) dos cilindros de aço inox;

Na Figura 13 é representada a montagem final do miniforno. Nesta figura, nota-se o tamanho reduzido da câmara de aquecimento (se comparado com os outros elementos do miniforno), que é vista com maiores detalhes na Figura 14. A partir desta, observa-se o quão próximo ( $\sim 1$  mm ) os termopares estão da resistência e que no centro dessa passa a canaleta passível de acomodar um trecho de fibra ótica (sob caracterização ou tratamento térmico).

**Figura 13 – Montagem final do miniforno.**



Fonte: Autoria Própria.

**Figura 14 – Montagem final da câmara de aquecimento.**

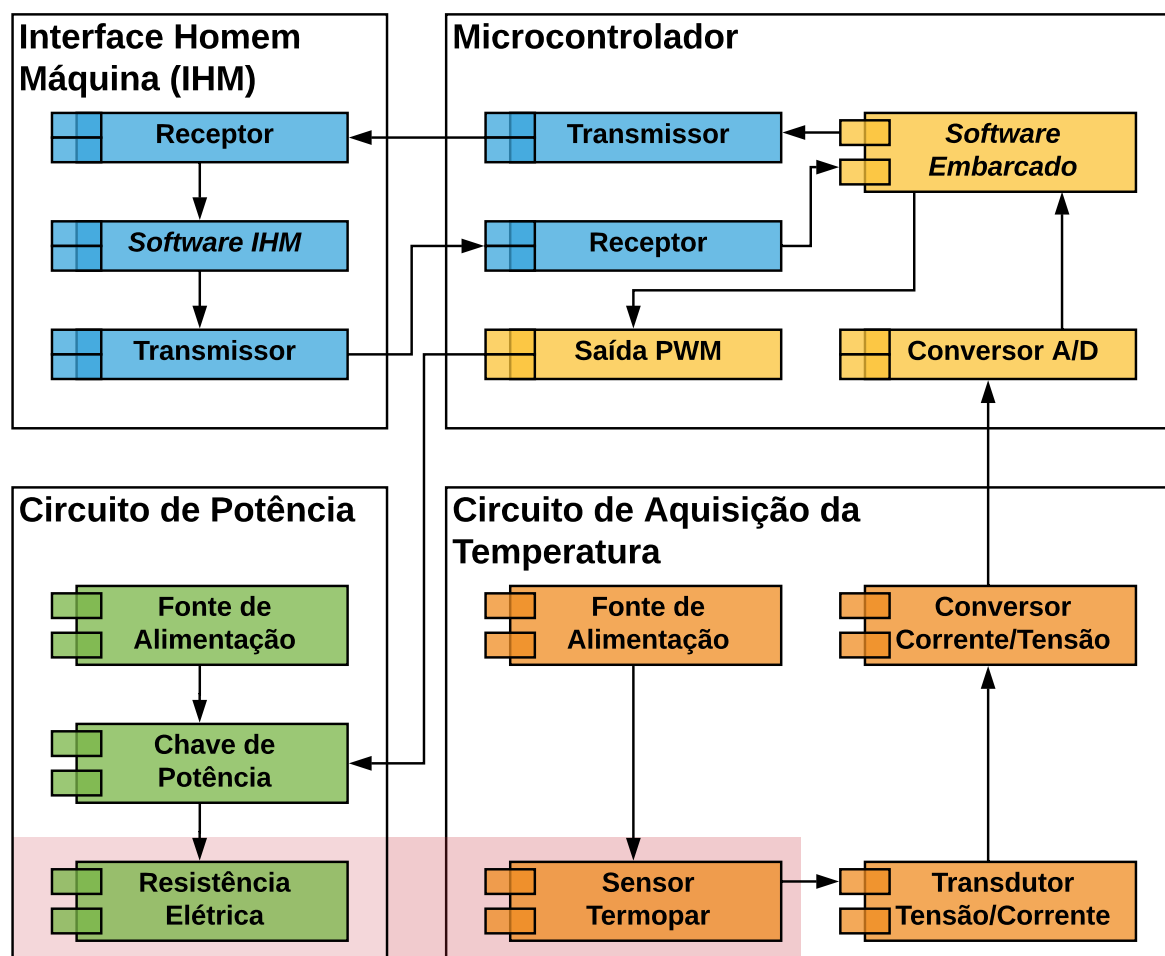
**Fonte: Autoria Própria.**

### 3.2 HARDWARE E *SOFTWARE* DE CONTROLE

Nesta seção é explicado como os diversos componentes eletroeletrônicos que controlam e operam o miniforno foram desenvolvidas e como se comunicam entre si.

No diagrama da Figura 15 são apresentado 4 blocos principais: interface homem máquina (IHM), microcontrolador, circuito de potência e circuito de aquisição de temperatura. Cada um desses blocos se comunicam entre si por meio de seus componentes internos (exceto o circuito de potência com o de aquisição). A fim de facilitar o entendimento e a explicação de cada componente da Figura 15 é adequado tratar cada um dos quatro blocos diferentes subitens dessa seção.

Figura 15 – Diagrama de componentes do miniforno elétrico.



Fonte: Autoria Própria.

### 3.2.1 Circuito de Aquisição de Temperatura

O circuito de aquisição de temperatura possui quatro componentes principais: sensor termopar, fonte de alimentação, transdutor de tensão/corrente (nesse caso também designado por transdutor temperatura) e conversor corrente/tensão.

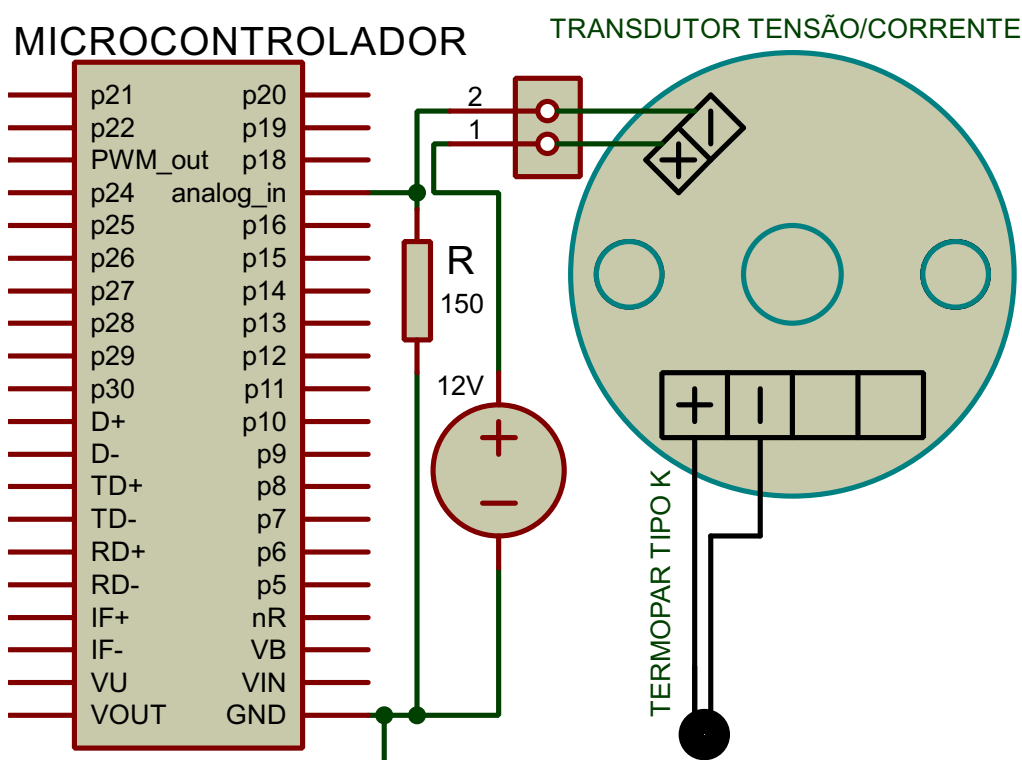
O termopar tipo K é o responsável por aferir a temperatura no interior da câmara de aquecimento. Esse sensor teve suas especificações físicas descritas na seção 3.1e na seção 2.1.2 foi explicado o seu princípio de funcionamento.

Ainda na seção 2.1.2, afirmou-se que o termopar gerava uma  $emf_{Seebeck}$  na faixa de  $-5,89\text{ mV}$  até  $51\text{ mV}$ . No entanto, essa faixa de tensão não é adequada para o sistema de processamento de dados (microcontrolador) que opera na faixa de  $0\text{ V}$  até  $3,3\text{ V}$ . Desta maneira, utilizou-se o transdutor Tx-Block (programado na faixa de operação de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  até

1360 °C) da marca Novus<sup>®</sup> (detalhado na seção 2.1.3) para tratar o sinal do termopar.

Implantando o circuito elétrico da Figura 16, que é basicamente um resistor em série com o transdutor e fonte de alimentação, foi possível converter o sinal de corrente (4 mA à 20 mA) para um sinal de tensão 0 V até 3 V no resistor 150  $\Omega$  (conversor corrente/tensão), que é conectado a entrada analógica do microcontrolador.

Figura 16 – Diagrama elétrico do circuito de aquisição conectado ao microcontrolador.



Fonte: Autoria Própria.

### 3.2.2 Circuito de Potência

O circuito de potência é composto por três elementos principais: fonte alimentação, resistência elétrica, MOSFET.

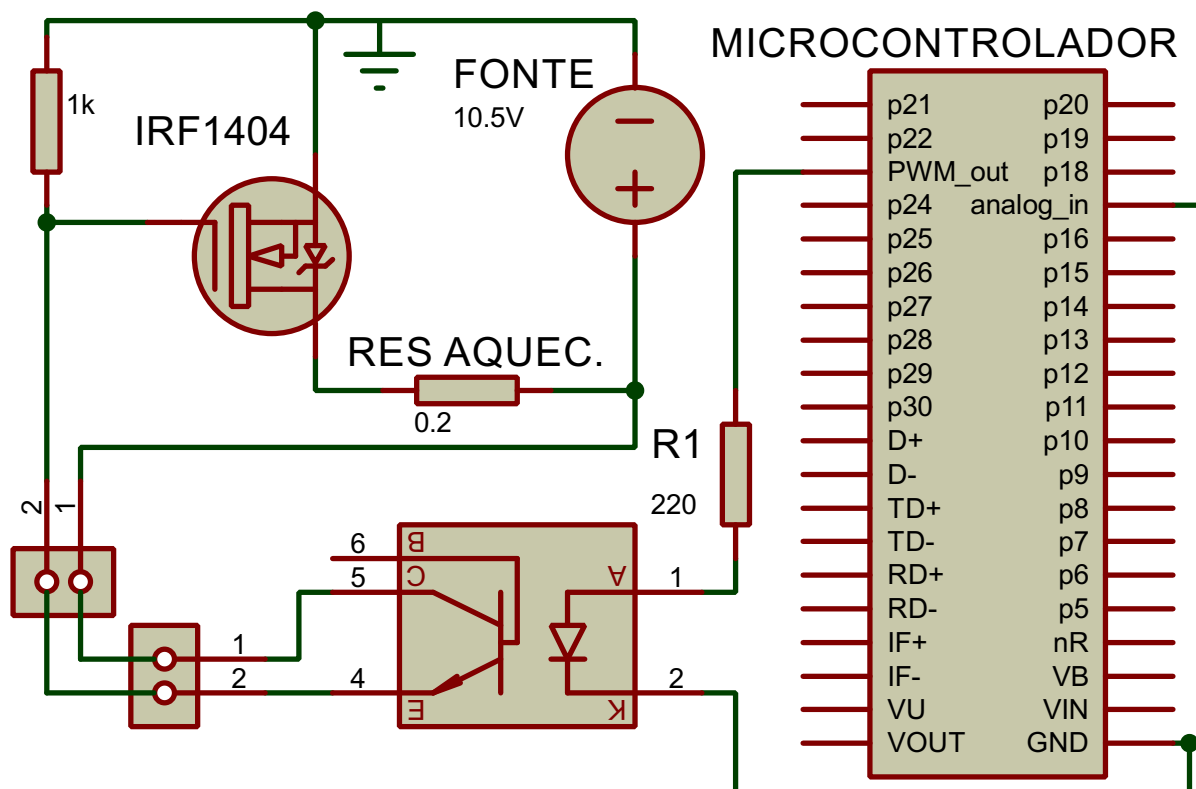
A resistência de aquecimento teve suas especificações dimensionais descritas seção 3.1. Contudo, no projeto de circuitos de potência foi necessário determinar o seu valor em Ohm. Para tanto, aplicou-se uma tensão contínua de 0,5 V na resistência, essa conduziu uma corrente de 2,1 A, logo o valor da resistência de NiCr é aproximadamente 240 m $\Omega$ .

A fonte de alimentação escolhida para fornecer energia a carga (resistência de aquecimento) é da marca PSN<sup>®</sup> modelo 12 V / 40 A<sup>3</sup> que possui um custo relativamente baixo e é de fácil aquisição.

A potência na carga é controlada pela chave MOSFET (detalhada na seção 2.1.1) da marca International Rectifier<sup>®</sup> modelo IRF 1404. Esse se destaca das demais modelos de chaves MOSFET pela  $R_{ds(on)} = 4 \text{ m}\Omega$ , que é 60 vezes menor que a resistência de aquecimento (estabelecendo um acionamento com rendimento relativamente alto).

O circuito montado com os componentes descritos nessa seção é mostrado no esquemático da Figura 17. Neste esquemático há ainda um acoplador óptico (4N25) que tem a função de transmitir o sinal PWM do microcontrolador para chave MOSFET de maneira a isolar o circuito de potência e o circuito digital (minimizando a possibilidade de danos no controle por fenômenos transitórios).

Figura 17 – Diagrama elétrico do circuito de potência conectado ao microcontrolador.



Fonte: Autoria Própria.

<sup>3</sup> A fonte foi ajustada em 10,5 V para reduzir a potência máxima admissível na carga.



### 3.2.3 Software Embarcado (SE)

Nesta seção, detalha-se o funcionamento do bloco *software* embarcado (SE) do diagrama da Figura 15 e como este interage com os demais blocos do microcontrolador.

A análise do SE começa com a definição das principais tarefas que este deve executar: receber comandos ou lista de *setpoints* da IHM, ler e tratar valores advindos do circuito de aquisição, chavear o MOSFET por meio de um sinal PWM e enviar dados da operação para IHM. A fim de cumprir essas tarefas, projetou-se o SE com os seguintes elementos: sistema básico, sistema operacional(OS), *threads*<sup>4</sup> e interrupção de *software*<sup>5</sup> (SWI). Estes têm seus comportamentos dinâmicos representados no fluxograma da Figura 18 que será detalhado nos próximos subitens.

#### 3.2.3.1 Sistema Básico

O sistema básico é o responsável por inicializar as variáveis do sistema, as *thread*, a SWI e o OS. O sistema básico funciona somente nos primeiros instantes do SE e se encerra após o OS entrar em funcionamento.

#### 3.2.3.2 Sistema Operacional (OS)

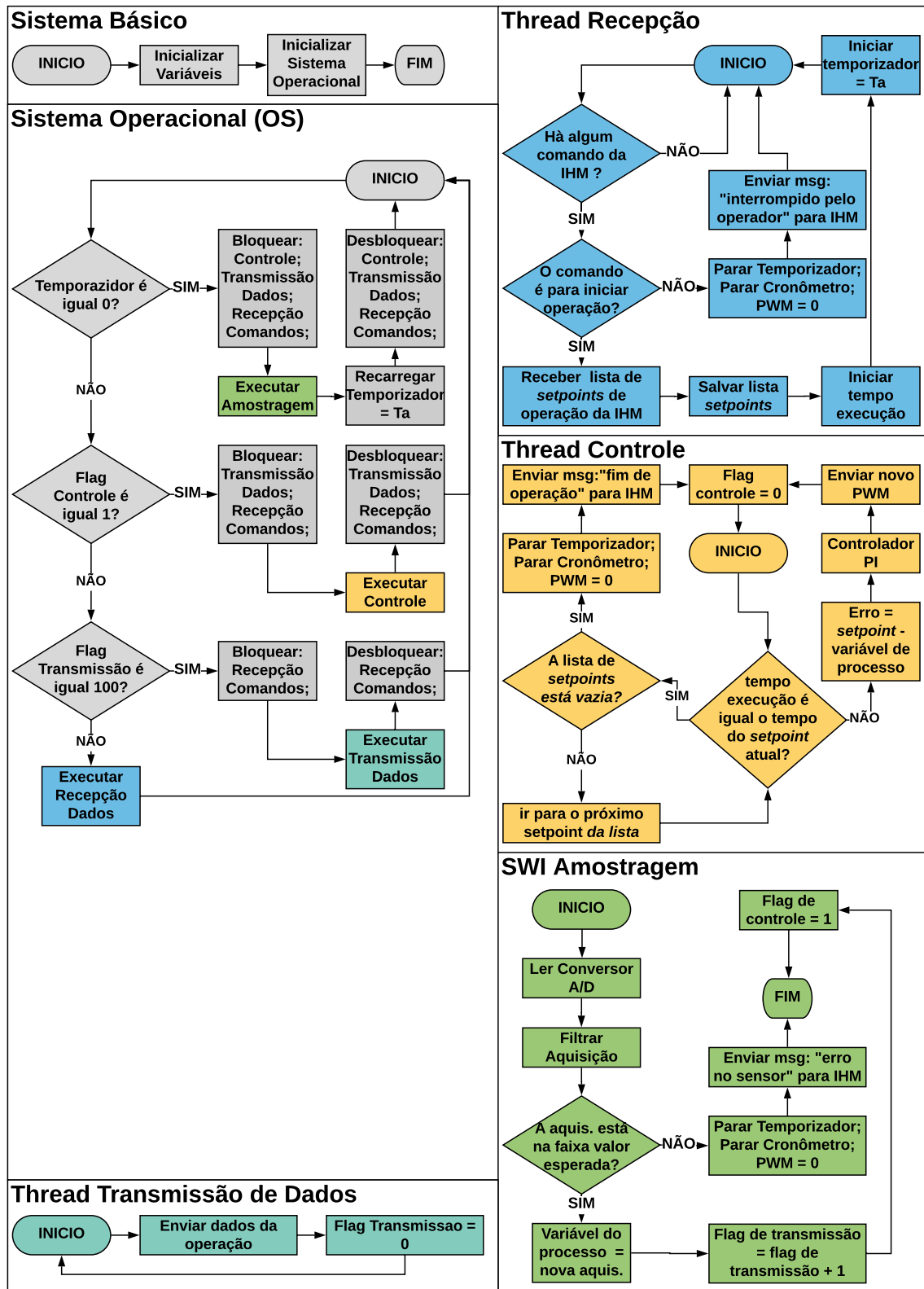
O sistema operacional utilizado é o Mbed OS 5.9, que um é OS que utiliza as interfaces de programação de aplicação (APIs) CMSIS e RTX no seu funcionamento. o Mbed OS é o responsável por gerenciar o tempo que cada *thread* (ou SWI) vai utilizar da unidade de processamento central (CPU) do microcontrolador. Este tempo de execução é definido com base na prioridade da *thread* (quanto maior a prioridade da *thread* a menor chances deste ser interrompido) e se a *thread* está com *status*: “em espera”, “pronta” ou “em execução.

O *status* de uma *thread* define se esta pode ou não ser executado. *Threads* com *status* “pronto” podem ser escalonados e posteriormente serão executados (passando para o *status* em execução) pela CPU, já as *threads* com “em espera” não podem ser escalo-

<sup>4</sup> São linhas de processamento que concorrem entre si pelo tempo de processamento da CPU. (SILBERSCHATZ; GALVIN; GAGNE, 2015)

<sup>5</sup> A interrupção de *software* normalmente é utilizada para garantir que uma *thread* seja executada no momento que ela estiver com *status* “pronta”.

Figura 18 – Fluxograma do comportamento dinâmico do *software* embarcado no microcontrolador.



Fonte: Autoria Própria.

dados. Normalmente, o status de uma *thread* é modificada via *flag* (e.g. *flag controle*). A prioridade das *threads* foi determinada pelo programador do SE que, neste caso, escolheu a seguinte ordem crescente: *Thread* Recepção de Comandos, *Thread* Transmissão de Dados, *Thread* Controle e SWI Amostragem.

### 3.2.3.3 *Thread* Recepção

A Recepção é a única *thread* que sempre está com *status* “pronta” e pode ser executada pelo OS logo de início. Quando executa, a *thread* verifica se há algum comando advindo da IHM, se não houver nenhum comando ela volta para início. Havendo comando, ele verifica se o comando é o de ativar operação, se sim a *thread* processa a lista de *setpoints* advindos da IHM (se a lista estiver vazia o microcontrolador retorna uma mensagem de erro), inicia a contagem do tempo de execução e do temporizador da SWI com o valor 1 ms (tempo de amostragem). Entretanto, o temporizador da SWI será interrompido se um sinal de parada for enviado pela IHM (fazendo com que a PWM e o tempo de execução recebam o valor zero e a *thread* Recepção seja novamente único a ser executado).

### 3.2.3.4 Interrupção de *Software* (SWI) Amostragem

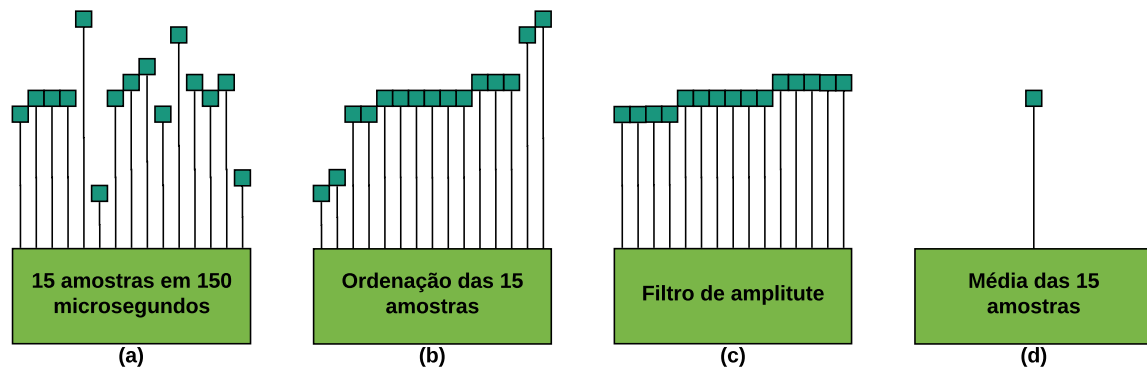
A SWI Amostragem inicia com 15 leituras em sequência (com um intervalo de 10  $\mu$ s entre elas) do conversor A/D (Figura19.a). Contudo, essas leituras apresentam ruído dois tipos principais de ruídos: o de alta frequência (gerado pela fonte de potência) e o gaussiano. Sendo assim, implementou-se dois filtros (um para cada tipo de ruído): filtro de média com limitação de amplitude e filtro de médias móveis.

A primeira etapa do filtro de média com limitação de amplitude consiste em ordenar as 15 leituras de maneira crescente (método utilizado para encontrar o valor da mediana, ver Figura19.b). Em seguida, a amplitude das leituras é limitada para valores de  $\pm 3\%$  da mediana (presumisse que a temperatura não variará mais do que esse percentual no intervalo de 10  $\mu$ s), essa limitação evita que picos de amplitude (gerados por ruídos de alta frequência) interfiram no valor da amostra (ver Figura19.c). Após o filtro de limitação de amplitude, realiza-se a média das 15 leituras, resultando, na amostra atual (Figura19.d).

O segundo filtro, filtro de médias móveis, opera sob a amostra atual e as anteriores.

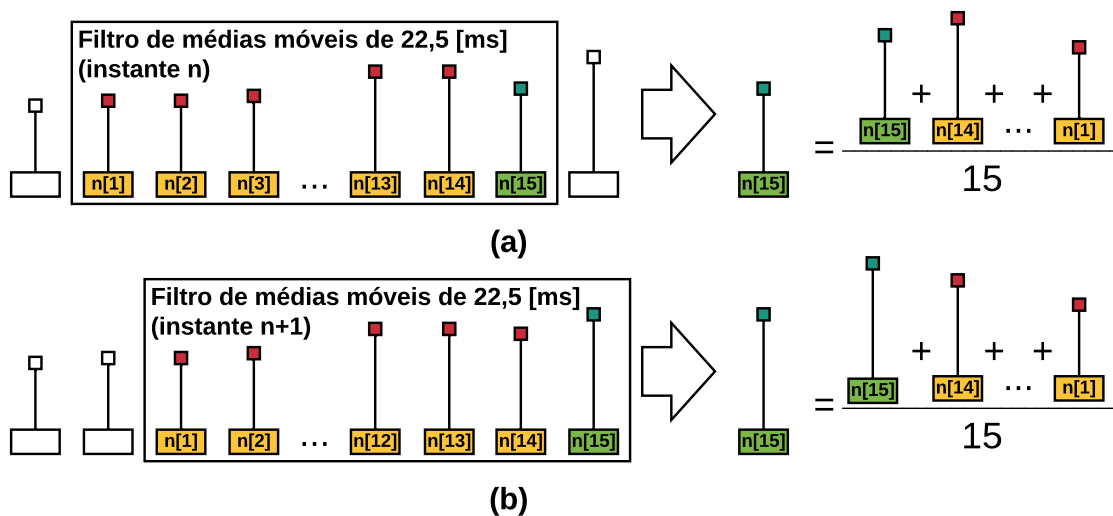
Nesse filtro, o valor da amostra atual é resultado da média entre a última amostra (advinda do primeiro filtro) com as 14 amostras anteriores. Um exemplo do funcionamento deste filtro é apresentado na Figura 20.a para amostra atual ( $n$ ) e na Figura 20.b para amostra seguinte ( $n+1$ ). Esse filtro tem como desvantagem a necessidade de esperar um tempo de 15 amostras (tempo de “encher” o filtro), porém a vantagem de reduzir drasticamente o ruído gaussiano.

Figura 19 – Filtro de média de amplitude limitada.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 20 – Filtro de média de médias móveis.



Fonte: Autoria Própria.

Depois da filtragem, verifica-se se amostra está dentro da faixa temperatura que o miniforno opera ( $0^{\circ}\text{C}$  até  $999^{\circ}\text{C}$ ), se sim, a amostra passa ser variável de processo, se não, a operação é interrompida e uma mensagem de erro no sensor é enviada à IHM. No final da SWI, o *flag* de controle recebe 1 (mudando o status da *thread* Controle para “pronta”), o *flag* de transmissão de dados é acrescido de uma unidade (este igual a 100 muda o status da *thread* Transmissão de Dados para “pronta”).

### 3.2.3.5 Thread Controle

No início da *thread* é verificado se o tempo de execução é igual ao tempo do *setpoint* atual. Caso os tempos sejam iguais, é verificado se a lista de *setpoints* está vazia, se sim a operação é encerrada, uma mensagem de fim da operação é enviada à IHM e o *flag* de controle recebe zero (mudando o status da *thread* Controle para “em espera”), para o não retira-se da lista o novo *setpoint*. Entretanto, se os tempos de execução e de *setpoint* forem diferentes é então calculado o erro (diferença entre o *setpoint* e a variável de processo). Este erro é a entrada do controlador PI (detalhado na seção 2.2), que é o responsável por calcular o novo valor do PWM (sinal de saída). Por fim, zera-se o *flag* de controle (mudando o status da *thread* Controle para “em espera”).

### 3.2.3.6 Thread Transmissão de Dados

Nesta *thread* são enviado os dados da operação via interface serial RS-232 (tempo de execução, *setpoint* atual, variável de processo e o valor do PWM) para IHM e logo em seguida o *flag* de transmissão de dados zerado ( mudando o *status* da *Thread* Transmissão de Dados para “em espera”).

## 3.2.4 Interface Homem Máquina (IHM)

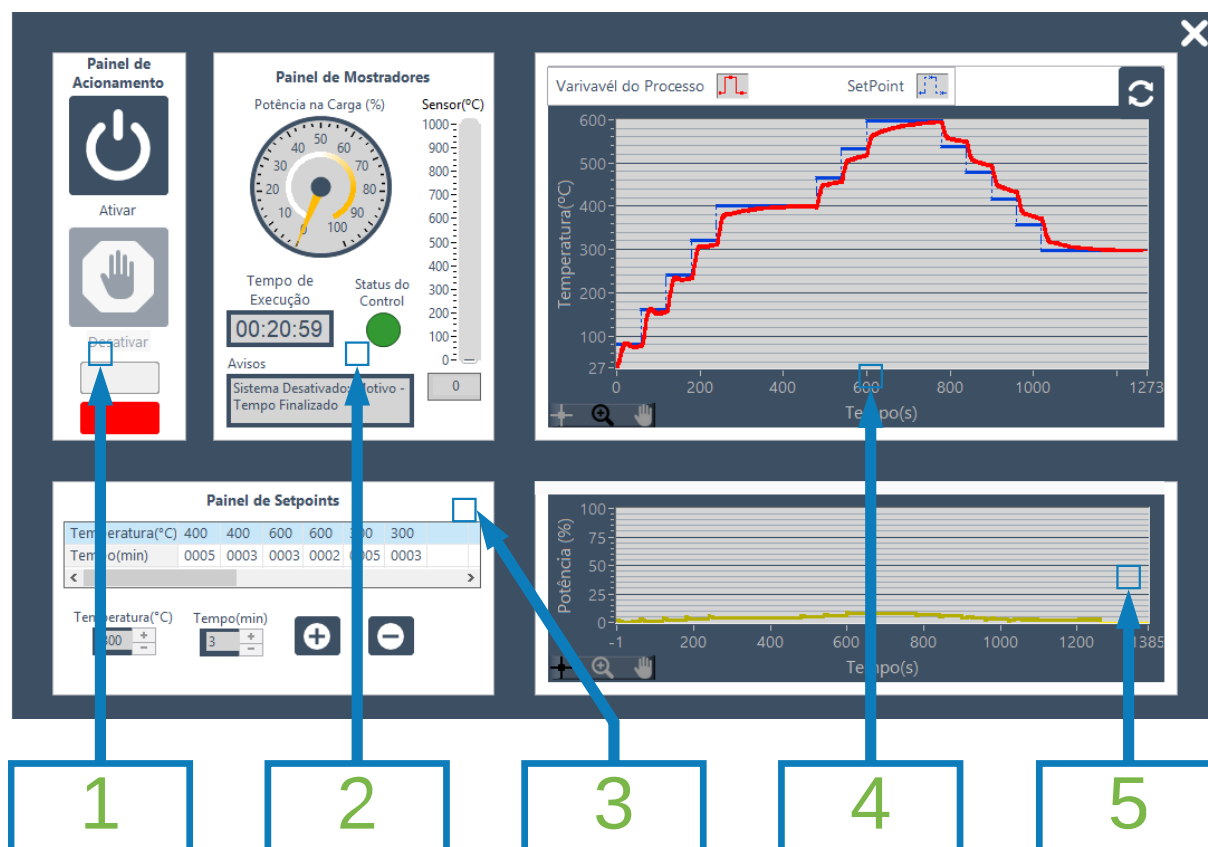
Na construção do *software* da Interface Homem Máquina (IHM) do miniforno foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da National Instruments<sup>®</sup>: o LabView<sup>®</sup>. Este foi escolhido por oferecer todos os recursos necessários (interface serial, mostradores, botões gráficos, tabelas, gráficos e caixa de mensagens) de maneira simplificada e documentada. Além do mais, com licença profissional do LabView <sup>®</sup> é possível gerar um instalador e versão de distribuição da IHM mais os recursos necessários para

seu funcionamento (eliminando a necessidade do computador ter uma versão de LabView para funcionar IHM).

A construção de uma IHM no LabView<sup>®</sup> é feita dentro instrumento virtual, que é composto por duas camadas de abstração: o diagrama de blocos e o painel frontal. Neste são posicionados os recursos gráficos e de inserção de dados da IHM (é a única camada que o usuários tem acesso). A camada contendo o diagrama de blocos é onde os recursos do painel frontal são conectados de maneira a seguir um conjunto de condições que, normalmente, estão dentro de estruturas como: laços de repetições e eventos.

O painel frontal da IHM é constituída das seguintes sub-painéis: comandos, mostradores, *setpoints*, gráfico de temperatura e potência ambos em função do tempo) que podem ser observados na Figura 21

Figura 21 – Painel frontal da interface homem máquina.



Fonte: Autoria Própria.

O sub-painel de comando (indicado pelo número 1 na Figura 21) é onde o usuário decide ativar ou desativar o miniforno. No sub-painel há os seguintes componentes:

- botão virtual “ativar”;
- botão virtual “desativar” (ativo para quando o miniforno está operando);
- dois indicadores binários (o mais em cima fica verde se o miniforno está operando, e o de baixo fica vermelho caso contrário);

O botão “ativar” somente permanece ativo se: houver *setpoints* no quadro *setpoints*, não houver erro na comunicação com microcontrolador e nem com o sensor e se o miniforno não estiver ativo.

O acompanhamento da operação do miniforno é feito no sub-painel de mostradores (indicado pelo número 2 na Figura 21). Este é composto pelos seguintes elementos:

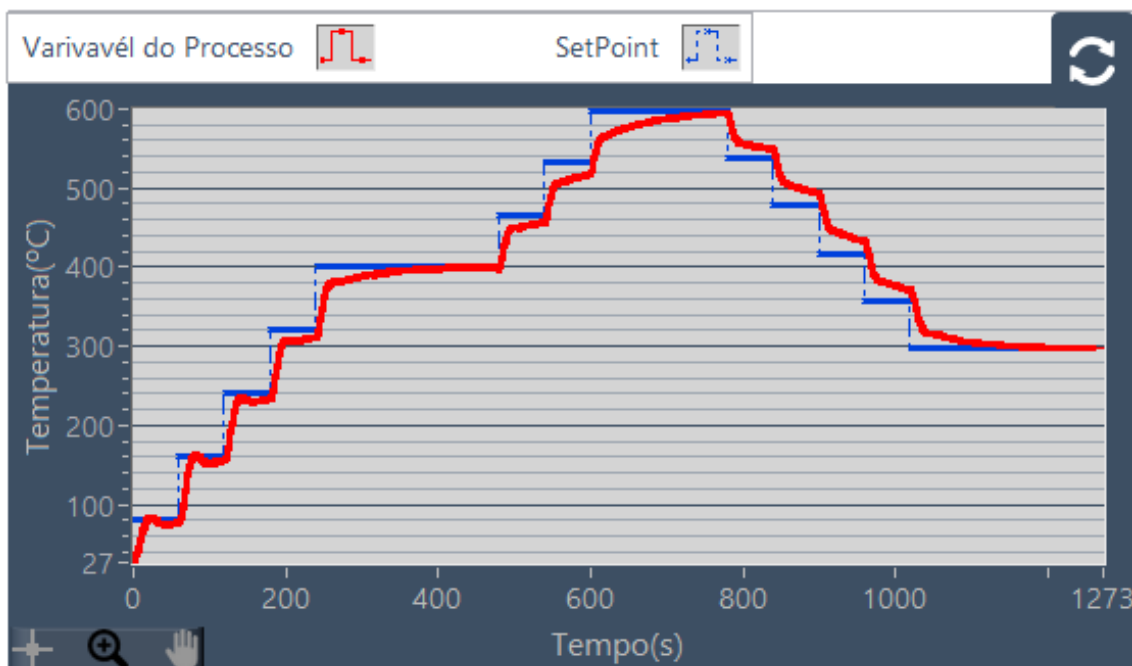
- indicador vertical com escala para a variável do processo (temperatura no interior da câmara de aquecimento).
- caixa de texto para a variável do processo;
- indicador radial para o percentual de potência utilizada da fonte de alimentação;
- caixa de texto para o tempo de execução;
- indicador binário para o status do microcontrolador (verde sem problemas, vermelho há pelo menos um problema)
- caixa de texto para avisos (mensagens do motivo de não poder ativar o miniforno ou da interrupção da operação do mesmo);

No sub-painel número 3 da Figura 21 há uma tabela a ser preenchida (por meio dos controladores numéricos e botões localizados abaixo da tabela) com valores temperatura (30 °C à 999 °C) e tempo (1 min à 1440 min). Os valores inseridos na tabela iram gerar uma lista de *setpoints*, que é a responsável por ditar o comportamento do controlador do miniforno. Um exemplo de valores inseridos na tabela é visto na Figura 22.

Na Figura 22, observa-se que a curva de *setpoint* (em azul) inicia em 80 °C e vai até 400 °C no incremento 80 °C/min durante 5 min (primeiro *setpoint*) e permanece nesta temperatura por mais 3 min (segundo *setpoint*). Em seguida, inicia-se a rampa de subida 400 °C até 600 °C no incremento 100 °C/min durante 2 min (terceiro *setpoint*) e permanece nesta temperatura por mais 3 min (quarto *setpoint*). Por fim, a rampa de decida que vai de

600 °C até 300 °C no incremento 60 °C/min durante 5 min (quinto *setpoint*) e permanece nesta temperatura por mais 3 min (sexto *setpoint*).

Figura 22 – Exemplo da resposta do miniforno para uma determinada lista *setpoints*.



### Painel de Setpoints

Temperatura(°C)	400	400	600	600	300	300		
Tempo(min)	0005	0003	0003	0002	0005	0003		
<span>&lt;</span> <span style="display: inline-block; width: 100px; height: 15px; background-color: #ccc;"></span> <span>&gt;</span>								

Temperatura(°C)

+  
-

Tempo(min)

+  
-



Fonte: Autoria Própria.

Os sub-painéis 4 e 5 da Figura 21 são respectivamente os gráficos de: temperatura (*setpoint* e variável do processo) vs. tempo e percentual de potência aplicada na carga vs. tempo. Ambos os gráficos possuem ferramentas de zoom, mudança de cor e formato da linha, método interpolação e a opção de salvar (a qualquer momento) os seus valores no formato .txt ou salvar imagem simplificada das curvas nos formatos: .bmp, .eps ou .emf.



### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS GANHOS DO CONTROLADOR PI

O controlador PI teve sua funcionalidade explicada na seção 3.2.3.5. Contudo, é pertinente detalhar a construção e obtenção dos parâmetros desse controlador.

No final da seção 2.2.6, chegou-se as Equações 13 e 14 (que definem o compensador PI no domínio do tempo discreto). Contudo, essas equações ainda não podem ser inseridas no SE do microcontrolador, pois é necessário, primeiramente, determinar os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  (já que  $Ta$  é o tempo de amostragem). Sendo assim, utilizou-se a abordagem simulada, que é relativamente precisa e simples de ser obtida com ferramentas computacionais, para determinar os ganhos do compensador PI.

No método simulado os valores  $K_p$  e  $K_i$  são obtidos no domínio discreto. Porém esse método envolve em estimar a função de transferência em malha aberta do miniforno no domínio discreto ( $G(z)$ ).

A estimativa  $G(z)$  é feita por meio de um ensaio experimental em que a sua saída é monitorada quando submetido a uma entrada conhecida. A fim de realizar este ensaio, programou-se um SE do microcontrolador para que este armazena-se os valores de temperatura vs. tempo quando submetido a uma entrada (sinal PWM) conhecida

Utilizando os dados do ensaio (curva de entrada e de resposta) e assumindo que  $G(z)$  seja de primeira ordem<sup>6</sup> utilizou-se a ferramenta SystemIdentification<sup>®</sup> da MatLab<sup>®</sup> para estimar  $G(z)$ .

Após obter  $G(z)$ , utilizou-se a ferramenta Simulink<sup>®</sup> da MatLab<sup>®</sup> para simular a malha fechada com o miniforno (representado por  $G(z)$ ) sendo controlado com o compensador  $D(z)$  (que ainda não tinha seus ganhos definidos) quando um *setpoint* era inserido na entrada do sistema ( $R(z)$ ).

Por fim, utilizou-se a ferramenta SintoniaPID<sup>®</sup> da MatLab<sup>®</sup> em  $D(z)$  para obter seus ganhos  $K_p$  e  $K_i$ . Nesta ferramenta foi possível escolher o perfil da curva de saída do sistema em malha fechada com base nos seguintes parâmetros de projeto de controle: velocidade e robustez. A velocidade está relacionada ao quão rápido o sistema chega no valor do *setpoint* e a robustez está relacionado de que maneira o sistema chega nesse valor e como ele se comporta depois. A escolha destes parâmetros e dos resultados do ensaio e simulações é visto na seção 4.1

---

<sup>6</sup> O formato da curva de resposta  $c(t)$  é semelhante da Gráfico 1 da seção 2.2.3.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo se inicia com os resultados dos ensaios para obtenção dos ganhos do controlador digital seção 3.3, passa pela análise da distribuição de calor e desempenho do miniforno e, por fim, comenta-se algumas possibilidades de trabalhos futuros.

#### 4.1 OBTENÇÃO DOS GANHOS DO COMPENSADOR

Na seção 3.3, detalhou-se o processo para obter  $K_p$  e  $K_i$  do controlador discreto  $D(z)$ . A seguir, apresenta-se os resultados obtidos desse processo, a começar com a estimativa da função de transferência em malha aberta discreta do miniforno ( $G(z)$ ).

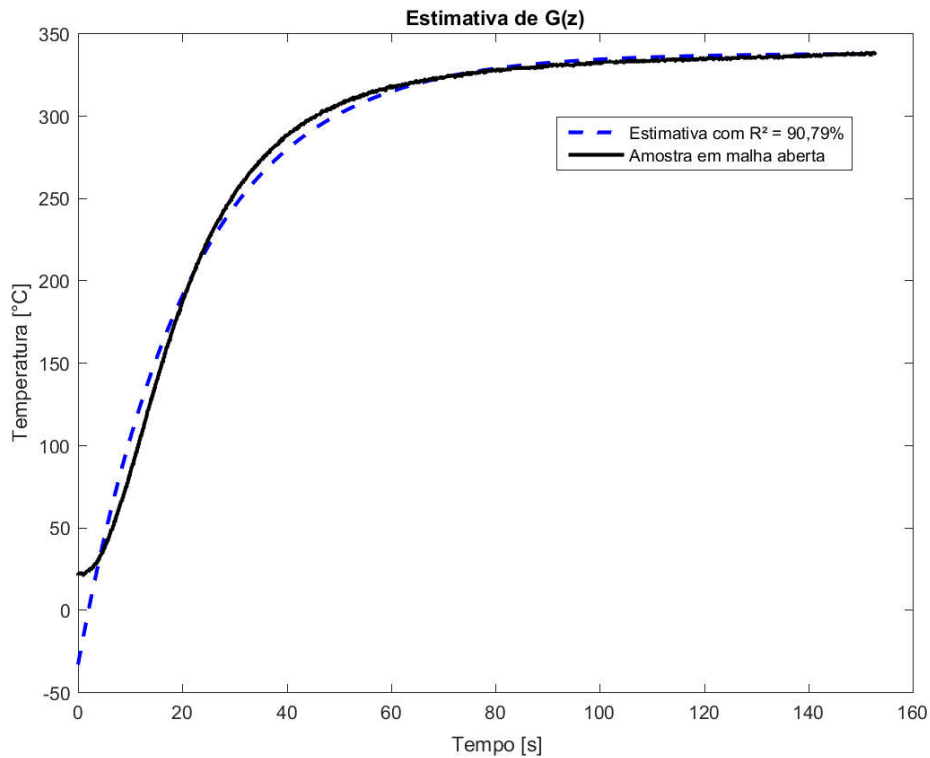
No Gráfico 2 é comparada a resposta experimental do miniforno ( $c_{exp}(t)$ ) com a resposta simulada ( $c_{sim}(t)$ ) do modelo discreto estimado ( $G(z)$ ). Observa-se que nesse gráfico o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) tem valor superior a 90%, ou seja,  $G(z)$  estimado retrata o comportamento dinâmico do miniforno com 90% de precisão.

Os parâmetros estimados de  $G(z)$  estão presentes na Equação 15. Com esses valores e assumindo que  $H(z) = 1$  (pois o sensor não modifica o sinal de realimentação) e  $R(z) = 320$  (valor arbitrário), montou-se o digrama de blocos da Figura 5 da seção 2.2.6 no Simulink<sup>®</sup>.

$$G(z) = \frac{2.60}{z^{-1} - 0.99678} \quad (15)$$

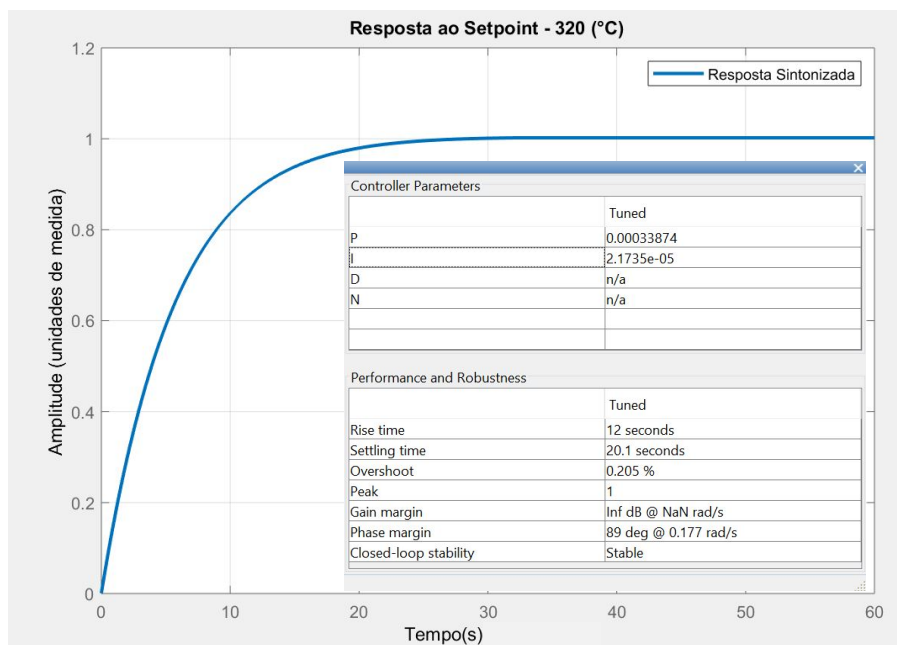
Por fim, utilizando a ferramenta SintoniaPID<sup>®</sup> sintonizou-se a curva de resposta do sistema de controle de maneira que esta ficasse na eminência de ter um valor de *overshoot*. O resultado pode ser conferido no Gráfico 3, sendo que esta sintonia gerou os seguintes ganhos:  $K_p = 3,39 \times 10^{-4}$  e  $K_i = 2,17 \times 10^{-5}$ .

Gráfico 2 – Comparação da resposta experimental com a simulada.



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 3 – Sintonia PI do controlador digital.



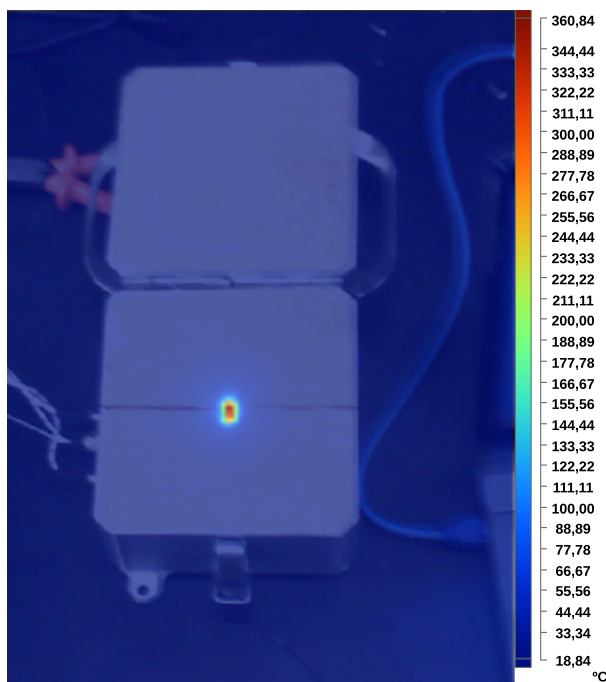
Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA

Um dos principais objetivos para a fabricação do miniforno foi com relação a sua distribuição de calor. Conforme explicado seção 1.2, há a necessidade do miniforno confinar a maior parcela do calor gerado dentro da sua câmara de aquecimento com pequenas dimensões.

A fim de avaliar o confinamento do calor da câmara de aquecimento, utilizou-se a câmera termográfica Ti10 da marca Fluke<sup>®</sup> (com faixa de operação de  $-20^{\circ}\text{C}$  até  $400^{\circ}\text{C}$ ) para gerar a imagem termográfica (Figura 23) do interior do miniforno enquanto este operava na temperatura de  $\sim 380^{\circ}\text{C}$  por  $\sim 10$  min. Nesta imagem, nota-se como a diferença abrupta de temperatura do interior da câmara de aquecimento ( $\sim 380^{\circ}\text{C}$ ) para o resto do miniforno ( $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ).

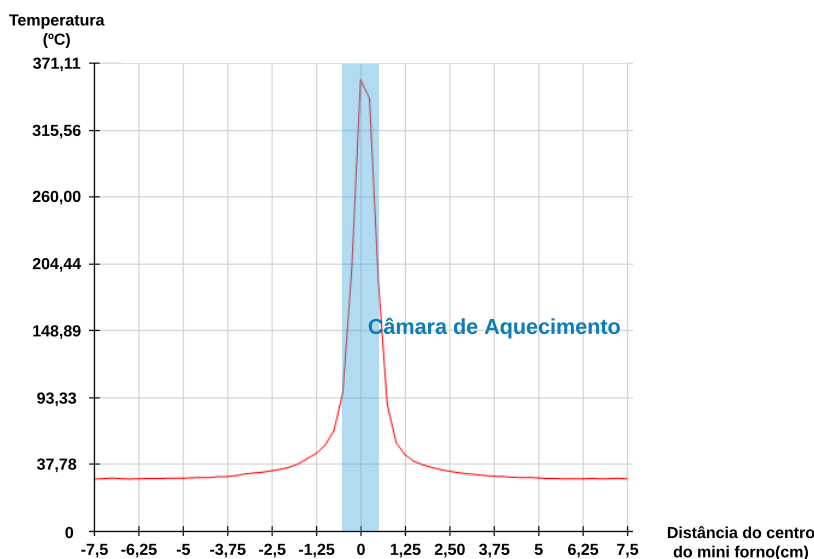
**Figura 23 – Imagem Termográfica do interior da câmara de aquecimento.**



**Fonte: Autoria Própria.**

O Gráfico 4 exibe a distribuição de temperatura ao longo da canaleta da fibra ótica. Neste gráfico, observa-se que os maiores valores de temperatura estão concentrados na região da câmara de aquecimento (região em azul) e a uma distância de  $\sim 0,5$  mm desta região a temperatura caía para valores abaixo dos  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ .

Gráfico 4 – Distribuição da temperatura na canaleta do miniforno.



Fonte: Autoria Própria.

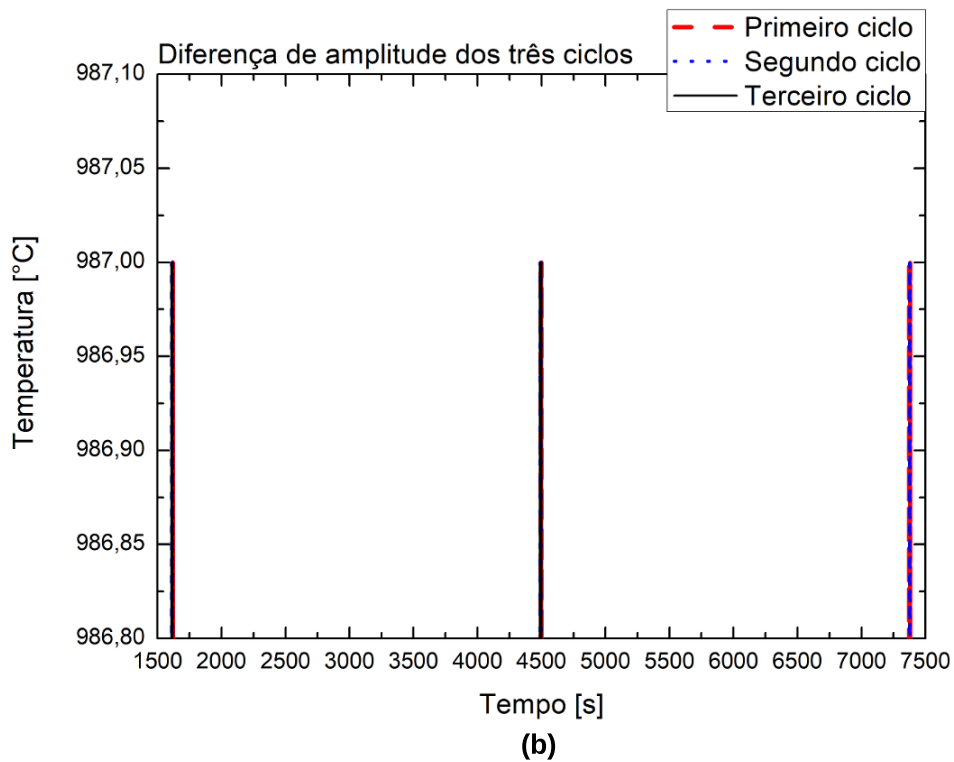
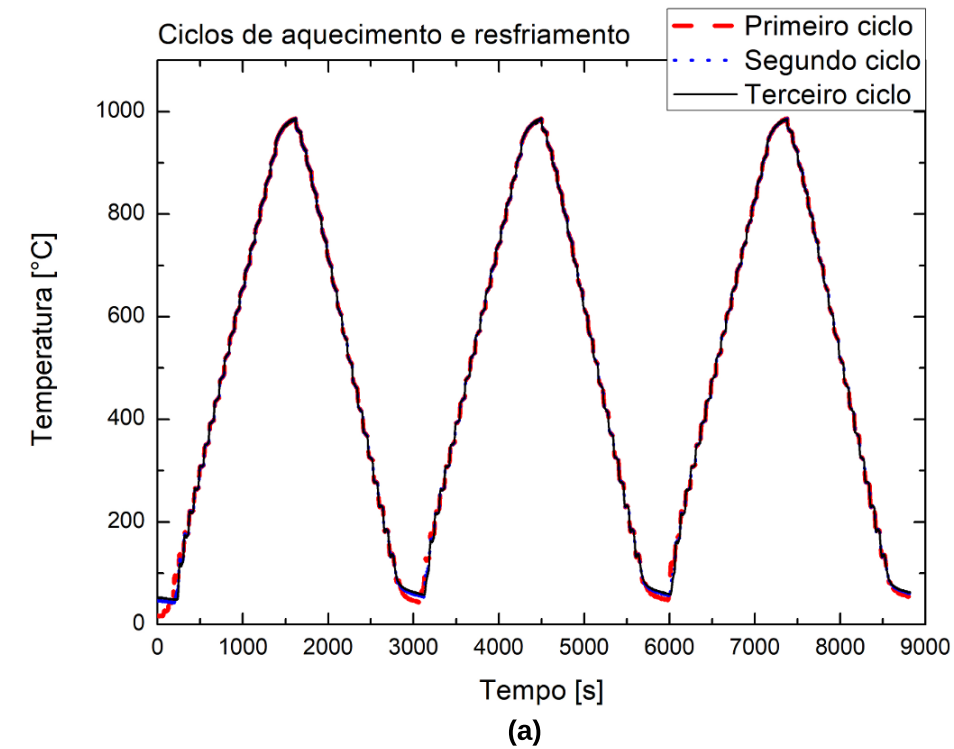
Analisando a imagem termográfica (Figura 23) e o Gráfico 4 é possível concluir que o miniforno cumpre seu objetivo primordial.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE

O objetivo deste ensaio é comprovar a repetibilidade do miniforno. Para tanto, realizou-se três séries de três ciclos (resultando em nove ciclos) de aquecimento e resfriamento com temperaturas que variaram da temperatura ambiente  $\sim 20^\circ\text{C}$  até  $990^\circ\text{C}$ . Cada ciclo consiste em uma rampa de aquecimento e resfriamento (com duração de 22 min cada) e um patamar (com duração de 3 min) na temperatura de  $990^\circ\text{C}$ . As rampas possuem 22 degraus (um para cada minuto) com incrementos (ciclo de aquecimento) ou decremento (ciclo de resfriamento) de  $45^\circ\text{C}/\text{min}$ .

No Gráfico 5.a é apresentado o resultado obtido do ensaio descrito no parágrafo anterior. Neste gráfico, observa-se que para temperaturas acima dos  $100^\circ\text{C}$  os ciclos de aquecimento são praticamente idênticos. Esta afirmação é confirmada no Gráfico 5.b, pois todos os picos atingem o valor  $987^\circ\text{C}$  no mesmo intervalo de tempo. Desta maneira, pode-se afirmar que o miniforno apresenta repetibilidade.

Gráfico 5 – Múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento do miniforno elétrico.

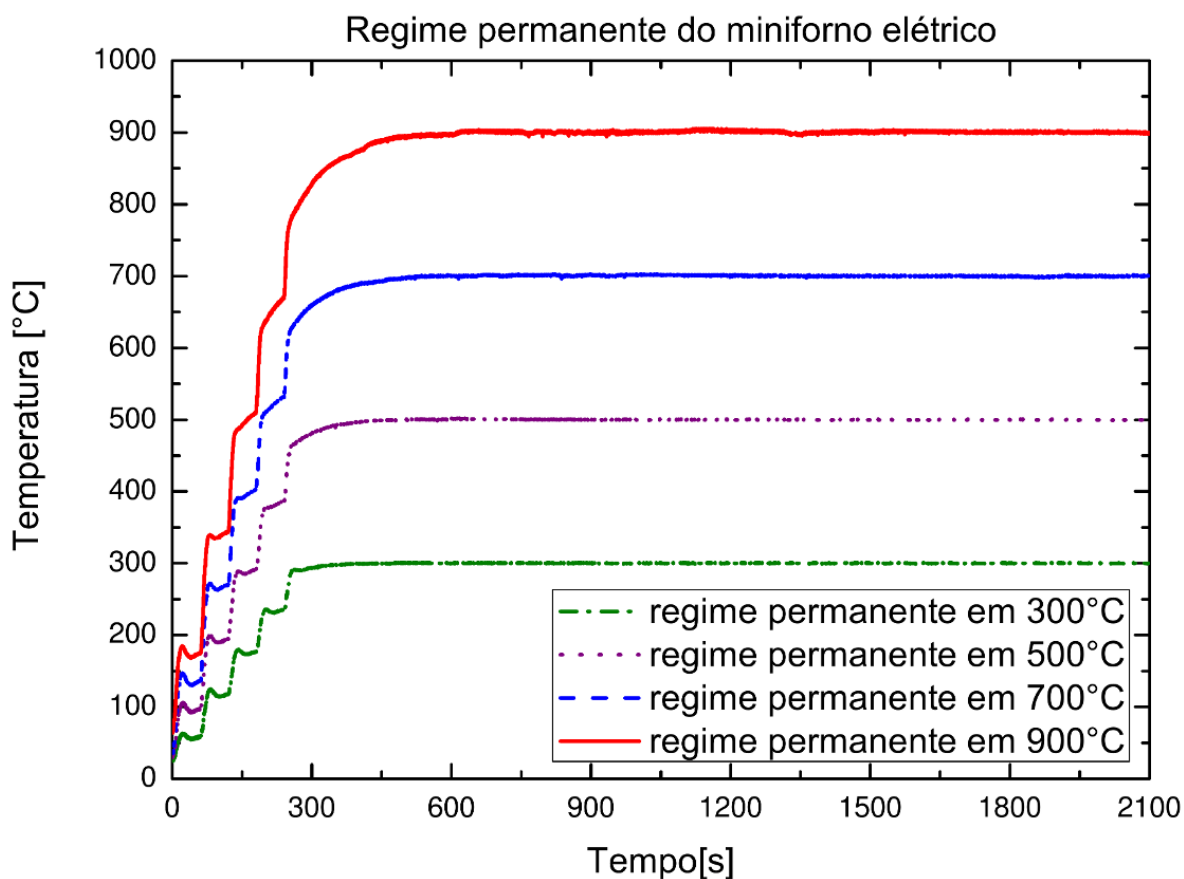


Fonte: Autoria Própria.

#### 4.4 DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE

Um dos aspectos a serem avaliados no miniforno é o seu comportamento em regime permanente em diferentes faixas de temperatura. Para tanto, elaborou-se um ensaio com quatro curvas de aquecimento com diferentes temperaturas em regime permanente, o resultado deste ensaio é apresentado no Gráfico 6, Neste gráfico, nota-se que após a curva alcançar o seu valor final não há erros sistemáticos (há somente flutuações de temperatura que não passam de 0,5% do valor final).

Gráfico 6 – Desempenho em regime permanente do miniforno para diversos patamares de temperatura.



Fonte: Autoria Própria.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho foi comprovado que o projeto e execução do miniforno elétrico e o seu sistema controle atende aos parâmetros requeridos, que são: o miniforno ser capaz de confinar o calor gerado num volume na ordem milímetros (seção 4.2), de haver

repetibilidade nos ciclos e séries de aquecimento (seção 4.3), e de possuir uma flutuação de valores em regime permanente mínima (seção 4.3) mesmo próximo da temperatura máxima de operação. Por fim, cabe destacar que o miniforno elétrico apresenta custo relativamente baixo em componentes e materiais (menos de R\$ 1000,00) e os componentes que mais sofrem desgaste (resistência de aquecimento e termopar) de fácil aquisição, baixo custo e substituição simples.

#### 4.6 TRABALHOS FUTUROS

O miniforno elétrico cumpre o seu objetivo primordial. Contudo, há espaço para melhorias a ser incorporadas, das quais o autor sugere:

- Aumentar a temperatura máxima de operação: Esta pode ser alcançada pela simples troca da resistência de aquecimento (NiCr) por ligas mais resistentes termicamente;
- Novos formatos de resistência: Nesse trabalho, escolheu-se o *design* da resistência de aquecimento com base na necessidade do laboratório em que foi desenvolvido este projeto. Contudo, um estudo sobre novos formatos de resistência que mudem a distribuição do calor na fibra ótica pode gerar novos resultados nesta área.
- Integração com sistemas de interrogação de fibra ótica: O *software* LabView<sup>®</sup> da National Instruments<sup>®</sup> possui *drivers* compatíveis com diversos analisadores de espectro ótico (e.g AQ6375 da marca Yokogawa<sup>®</sup>), estes *drivers* permitem enviar configurações e sinais de controle para estes sistemas de aquisição. Sendo assim, é possível sincronizar eventos advindos do microcontrolador e/ou IHM para com esses sistemas de medições.
- Sistema de Tracionamento: uma das principais melhorias a ser incorporada nesse projeto é o sistema de tracionamento, pois com este sistema é plausível a fabricação de *tappers* em fibra ótica (reduzindo os custos desses dispositivos).



## REFERÊNCIAS

BENGAL, West. Control of Optical Fibre Tapper Shape. **Electronics Letters**, v. 27, n. 18, p. 1654–1656, 1991.

BURNS, G. W. Calibration of Thermocouples. In: PARK, Richard M. et al. (Ed.). **Manual On the Use of Thermocouples In Temperature Measurement**. 4. ed. Unknow: ASTM Puplicacion, 1993. cap. 8, p. 141–168.

CANNING, John et al. Regenerated gratings. **Journal of the European Optical Society**, v. 4, 2009. ISSN 19902573.

CANNING, J. et al. Extreme Silica Optical Fibre Gratings. **Sensor Journal**, v. 8, n. 10, p. 6448–6452, 2008.

CORADIN, F. K. et al. Long-term stability decay of standard and regenerated Bragg gratings tailored for high temperature operation. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 12, n. 2, p. 719–729, 2013. ISSN 21791074.

DREYER, U. J. et al. A technique to Package Fiber Bragg Grating Sensors for Strain and Temperature Measurements. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 12, p. 228–236, 2013.

FOKINE, Michael. Formation of thermally stable chencial composition gratings in optical fibers. **Optical Society of America**, v. 19, n. 8, p. 1759–1765, 2002.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, David J.; EMAMI-NAEINI, Abbas. Controle Digital. In: TABAJARA, Maria Eduarda Fett (Ed.). **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6. ed. São Paulo, SP: Bookman, 2013. cap. 8, p. 584–519.

HERZKOVITZ, M. B. Thermocouple Material. In: PARK, Richard M. et al. (Ed.). **Manual on The Use of Thermocouples in Temperature Measurement**. 4. ed. Unknow: ASTM Puplicacion, 1993. cap. 3, p. 43–84.

HIRZE, Timothy. **PWM**. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>>.

JIN, Shenbao et al. Synthesis of spherical NbB<sub>2</sub>x particles by controlling the stoichiometry. **CrystEngComm**, v. 14, n. 6, p. 1925, 2012. ISSN 1466-8033. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=c2ce06436g>>.

JONES, Alan L. Coupling of Optical Fibers and Scattering in Fibers. **Journal of the Optical Society of America**, v. 55, n. 3, p. 261, 1965. ISSN 0030-3941.

MALVINO, Albert; BATTES, David J. MOSFETs. In: COSTA, Gisélia (Ed.). **Eletrônica Volume 1**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2007. cap. 14, p. 478–519.

OGATA, Kutsuhiko. Análise de Resposta Transitória e de Regime Permanente. In: TRIMER, R. (Ed.). **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Education, 2011. cap. 5, p. 145–191.

\_\_\_\_\_. Introdução aos Sistemas de Controle. In: TRIMER, Roger (Ed.). **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Education, 2011. cap. 1, p. 1–9.

\_\_\_\_\_. Modelagem Matemática de Sistemas de Controle. In: TRIMER, Roger (Ed.). **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Education, 2011. cap. 2, p. 11–36.

OLIVEIRA, V. et al. Partial regeneration of aluminum coated FBG along 450 days. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, v. 9634, n. 40, p. 1–4, 2015. ISSN 1996756X 0277786X.

REED, R. P. Principles of Thermoelectric Thermometry. In: PARK, Richard M. et al. (Ed.). **Manual On the Use of Thermocouples In Temperature Measurement**. 4. ed. Unknow: ASTM Publication, 1993. cap. 2, p. 4–44. ISBN 0803114664.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. 1. ed. Nova York: John Wiley, 1989.

SILBERSCHATZ, Abraham; GALVIN, Peter Baer; GAGNE, Greg. **Fundamentos de Sistemas Operacionais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

YOO, Sunghyun et al. Suppression of surface crystallization on borosilicate glass using RF plasma treatment. **Surface Science**, v. 316, p. 484–490, 2014.