

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Blumenau  
Departamento de Engenharia de Controle, Automação e  
Computação



Gustavo Abiel Link

Controle de Temperatura em Forno a Gás

Blumenau

2021

**Gustavo Abiel Link**

## **Controle de Temperatura em Forno a Gás**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.  
Orientador: Prof. Dr. Daniel Martins Lima

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Blumenau  
Departamento de Engenharia de Controle, Automação e Computação

Blumenau  
2021

Gustavo Abiel Link

# Controle de Temperatura em Forno a Gás

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

## Comissão Examinadora



Documento assinado digitalmente  
Daniel Martins Lima  
Data: 23/05/2021 10:19:23-0300  
CPF: 059.552.736-11  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. Daniel Martins Lima  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador



Documento assinado digitalmente  
Ebrahim Samer El Youssef  
Data: 24/05/2021 16:26:27-0300  
CPF: 008.252.109-33  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. Ebrahim Samer El Youssef  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Marcos Vinicius Matsuo  
Data: 24/05/2021 07:42:46-0300  
CPF: 052.580.029-85  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. Marcos Vinicius Matsuo  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 22 de maio de 2021

Dedico este trabalho ao Márcio Rodrigo Loos,  
professor exemplo para minha carreira profissional.

# Agradecimentos

Agradeço imensamente meus pais Lourival e Jeane, e minha irmã Gabriële pelo suporte em meus estudos e pelo apoio nos momentos difíceis.

Sou grato aos meus avós e tios pelo auxílio na construção de protótipos para os trabalhos acadêmicos.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de empenho e de distração nestes anos de convivência, em especial aos confrades André, Christian, Eduard, Gabriela, Júlio, Lucas e Martin.

Ao professor Daniel pelos ensinamentos e pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial aos professores do Centro de Blumenau, pela estrutura disponibilizada para consolidação do conhecimento.

E ao time do LDAP Cocção da Whirlpool pela flexibilidade em realizar este estudo juntamente com o estágio.

*"Feito é melhor que perfeito."*  
(Sheryl Sandberg)

# Resumo

Neste trabalho é realizado o desenvolvimento de um dispositivo para aprimorar uma etapa do processo de aprovação dos produtos de cocção que contêm um forno a gás, auxiliado pelo time de engenheiros e técnicos da Whirlpool S/A. O teste normativo de referência é o procedimento de aquecimento das várias partes do aparelho presente na norma ABNT NBR 13723-1: Performance e Segurança, a ser realizado em um laboratório acreditado pelo INMETRO para aprovar a venda aos usuários domésticos de modelos de fogões de piso com forno. No protótipo é usado o controle automático com realimentação, projetado com a estratégia de ação Proporcional Integral. O modelo da planta é estimado utilizando métodos de identificação por funções de transferência de primeira ordem, e a lei de controle é implementada no microcontrolador Arduino em conjunto com um servomotor para atuar na dinâmica do processo. Para validar o sistema de controle desenvolvido, dois modelos de produto que apresentam a mesma cavidade do forno são ensaiados em dois níveis de temperatura (200°C e 240°C). Os resultados obtidos indicam que a solução desenvolvida apresenta constância entre repetições, independente de modelo ou temperatura ajustada

**Palavras-Chave:** 1.Aquecimento. 2.Cocção. 3.Forno a Gás. 4.Controle Realimentado

# Abstract

In this study, a device is developed to improve a step in the approval process for stoves that contain a gas oven, assisted by the team of engineers and technicians from Whirlpool S/A. The normative test is the heating procedure of the various parts of the appliance, present in the ABNT NBR 13723-1 standard: Performance and Safety, to be carried out in a laboratory accredited by INMETRO to approve the sale to home users of models of stoves with oven. The prototype uses automatic feedback control, designed with the Proportional Integral action strategy. The process model is estimated using first order transfer function identification methods, and the control system is implemented in the Arduino microcontroller in conjunction with a servo motor to act on the process dynamics. To validate the control system developed, two product models with the same oven cavity are tested at two temperature levels (200°C and 240°C). The results obtained indicate that the developed solution presents constancy between repetitions, regardless of model or adjusted temperature.

**Keywords:** 1.Cooking. 2.Gas Oven. 3.Heating. 4.Feedback Control

# Lista de figuras

Figura 1 – Consumo de energia no setor doméstico . . . . .	14
Figura 2 – Exemplo de alguns produtos da linha branca produzidos pela Whirlpool S/A . . . . .	15
Figura 3 – Fogão de piso da linha Consul, com detalhe para porta e cavidade do forno . . . . .	16
Figura 4 – Processo típico de troca de calor . . . . .	19
Figura 5 – Processo típico de troca de calor utilizando controle manual . . . . .	20
Figura 6 – Processo típico de troca de calor utilizando controle automático . . . . .	21
Figura 7 – Avaliação de processos perante sinais de teste . . . . .	22
Figura 8 – Respostas típicas ao degrau em malha aberta . . . . .	23
Figura 9 – Curvas de resposta ao degrau de sistemas de primeira e segunda ordem . . . . .	25
Figura 10 – Método de Sundaresan e Krishnaswamy para modelagem de processos de primeira ordem . . . . .	26
Figura 11 – Método de Smith para a modelagem de sistemas de primeira ordem . . . . .	26
Figura 12 – Método de Mollenkamp para a modelagem de sistemas de segunda ordem . . . . .	27
Figura 13 – Comparação da resposta de diferentes controladores para uma perturbação do tipo degrau. . . . .	29
Figura 14 – Partes laterais e frontais do aparelho. . . . .	32
Figura 15 – Linha de fornecimento de gás interceptada por uma válvula solenóide de ação proporcional . . . . .	35
Figura 16 – Representação esquemática do funcionamento da estratégia <i>bypass</i> . . . . .	35
Figura 17 – Servomotor acoplado ao eixo da válvula do forno de um fogão de piso . . . . .	36
Figura 18 – Característica do eixo das válvulas de fogões a gás . . . . .	37
Figura 19 – Protótipo do acoplamento entre servomotor/eixo da válvula . . . . .	38
Figura 20 – Processo de estabilização da temperatura na cavidade do forno utilizando controle manual . . . . .	39
Figura 21 – Manípulo do forno identificado com as posições de vazão de gás correspondente . . . . .	40
Figura 22 – Produto padrão do LDAP - modelo BF150ARNNA . . . . .	41
Figura 23 – Obtenção da dinâmica do sistema físico real do produto padrão (BF15) . . . . .	42
Figura 24 – Sobreposição dos sinais simulados para verificar a similaridade com o sistema físico real . . . . .	43
Figura 25 – Árvore de amostragem utilizada para análise dos dados . . . . .	46
Figura 26 – Execução do controle projetado no produto padrão BF150AR . . . . .	46

Figura 27 – Execução do controle projetado em produto com a mesma cavidade

BFO4TA . . . . . 47

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades relacionadas com as respostas típicas ao degrau em malha aberta apresentadas na Figura 8. . . . .	23
Tabela 2 – Compilado dos resultados obtidos . . . . .	48

# Lista de Siglas e Abreviaturas

200 <sup>+4</sup> <sub>0</sub> °C	<i>Duzentos graus Celsius, sem afastamento inferior e afastamento superior 4°C</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
GLP	<i>Gás Liquefeito de Petróleo</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INMETRO	<i>Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LDAP	<i>Laboratório de Desenvolvimento e Aprovação de Produtos</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
PDP	<i>Processo de Desenvolvimento de Produtos</i>
PI	<i>Proporcional Integral</i>
SA	<i>Sociedade Anônima</i>
TIC	<i>Temperature Indicator Controller</i>
TT	<i>Temperature Transmitter</i>
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Objetivo geral . . . . .	17
1.1.1	Objetivos específicos . . . . .	17
1.2	Organização . . . . .	17
2	REVISÃO DE LITERATURA . . . . .	18
2.1	Conceitos básicos de controle de processos . . . . .	18
2.1.1	Sistema em malha aberta . . . . .	19
2.1.2	Sistema em malha fechada . . . . .	20
2.1.3	Identificação de sistemas . . . . .	21
2.1.3.1	Função de transferência . . . . .	23
2.1.3.2	Métodos de modelagem para funções de primeira ordem . . . . .	25
2.1.3.3	Método de modelagem para funções de segunda ordem . . . . .	26
2.1.4	Técnicas de controle . . . . .	28
2.1.4.1	Controle PI . . . . .	29
2.1.5	Discretização em equivalente digital . . . . .	30
2.2	Processo de desenvolvimento e aprovação de produtos . . . . .	31
2.2.1	Norma ABNT NBR 13723-1 . . . . .	31
2.2.2	Norma IEC 60335-2-6 . . . . .	33
2.3	Considerações . . . . .	33
3	PROPOSTA . . . . .	34
3.1	Descrição do problema . . . . .	34
3.1.1	Proposta 1 . . . . .	34
3.1.2	Proposta 2 . . . . .	35
3.1.3	Proposta 3 . . . . .	36
3.1.4	Seleção da proposta . . . . .	36
3.1.4.1	Conceito do dispositivo . . . . .	37
3.2	Identificação dos parâmetros e seleção do controlador . . . . .	38
3.2.1	Requisitos do sistema . . . . .	38
3.2.2	Implementação da solução . . . . .	39
3.3	Considerações . . . . .	40
4	RESULTADOS . . . . .	41
4.1	Metodologia de teste . . . . .	41
4.2	Estrutura do modelo e estimação dos parâmetros . . . . .	42

4.3	Projeto do controlador . . . . .	44
4.3.1	Laço de controle . . . . .	45
4.4	Análise dos dados . . . . .	45
4.5	Considerações . . . . .	48
5	CONCLUSÕES . . . . .	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	50
A	PROPOSTA COMERCIAL PARA VÁLVULA SOLENÓIDE DE AÇÃO PROPORCIONAL . . . . .	52

# 1 Introdução

No começo da história humana os alimentos caçados eram consumidos crus pelos homínídeos que viviam em estado de animalidade. Segundo Flandrin e Montanari (1998, p. 30) existe uma tendência entre historiadores da pré-história em admitir que foi a partir do domínio do fogo, há 500 mil anos, que a cozinha fez o homem, em um provável cenário onde primeiramente “[...] o fogo foi utilizado para cozer os alimentos e só bem mais tarde foi empregado para outros fins”. Ainda em sua obra, Flandrin e Montanari (1998) relatam que o processo de preparação (temperar, marinar, cortar, coar) e cocção dos alimentos por meio da irradiação de calor tornou-os saborosos e não-nocivos, alavancando o desenvolvimento orgânico do homem com a introdução do consumo de vegetais e animais cozidos na dieta, que são mais fáceis de serem digeridos.

Desde então a linha do tempo da preparação de alimentos passou dos assados em brasa, ou sobre placas aquecidas, para pequenos buracos no solo com fogo ou pedras quentes dentro (sobre o qual se colocavam refratários cerâmicos), até os modelos de barro com estruturas de combustão mais complexas, e posteriormente os de metal com fontes de calor mais eficientes e que incluem também um forno (FLANDRIN; MONTANARI, 1998).

Até meados do século XX os fogões e fornos a lenha predominavam nas casas, foi então que a descoberta da refinação do petróleo trouxe à tona o GLP - e com isso os fogões a gás - os quais ainda são muito utilizados hoje em dia (SILVA, 2007). Especialmente no Brasil, aproximadamente um quarto da energia utilizada nas residências é proveniente do gás combustível derivado do petróleo, conforme indicado na Figura 1, que diz respeito ao estudo divulgado pela Empresa de Estudos Energéticos (2019). Este tipo de gás tem como principal aplicação residencial o aquecimento de fogões, e historicamente fez com que o uso de lenha decrescesse.

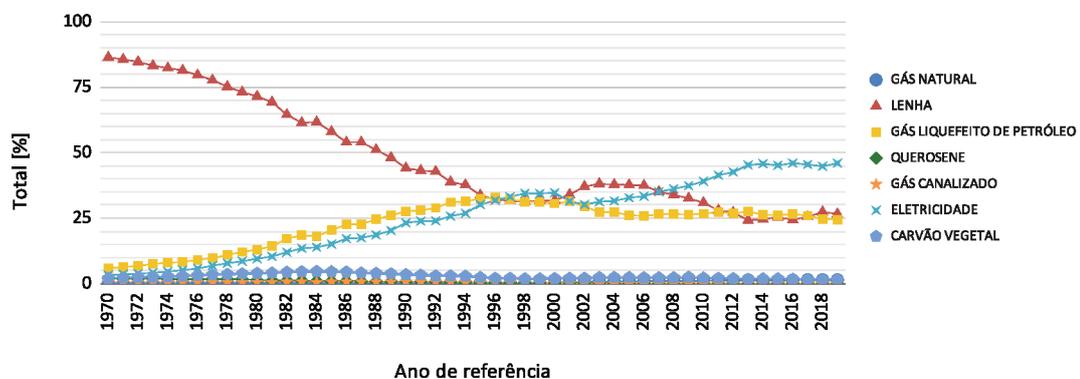


Figura 1 – Consumo de energia no setor doméstico (EMPRESA DE ESTUDOS ENERGÉTICOS, 2019).

No contexto do desenvolvimento industrial da linha de produtos para cocção está a Whirlpool S/A, uma empresa brasileira do ramo de eletrodomésticos subsidiária da multinacional Whirlpool Corporation - maior fabricante de eletrodomésticos no mundo - e que receberá menção neste documento por se tratar do local onde o presente trabalho foi desenvolvido.

A empresa é resultado da fusão entre a Multibrás e a Embraco ocorrida em 2006, e se destaca por ser a detentora das marcas Brastemp, Consul e KitchenAid no Brasil (Figura 2). Com unidades nacionais distribuídas em três fábricas (Rio Claro, Manaus e Joinville) e dois centros administrativos, além de quatro centros de tecnologia, vinte e três laboratórios e três centros de distribuição, a multinacional emprega onze mil colaboradores engajados no desafio de traduzir as necessidades do consumidor em produtos e serviços inovadores.



Figura 2 – Exemplo de alguns produtos da linha branca produzidos pela Whirlpool S/A.

Pontualmente no processo de aprovação dos produtos para cocção, existe um ensaio de conforto térmico para garantir a segurança do usuário em relação ao manuseio das partes adjacentes (porta, manípulos e laterais) do fogão de piso. Esse teste é regido pela norma nacional ABNT (2004) NBR 13723-1 que define valores de temperatura de referência para condições laboratoriais e de produto para que os resultados gerados sejam considerados válidos. Portanto, para ser aprovado, o produto deve passar um período de tempo com todos os queimadores da mesa ligados na posição de máxima vazão de gás e com o forno estabilizado, para o técnico então registrar a temperatura das superfícies manuseáveis e depois comparar com o valor regulatório que garante a segurança do consumidor, aprovando ou não o ensaio de aquecimento.

A oportunidade de estudo aparece no procedimento de estabilização da temperatura da cavidade do forno (ver Figura 3) feita atualmente de forma manual pelo técnico, e considerada crítica por envolver diretamente a destreza do operador no manuseio minucioso da válvula do produto.



Figura 3 – Fogão de piso da linha Consul, com detalhe para porta e cavidade do forno.

Muitas técnicas automatizadas são empregadas para estabilizar a cavidade de equipamentos com resistores elétricos como fonte de calor, sobretudo pela maior disponibilidade de controladores comerciais que desempenham esta funcionalidade através de contadoras e fontes variáveis. No entanto, quando o tema é controlar o fluxo de calor em equipamentos com queimadores a gás, fazem falta dispositivos que regulam proporcionalmente a vazão ou a pressão do gás combustível apenas no forno, especialmente devido a tubulação principal de gás alimentar todos os queimadores simultaneamente.

Neste trabalho, especificamente na etapa de concepção das soluções para o controle da temperatura da cavidade de fornos cuja fonte de aquecimento é o gás canalizado, duas de três propostas sugeridas se dão através do uso de uma válvula solenóide proporcional. Este tipo de atuador requer cortes e adaptações na rede de gás interna do produto, o que implica alteração do desempenho original, longo período de instalação, e perda da amostra ao final do ensaio, justamente por conta da modificação ser permanente. Assim, a última proposta, e aquela que será realizada neste trabalho de conclusão de curso, é um método pouco invasivo para o controle da temperatura que não requer modificação na tubulação e tampouco na cavidade do forno, bastando apenas um servomotor acoplado ao manípulo do forno, rotacionando-o para realizar o controle requerido.

## 1.1 Objetivo geral

Projetar um dispositivo que permita a automação do processo de aquecimento da cavidade de fornos à gás, a ser aplicado em um laboratório de desenvolvimento e aprovação de produtos de cocção.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto incluem:

- Desenvolver uma metodologia de identificação de sistemas que possa ser aplicada a diferentes fornos com resultados consistentes;
- Elaborar o projeto eletro-mecânico do sistema de acionamento que seja adequado para automatizar fornos à gás;
- Implementar um sistema de controle que consiga lidar com diferentes tipos de fornos de maneira consistente.

## 1.2 Organização

O restante do trabalho é dividido em 4 capítulos, organizados conforme descrito a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão das fontes consultadas sobre conceitos de controle de processos e métodos de identificação de sistemas utilizando análise experimental. Também são comentadas nesse capítulo as normativas vigentes que regulamentam o ensaio. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos propostos para a efetivação deste trabalho, detalhando três soluções plausíveis para o dispositivo de controle de temperatura, assim como os requisitos de aceitação da solução. Os resultados são apresentados no Capítulo 4 por meio de avaliação numérica dos dados observados nos ensaios. Para finalizar, estão sintetizadas no Capítulo 5 as conclusões do trabalho realizado e propostas para trabalhos futuros.

## 2 Revisão de Literatura

Neste capítulo é introduzido ao leitor a teoria sobre identificação de sistemas utilizando funções de transferência de primeira e segunda ordem, também é comentada uma estratégia para sintetização do controlador de ação proporcional integral para plantas de primeira ordem e são apresentados os itens normativos que regulam o ensaio de conforto térmico.

### 2.1 Conceitos básicos de controle de processos

As operações industriais abrangem diferentes níveis de complexidade, englobam diversos tipos de produtos e exigem controle preciso dos produtos gerados. Como consequência da complexidade dos processos com que estão envolvidos, os maiores usuários de instrumentação são as indústrias que atuam nas áreas de petróleo, química, petroquímica, alimento, cerâmica, celulose e papel, têxtil, geração de energia etc (ROGGIA; FUENTES, 2016) e (BEGA, 2006). Ogata e Yang (2010) afirmam que em todas essas aplicações é indispensável se controlar e manter constantes as principais variáveis, tais como pressão, nível, vazão e temperatura.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, para Hendricks, Jannerup e Sørensen (2008), os instrumentos de medição e atuação permitem manter e controlar estas variáveis em condições mais adequadas e precisas do que se elas fossem operadas manualmente por um operador. Em se tratando da teoria de controle clássico, são os sistemas de controle que mantêm a variável controlada no valor especificado, comparando o valor da variável medida com o valor desejado - ponto de ajuste ou *setpoint* - e fazendo as correções em função do desvio existente entre estes dois valores, sem a necessidade de intervenção humana (PESSOA; SPINOLA, 2014).

Os diversos aspectos de instrumentação e de controle automático de processos podem ser ilustrados com o exemplo envolvendo um trocador de calor adaptado do livro de BEGA (2006). O objetivo deste sistema é aquecer um fluido através do vapor gerado por uma caldeira, e utilizar o fluido aquecido como fonte de energia em uma etapa subsequente. No radiador da Figura 4, a temperatura do fluido aquecido é influenciada por vários fatores, sendo que os principais são vazão e temperatura de entrada do fluido a ser aquecido, vazão e pressão do vapor utilizado no equipamento. Como se deseja regular a temperatura final do fluido a ser aquecido em um valor predefinido, denota-se a temperatura do fluido aquecido como variável controlada, ao passo que utilizar da abertura da válvula para controlar a vazão de vapor no radiador define a vazão de vapor como variável manipulada.

No cenário mais simples, ou sistema em malha aberta, nada será feito pois não existe

comunicação entre saída/entrada do processo. Para o caso de existir tal troca de informação, diz-se que o sistema está em malha fechada e alguns ajustes podem ser realizados a fim de corrigir o erro entre o nível desejado e o obtido.

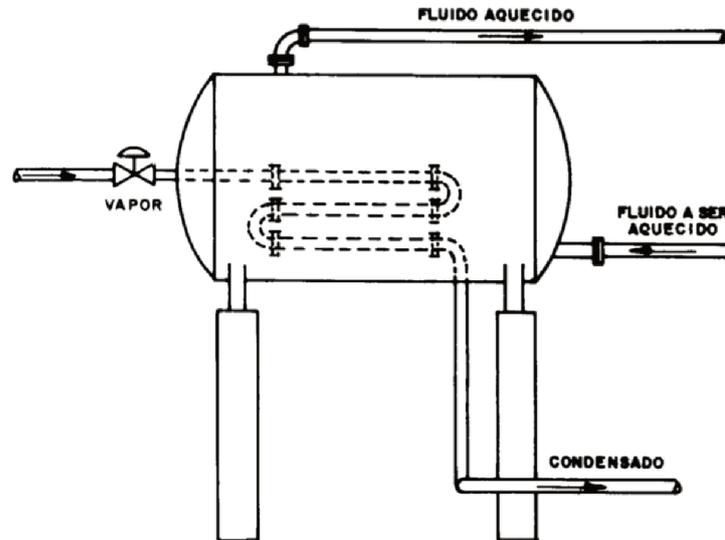


Figura 4 – Processo típico de troca de calor (BEGA, 2006).

### 2.1.1 Sistema em malha aberta

Sistema em malha aberta é aquele em que a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam na variável controlada.

O conceito de malha aberta é frequentemente utilizado nas discussões dos sistemas de controle para indicar que se está investigando a dinâmica do processo em uma condição não controlada, ou seja, investiga-se apenas sua dinâmica perante configurações que se mantêm constantes ao longo do tempo. Para o sistema do trocador de calor em questão, pode-se entender que de acordo com a condição inicial dos componentes *temperatura* e *vazão*, decorrido um tempo suficientemente grande, será estabelecido o equilíbrio em um patamar provavelmente distante do valor idealmente desejado.

Um exemplo de aplicação desta estratégia está relatado na análise da estabilidade em malha aberta de uma fonte AC integrada com um multi-terminal DC, de Du, Fu e Wang (2017). No artigo os autores investigam o comportamento de uma parte do sistema em malha aberta e propõem um método capaz de prever com grande acurácia o risco de instabilidade na análise de pequenos sinais.

## 2.1.2 Sistema em malha fechada

Nos casos de controle de processos em malha fechada, ou sistema de controle com realimentação, a função fundamental do sistema de controle é manipular a relação entrada/saída de energia ou material, de maneira que a variável controlada seja mantida dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o sistema regula a variável controlada, fazendo correções na variável manipulada (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). O controle em malha fechada pode se dar utilizando um operador humano (controle manual) ou mediante a utilização de instrumentação (controle automático).

Conforme mostrado na Figura 5, no processo utilizando controle manual o operador terá como função medir a temperatura do fluido aquecido e corrigir a vazão de vapor adicionado ao trocador, de forma a manter a temperatura da variável controlada no valor desejado. Em outras palavras, o operador irá medir a temperatura do fluido aquecido através do tato; este sinal será comparado mentalmente com a temperatura desejada que está armazenada em seu cérebro; com base na diferença entre estes dois valores, o operador fará a computação e; em seguida, atuará na válvula de admissão de vapor fazendo a correção.

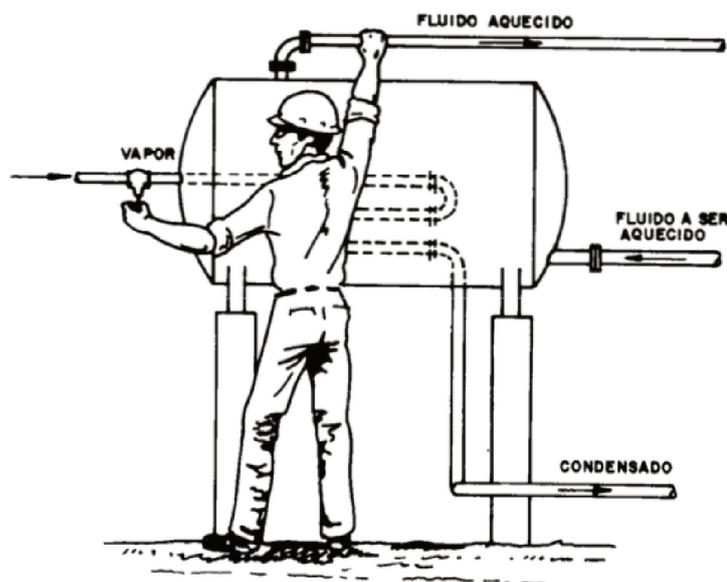


Figura 5 – Processo típico de troca de calor utilizando controle manual (BEGA, 2006).

Note que o processo descrito de medir, comparar, computar e corrigir relata intruções passíveis de serem implementadas em um microcontrolador a fim de automatizar o controle manual. Visando esta possibilidade, na Figura 6, a medição é realizada pelo transmissor de temperatura (TT); a comparação do valor medido com o ponto de ajuste e a computação são executadas pelo controlador de temperatura (TIC), enquanto a correção será efetivada pela válvula de controle com base no sinal recebido do TIC. (BEGA, 2006).

A forma de execução e o tempo gasto para efetivação das ações de controle dependem,

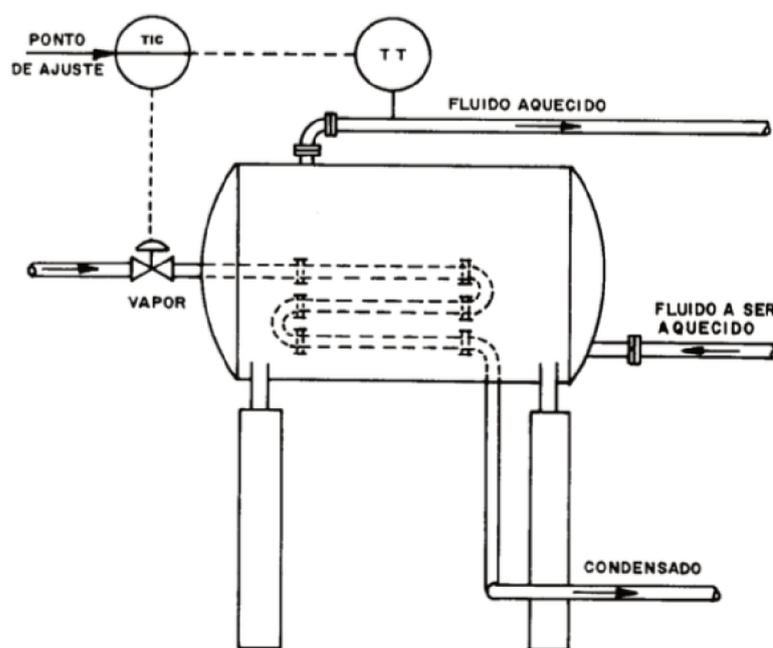


Figura 6 – Processo típico de troca de calor utilizando controle automático (BEGA, 2006).

basicamente, do sistema de controle utilizado e das características do processo controlado. Como as características do processo controlado (capacitâncias, resistências, tempo morto etc.) não podem ser alteradas, o que se faz é especificar o sistema de controle (transmissor, controlador, tipo e ajuste das ações de controle) mais adequado às características do processo controlado, como forma de se otimizar o rendimento e facilitar a operação adequada do equipamento.

### 2.1.3 Identificação de sistemas

A literatura de controle e automação traz em sua essência a criticidade envolvida na atividade de eleger uma equação única que descreve um sistema físico complexo - dada sua inerente não linearidade e fatores como ruídos e incertezas associadas aos sensores e atuadores - e também reitera que a habilidade do grupo de engenheiros influencia a tomada de um bom modelo, conforme o trecho expresso no parágrafo seguinte.

A identificação de sistemas é tratada, muitas vezes, como um problema de otimização que envolve medidas para adequação de modelos candidatos a representar um processo real [...]. A identificação de sistemas é um claro exercício que envolve múltiplos e conflitantes objetivos, tipicamente complexidade do modelo, critérios de desempenho e validação, que influenciam a seleção das estruturas do modelo matemático. A noção de um “bom modelo” é subjetiva, fazendo com que a tentativa e erro seja uma regra relevante de engenharia em identificação de processos (COELHO; COELHO, 2004, p. 27).

No âmbito do controle de processos, um sistema pode ser definido como sendo a associação de componentes elétricos e mecânicos que têm suas propriedades estudadas para

que desempenhem um determinado propósito (COELHO; COELHO, 2004). Independentemente de ser um sistema de fabricação de papel, circuito elétrico, servomecanismo de posição, sistema biológico ou econômico, manipulador robótico, reator, coluna de destilação ou outros, os principais elementos de uma planta de controle, bem como sua representação são similares.

Para processos industriais, o modelo aproximado pode ser obtido a partir do tratamento das medidas (filtragem de dados) coletadas em uma realização experimental, onde as incertezas acumuladas interferem na construção do modelo matemático exato, tendo seu comportamento representado adequadamente somente em uma determinada faixa de operação. Este método é denominado análise experimental, onde primeiramente são realizadas medidas da entrada e da saída do sistema e, somente após essa etapa, obtém-se um modelo matemático para representá-lo.

O modelo matemático final é uma forma do conhecimento da relação existente entre os sinais de entrada e saída, podendo ser caracterizada no processo físico pela função de transferência.

Para a análise ser realizada é preciso impor, por exemplo, um sinal particular para a entrada e estudar a resposta do processo em malha aberta, assim, as características de estabilidade, tempo de assentamento, atraso de transporte e outros podem ser estimadas. A Figura 7 ilustra o procedimento de avaliação da dinâmica de um processo perante um sinal de teste.

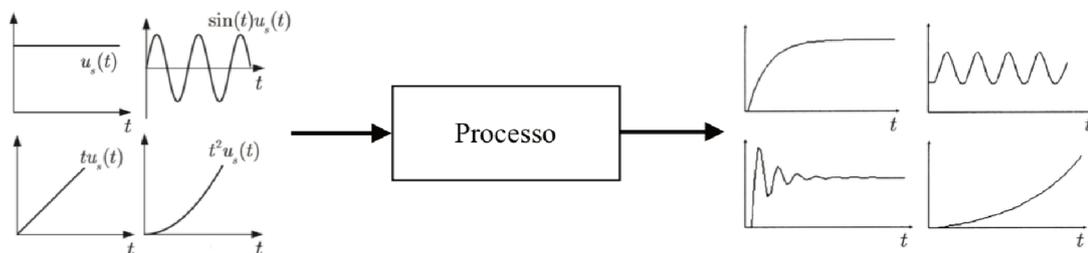


Figura 7 – Avaliação de processos perante sinais de teste (COELHO; COELHO, 2004).

Introduzindo um sinal de entrada com amplitude constante (abertura fixa de uma válvula de entrada por exemplo) podemos caracterizar, de forma preliminar, a dinâmica de um processo através da interpretação gráfica conforme os casos mostrados na Figura 8, e utilizar metodologias de identificação de sistemas para compor uma função de transferência que melhor se adapte ao padrão do sinal capturado.

Adicionalmente na teoria de sinais e sistemas, Ogata e Yang (2010) e Lathi (2006) afirmam que a característica mais importante na dinâmica de um sistema de controle é a estabilidade (seja ele estável ou instável). A Tabela 1 contempla a classificação dos casos da Figura 8, que em suma descreve os seguintes tipos de sistemas:

- Estável se sua saída retorna para a condição de equilíbrio estático após submetido à uma condição inicial;

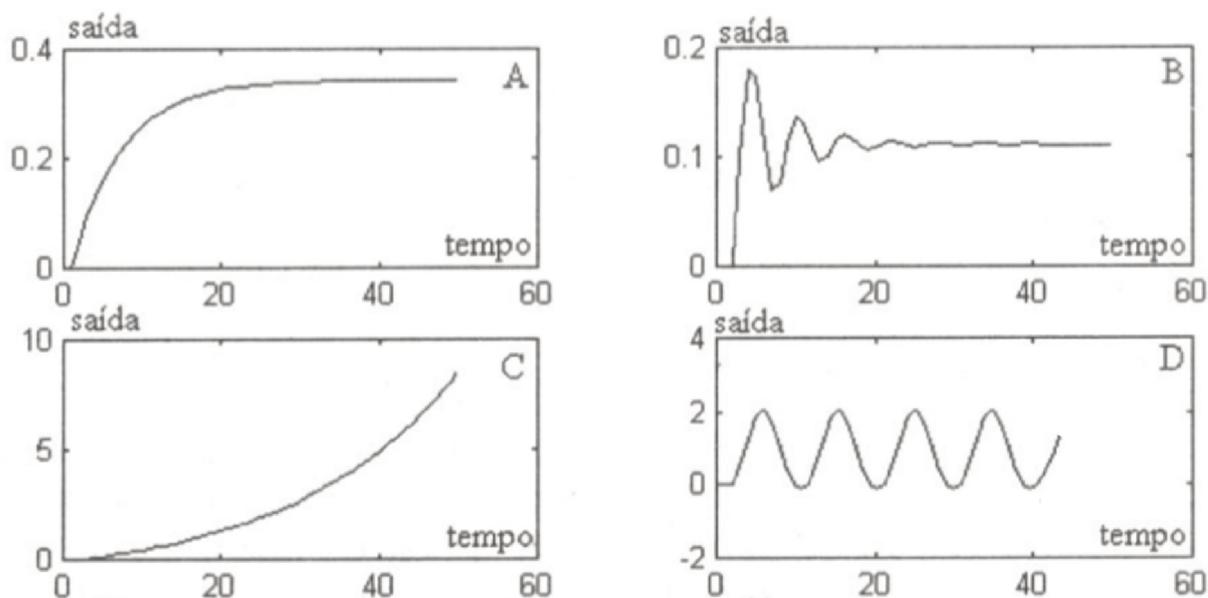


Figura 8 – Respostas típicas ao degrau em malha aberta (COELHO; COELHO, 2004).

- Criticamente estável se as oscilações presentes na resposta continuam dentro de limites finitos indefinidamente;
- Instável se sua saída diverge sem limites do seu estado de equilíbrio após submetido à condições iniciais.

Tabela 1 – Propriedades relacionadas com as respostas típicas ao degrau em malha aberta apresentadas na Figura 8.

Resposta	Comportamento		
	Estável	Instável	Criticamente estável
A	X		
B	X		
C		X	
D			X

### 2.1.3.1 Função de transferência

Os algoritmos para identificação de sistemas a partir da análise da resposta ao degrau apenas retornam valores para os parâmetros do modelo, o qual deve ser definido previamente (função de transferência de primeira ordem por exemplo). Através da identificação de uma função de transferência que descreve com suficiente aproximação o sistema físico real, pode-se utilizar a relação existente entre entrada (causa) e saída (efeito) para executar ações de controle e alcançar requisitos de projeto estipulados.

Por definição a razão entre as transformadas de Laplace da saída  $Y(s)$  e da entrada  $X(s)$  é a função de transferência  $G(s)$  de um sistema, ou seja,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.1)$$

resultando em uma razão de polinômios no domínio transformado  $s$ .

Utilizar o domínio de Laplace para descrever o comportamento de sistemas contínuos traz à tona algumas facilidades:

1. Encontrar a resposta de um sistema a uma dada entrada (no domínio  $s$ ) exige apenas uma operação de multiplicação entre sua respectiva função de transferência  $G(s)$  pela transformada de Laplace  $X(s)$  da entrada;
2. Encontrar o equivalente da resposta  $Y(s)$  no domínio do tempo depende apenas da determinação via tabela de transformadas;
3. Conhecer os polos (raízes do denominador da função de transferência) e os zeros (raízes do numerador da função de transferência) permite várias inferências sobre a dinâmica do sistema.

No cotidiano industrial, PESSOA e SPINOLA (2014) retratam a importância de se conhecer o processo e incluir apenas fatores importantes na análise de causa/efeito para manter a ordem do sistema tão baixa quanto possível. No livro, os autores expõem que todos os modelos são errados, mas alguns são úteis, e que convém, durante a modelagem, conhecer quais fatores devem ser incluídos e quais omitidos do modelo. Para o estudo do forno de um fogão doméstico, espera-se que a causa primária seja o fluxo de gás, e o efeito consequente a elevação da temperatura. Ao passo que são adicionadas variáveis secundárias, a dizer: a influência das condições ambientais, as características construtivas do produto e a qualidade do gás empregado, o nível de interações entre as causas torna o projeto mais complexo. Nesse sentido, abordando inicialmente a interação primária dos fenômenos físicos, sobretudo em um sistema térmico, tem-se quase sempre um modelo de primeira ou segunda ordem suficientemente adequado à realidade.

Em particular, sistemas de primeira ordem são definidos pela seguinte função de transferência:

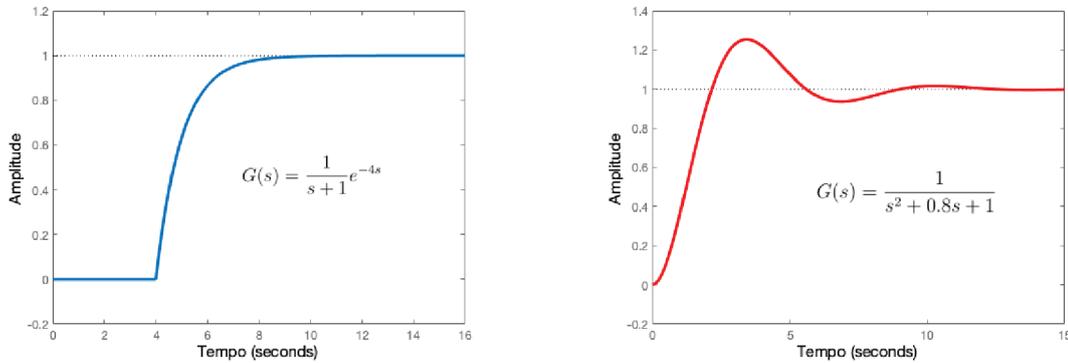
$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (2.2)$$

onde  $K$  é o ganho em regime permanente,  $\tau$  é a constante de tempo e  $L$  é o atraso de transporte, com comportamento similar ao apresentado na Figura 9(a).

De forma análoga, nos casos em que modelos de primeira ordem não representam suficientemente bem a dinâmica de um sistema, uma alternativa para representar sistemas mais complexos é utilizar funções de transferência de segunda ordem, isto é,

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls} \quad (2.3)$$

onde  $K$  é o ganho em regime permanente,  $L$  é o atraso de transporte,  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema e  $\xi$  é a constante de amortecimento, com comportamento similar ao ilustrado pela Figura 9(b).



(a) Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem com atraso de quatro segundos. (b) Resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem sem atraso de transporte.

Figura 9 – Curvas de resposta ao degrau de sistemas de primeira e segunda ordem.

### 2.1.3.2 Métodos de modelagem para funções de primeira ordem

Existem vários métodos propostos na literatura para estimar os coeficientes  $K$ ,  $\tau$  e  $L$  a partir do conhecimento da resposta do sistema ao degrau. Neste trabalho são utilizados dois deles: o método de Sundaresan e Krishnaswamy (1978), e o método de Smith (1985).

O procedimento para se obter o coeficiente de ganho estático segue o mesmo formato para ambos os métodos, sendo dado por

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2.4)$$

onde  $\Delta y = y(\infty) - y(0)$  e  $\Delta u = u(\infty) - u(0)$  representam, respectivamente, a variação na amplitude da resposta  $y(t)$  e da entrada degrau  $u(t)$  aplicada no sistema em seu ponto de operação.

Para o algoritmo proposto por Sundaresan e Krishnaswamy, dois instantes de tempo que correspondem a 35,3% e 85,3% ( $t_1$  e  $t_2$  respectivamente) são estimados, como apresentado na Figura 10. Desta forma, os parâmetros  $\tau$  e  $L$  podem ser computados por

$$\tau = 0,67(t_2 - t_1) \quad (2.5)$$

e

$$L = 1,3t_1 - 0,29t_2. \quad (2.6)$$

Já no método de Smith utilizam-se os pontos correspondentes a 28,3% e 63,2% da resposta em regime permanente ( $t_1$  e  $t_2$ ), conforme representado na Figura 11. E assim

os parâmetros podem ser calculados por:

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1) \quad (2.7)$$

e

$$L = t_2 - \tau. \quad (2.8)$$

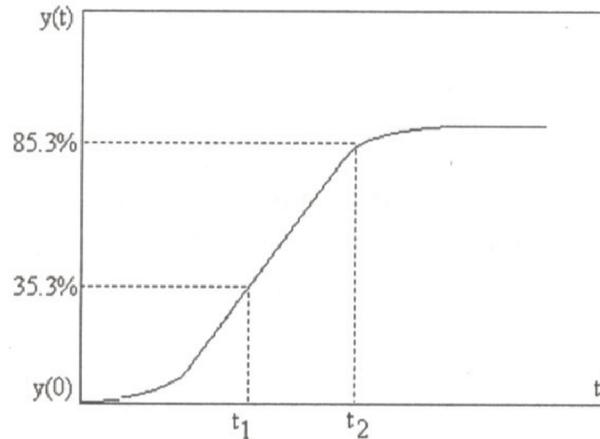


Figura 10 – Método de Sundaresan e Krishnaswamy para modelagem de processos de primeira ordem (COELHO; COELHO, 2004).

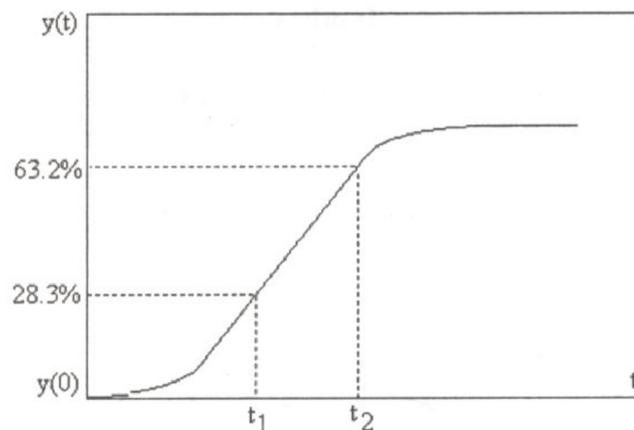


Figura 11 – Método de Smith para a modelagem de sistemas de primeira ordem (COELHO; COELHO, 2004).

### 2.1.3.3 Método de modelagem para funções de segunda ordem

Nos casos em que a aproximação do sistema para uma função de transferência de primeira ordem não for suficiente, isto é, quando a curva obtida pela função estimada divergir muito das características do comportamento real do conjunto físico, o método de Mollenkamp (1988) pode ser utilizado para construir uma representação provavelmente mais fidedigna com base em uma função racional de segunda ordem. O método de Mollenkamp se baseia na medição de três pontos na curva da resposta ao degrau, conforme

representado na Figura 12. Especificamente, os tempos de  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  correspondem aos seguintes instantes de tempo:

- $t_1$ : tempo para a saída alcançar 15% da mudança total final;
- $t_2$ : tempo para a saída alcançar 45% do valor de estado permanente;
- $t_3$ : tempo para a saída alcançar 75% da mudança total final.

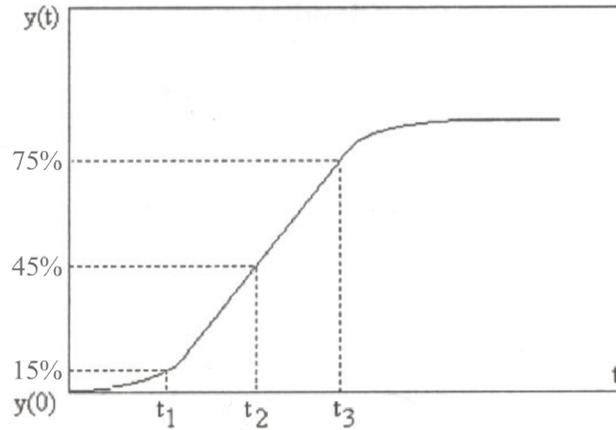


Figura 12 – Método de Mollenkamp para a modelagem de sistemas de segunda ordem (COELHO; COELHO, 2004).

A partir da medição desses instantes de tempo, as constantes do modelo paramétrico de segunda ordem apresentado em (2.3) são calculadas como segue:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2.9)$$

onde  $\Delta y = y(\infty) - y(0)$  e  $\Delta u = u(\infty) - u(0)$  representam a variação na amplitude da resposta  $y(t)$  e da entrada degrau  $u(t)$  aplicada no sistema em seu ponto de operação.

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (2.10)$$

$$\xi = \frac{0,0805 - 5,547(0,475 - x)^2}{x - 0,356} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} f_2(\xi) &= 0,708(2,811)^\xi & \text{se } \xi < 1 \\ f_2(\xi) &= 2,6\xi - 0,6 & \text{se } \xi \geq 1 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\omega_n = \frac{f_2(\xi)}{t_2 - t_1} \quad (2.13)$$

$$f_3(\xi) = 0,922(1,66)^\xi \quad (2.14)$$

$$L = t_2 - \frac{f_3(\xi)}{\omega_n} \quad (2.15)$$

E se  $\xi \geq 1$

$$\tau_{1,2} = \frac{\xi \pm \sqrt{1 - \xi^2}}{\omega_n}. \quad (2.16)$$

### 2.1.4 Técnicas de controle

Conforme mencionado anteriormente, aplica-se uma malha de controle em um processo quando deseja-se impor um conjunto de características de comportamento no sistema a ser controlado. Em termos gerais são duas abordagens: as especificações de regime transitório, e as especificações de regime permanente.

Para o primeiro caso, especificar características de regime transitório significa estabelecer o padrão de resposta a partir de requisitos como picos máximos, tempos para atingir um certo percentual do valor de regime permanente, etc. Por outro lado, a especificação de regime permanente estabelece condições de seguimento ou rejeição de determinados sinais que atuam sobre o sistema e que devem ser mantidas quando o processo alcança seu ponto de operação.

Para atender tais requisitos torna-se necessário então o emprego de técnicas mais buscadas que um simples controlador *On/Off*, como, por exemplo, o controle proporcional (P), controle proporcional integral (PI) ou controle proporcional integral derivativo (PID). Cada uma dessas técnicas implementa certas características no comportamento dinâmico do sistema, a depender da localização no plano complexo dos polos e zeros do conjunto processo mais controlador. Esta situação é estudada pela teoria de controle clássico, e na literatura aparece como *problema de posicionamento de polos*. (CHEN, 1998).

As três técnicas de controle anteriores reagem de forma distinta ao erro presente nos sistemas, e podem ser visualizadas graficamente na Figura 13.

Em específico a ação proporcional ajusta a variável de controle para produzir um sinal de saída que é proporcional à amplitude do erro, e a ação integral produz uma ação baseada na magnitude e na duração do erro, ou seja, o erro acumulado. O uso simultâneo destas duas técnicas permite, de forma muito simples, levar determinado processo para um ponto de operação mais rapidamente e com garantia de erro nulo para sinais de referência constantes.

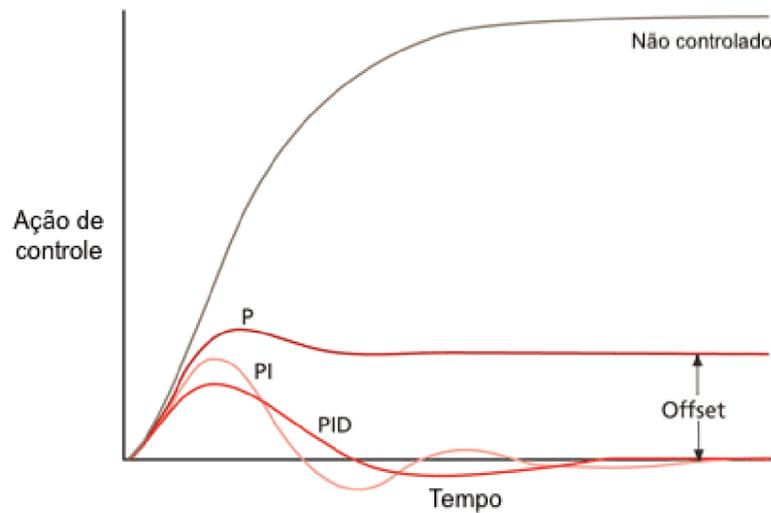


Figura 13 – Comparação da resposta de diferentes controladores para uma perturbação do tipo degrau (MURRILL, 2000).

#### 2.1.4.1 Controle PI

A ação de controle PI é dada por:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p(s + \frac{1}{T_i})}{s} \quad (2.17)$$

onde  $K_p$  e  $T_i$  são, respectivamente, o ganho proporcional e o tempo para que a saída do integrador atinja o valor  $K_p$  para uma entrada unitária, eliminando o erro residual.

Neste momento, é decidido tratar apenas o tipo de sistema de primeira ordem, pelo fato de plantas térmicas apresentarem dinâmica lenta e sem sobressinal. Assim o controle PI, com a sintonia dos parâmetros por alocação de polos, sem cancelamento, deve ser aplicado conforme descrição a seguir.

Este método requer como entrada a função de transferência de malha aberta  $G(s)$ , que pode ser previamente identificada através da análise experimental, a estrutura do controlador  $C(s)$ , que neste caso é um PI implementado na forma nomeada Acadêmica, e o tempo para que a resposta alcance 5% ( $t_{5\%}$ ) do seu valor de regime permanente.

Assumindo a função de transferência de primeira ordem sem atraso de transporte a seguir

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.18)$$

compõe-se a equação característica do sistema em malha fechada como:

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}. \quad (2.19)$$

Substituindo (2.17) e (2.18) em (2.19) e realizando algumas manipulações algébricas têm-se a seguinte equação do sistema em malha fechada em termos dos coeficientes para

sintonia do controle:

$$H(s) = \frac{\frac{KK_p}{\tau} \left( s + \frac{1}{T_i} \right)}{s^2 + s \left( \frac{1 + KK_p}{\tau} \right) + \frac{KK_p}{T_i \tau}}. \quad (2.20)$$

Assumindo como requisito de projeto que o sistema em malha fechada possua polos reais e iguais, tem-se que o denominador de (2.20) deve ser

$$D_{desejada} = \left( s + \frac{1}{\tau_{mf}} \right)^2 \quad (2.21)$$

com constante de tempo da resposta em malha fechada dada por

$$\tau_{mf} = \frac{t_{5\%}}{4,8} \quad (2.22)$$

com coeficiente do ganho proporcional igual a

$$K_p = \frac{\frac{2\tau}{\tau_{mf}} - 1}{K} \quad (2.23)$$

e tempo integrativo

$$T_i = \frac{KK_p \tau_{mf}^2}{\tau}. \quad (2.24)$$

De posse destes parâmetros basta compor a função de transferência  $C(s) = \frac{U(s)}{E(s)}$  para o controlador.

### 2.1.5 Discretização em equivalente digital

Nas aplicações envolvendo microcontroladores digitais, ainda necessitamos discretizar as funções de transferência obtidas no domínio da transformada  $s$  e representadas na forma linear invariante no tempo, como é o caso da função de transferência  $C(s)$ . Arnold Tustin desenvolveu para isso uma técnica de mapeamento de pólos e zeros de uma função de tempo contínuo para um sistema de tempo discreto com base na expansão em série de Taylor da exponencial  $e^{sT}$  (SOARES, 1996).

A discretização através do Método de Tustin, ou transformada bilinear, resume-se em tomar uma função  $C(s)$  e traduzí-la do universo contínuo, para discreto, através da seguinte relação:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s = \frac{2}{T} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)}. \quad (2.25)$$

Assim, basta realizar as manipulações necessárias fazendo  $s = \frac{2}{T} \left( \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right)$  na função de transferência do controlador projetado no domínio do tempo, determinar a transformada Z inversa e por fim utilizar a equação de diferenças resultante para implementar o controlador discreto no microcontrolador.

## 2.2 Processo de desenvolvimento e aprovação de produtos

O conjunto de esforços despendidos na busca de atender as necessidades do mercado (levando em consideração possibilidades e restrições tecnológicas) define o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). Ainda, o desenvolvimento de produto considera a habilidade da empresa em entregar resultados conforme os requisitos, e envolve critérios de segurança, bem como os modos de falha do produto após o lançamento, incorporando especificações de projeto para que este atenda todos os requisitos normativos ao longo do seu ciclo de vida (FORCELLINI; ROZENFELD, 2006).

Na Whirlpool o PDP segue uma variante do modelo de *stage-gate*, utilizado para que todos os envolvidos com o desenvolvimento de novos produtos tenham as ferramentas necessárias para manter a liderança de mercado. Em particular para este estudo, o dispositivo de controle de temperatura é proposto como um utensílio para equipar o laboratório de desenvolvimento, aumentando a capacidade no que tange os critérios de desempenho e segurança relacionados nas normas nacionais e internacionais, e também validações e testes para a cavidade do forno.

Por fim, vale ressaltar que todos os produtos comercializados nacionalmente devem, no mínimo, atender às condições impostas pelos órgãos padronizadores, e os responsáveis por atestar estas conformidades são os laboratórios acreditados pelo INMETRO, que seguem as instruções da *ISO (2017) 17025: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*. Na sequência estão apresentadas as duas principais normas.

### 2.2.1 Norma ABNT NBR 13723-1

No Brasil, a entidade máxima de padronização e normatização é a Associação Brasileira de Normas Técnicas, órgão responsável por organizar e desenvolver normas técnicas a serem aplicadas em diferentes áreas de conhecimento, desde dissertações e pesquisas acadêmicas até procedimentos empresariais. Através da adoção de regras técnicas, orientações, características ou diretrizes de determinado processo, material, produto ou serviço, as NBR objetivam o aumento da produção empresarial, melhora na qualidade do produto final e aumento da competitividade com o serviço oferecido no mercado.

No contexto deste trabalho, a norma brasileira fundamental é aquela que trata de aparelhos domésticos de cocção a gás, ABNT (2004) NBR 13723-1, que em sua essência fixa as características de construção e desempenho, bem como os requisitos e métodos de ensaio para a segurança e identificação de aparelhos domésticos, embutíveis e não embutíveis.

Ao longo da norma estão descritas condições gerais para o ambiente (laboratório) e para os componentes do produto, assim a competitividade é garantida e os resultados

representam idoneamente as capacidades e limitações intrínsecas ao aparelho. Dentre o escopo referenciado, encontra-se o item 6.1.5.1 *Aquecimento das várias partes do aparelho*, classificando os materiais e impondo valores limites para cada um deles:

- a) metal e metal pintado: 35°C;
- b) vidro e cerâmica: 45°C;
- c) plástico: 60°C.

Estes valores de temperatura representam o grau de aquecimento que os componentes passíveis de manipulação durante o preparo de uma receita podem atingir. Por exemplo, o puxador da porta do forno, os manípulos, o botão de acendimento da luz entre outros (Figura 14).

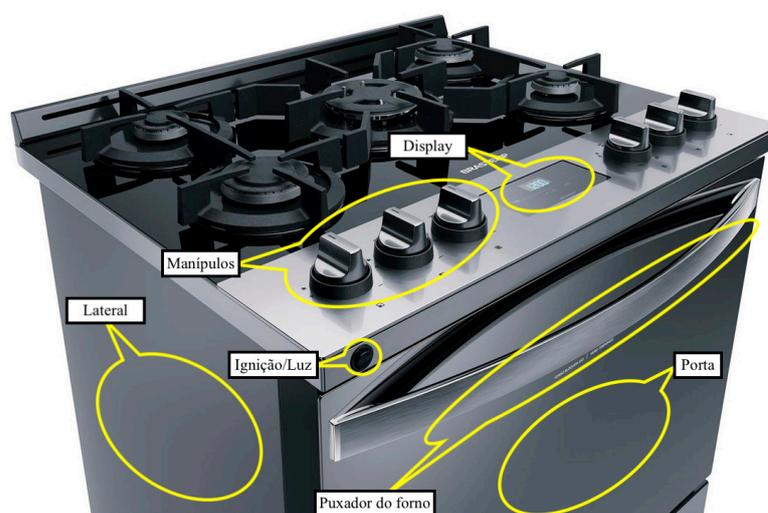


Figura 14 – Partes laterais e frontais do aparelho.

Sendo que estes valores devem ser aferidos quando, dentre outras condições, o produto atender à configuração do item 7.5.1.5.2.1 *Superfícies laterais e frontais do aparelho*, que diz:

O ensaio é iniciado a frio e as medições devem ser realizadas depois de 60 min sob as seguintes condições:

c) fornos:

- os fornos devem ser colocados em operação sem acessórios. O termostato, ou o manípulo de controle (se não existir termostato), deve ser posicionado a uma temperatura média de  $200^{+4}_0$  °C no centro geométrico do forno. Quando as posições são predeterminadas, e se não for possível atingir uma temperatura média de 200°C no centro do forno, ele deve ser ajustado para a posição que possibilite atingir a temperatura mais próxima possível acima de 200°C. Se o aparelho consiste em dois fornos, eles devem ser postos em operação simultaneamente, com os posicionamentos que permitam atingir cada um a temperatura média no centro de 200°C.

(ABNT, 2004, p. 30).

## 2.2.2 Norma IEC 60335-2-6

Tratando de produtos que usam além do gás de cozinha, energia elétrica como fonte auxiliar, a padronização vem da IEC. Esta comissão divide-se em comitês nacionais que representam interesses dos 86 países membros e difundem referências para geração de energia, transmissão e distribuição para eletrodomésticos e equipamentos de escritório.

Em complemento à ABNT NBR, a IEC (2014) *60335-2-6: Requisitos particulares para fogões estacionários, fogões de mesa, fornos e aparelhos similares* impõe condições gerais de operação para garantir a segurança elétrica de fogões e fornos a gás que contam com lâmpadas, acendimento automático, dourador, funções geração de vapor e ventilação forçada. Sendo assim, o documento relata:

**3.1.9.102** Os **fornos** são operados a vazio, com a porta fechada. Os controles térmicos são ajustados para que a temperatura média no centro do **forno** seja mantida a

220°C ±4°C para fornos com circulação de ar forçada;

240°C ±4°C para outros fornos.

(IEC, 2014, p. 3).

Assim os produtos que passaram por estes e pelos demais testes executados no laboratório de desenvolvimento da Whirlpool têm a qualidade comprovada e fornecem a segurança ideal aos usuários, podendo ser comercializados com o selo de conformidade do INMETRO. Caso contrário, o eletrodoméstico não poderá ser vendido.

## 2.3 Considerações

Este capítulo teve como objetivo abordar a parte da teoria que estará embarcada no projeto do dispositivo capaz de regular a temperatura do forno. O entendimento de como será feita a identificação do modelo aproximado e de como se dará o controle automático é importante para situar o leitor ao longo das próximas etapas do trabalho. Entender ainda sobre as normas que regulamentam o ensaio de aquecimento realizado no laboratório de cocção servirá posteriormente na definição e análise das propostas elencadas.

## 3 Proposta

Este capítulo tem por objetivo apresentar as ideias sugeridas para a concepção do dispositivo de controle a ser aplicado na válvula do forno, guiando-se na teoria de controle e nas ferramentas revisadas no capítulo anterior. Trata também das restrições observadas durante a realização manual do processo de aquecimento e por fim descreve os materiais utilizados.

### 3.1 Descrição do problema

A demanda de um sistema de controle de temperatura de forno a gás surgiu do grupo de melhoria contínua do laboratório com a seguinte problemática: o processo manual de alcançar a temperatura de estabilização antes de realizar as medidas do ensaio de aquecimento leva muito tempo e é pouco preciso.

No processo de estabilização atual, o técnico ajusta a temperatura da cavidade do forno por conta própria, podendo, em alguns casos, perder o ensaio porquê demorou além do tempo regular para atingir a constância nos valores registrados. Em ensaios bem sucedidos o esperado é que a estabilização leve no máximo 25 minutos, acima deste tempo os resultados obtidos tornam-se críticos e o melhor a se fazer é resfriar o produto e reiniciar o procedimento. Se trata de um controle manual com realimentação, onde através do auxílio de um indicador de temperatura o operador compara o valor medido com a temperatura desejada, abrindo e fechando a válvula do forno com as mãos.

A partir dessas observações foram definidas a causa primária, as variáveis manipulada e de controle, e a necessidade de controle automático com realimentação. Durante a fase de planejamento do dispositivo foram requeridas múltiplas soluções para o problema, para na sequência eleger aquela que é mais simples e com menor complexidade de implementação. Sendo assim, foram feitas três propostas de dispositivos para assumir a ação do técnico e definir a temperatura adequada, com diferentes abordagens de intervenção no produto, que são apresentadas a seguir.

#### 3.1.1 Proposta 1

A primeira proposta consiste na utilização de uma válvula solenóide proporcional de duas vias que interrompe a linha principal antes da entrada no produto (Figura 15), e controla a vazão de gás.

Neste caso não é necessária qualquer modificação na tubulação interna do produto, já que existem válvulas solenóides disponíveis comercialmente e a instalação do dispositivo para a execução do ensaio é relativamente simples. Em contrapartida, com essa estratégia



Figura 15 – Linha de fornecimento de gás interceptada por uma válvula solenóide de ação proporcional.

todos os queimadores estarão sujeitos à mesma vazão de gás, e será necessário discutir um orçamento para a compra dos itens 1) válvula e 2) bobina modulante, expressos na proposta comercial do Anexo A.

### 3.1.2 Proposta 2

Como alternativa para atuar apenas na vazão do queimador da cavidade do forno e manter os queimadores da mesa controlados pelas válvulas originais, é proposto nesta segunda abordagem intervir na tubulação interna do produto e conectar a mesma válvula solenóide do item anterior apenas na linha de gás do forno. No entanto, neste cenário algumas modificações (tais como desmontagem e cortes) são requeridas, e ainda há a necessidade da válvula solenóide proporcional.

Como sugestão para eliminar a válvula proporcional que tem maior custo, a solução pensada consiste na utilização de uma válvula solenóide de simples ação (*On/Off*) em um circuito com um desvio (ou *bypass*) (Figura 16). Esse desvio serve como um canal secundário que permite a constância do fluxo quando o caminho principal for interrompido.

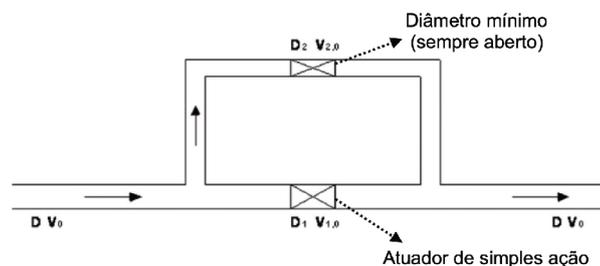


Figura 16 – Representação esquemática do funcionamento da estratégia *bypass*.

O resultado desta montagem é uma taxa de vazão mínima que mantém os queimadores sempre acesos (chama piloto), mas que permite aumentar a vazão de gás introduzida no

sistema quando necessário, aumentando a potência da chama no interior da cavidade do forno.

### 3.1.3 Proposta 3

Para a última proposta a ideia é manipular diretamente a válvula do forno através de um servomotor acoplado ao produto conforme Figura 17. Nesse caso nenhuma alteração é requerida, apenas a substituição do manípulo do produto pelo atuador.

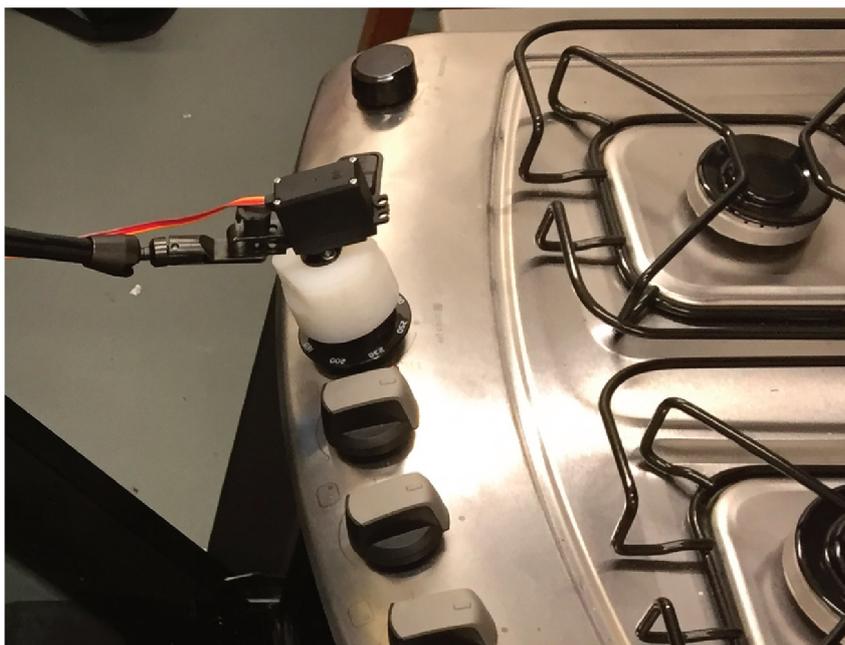


Figura 17 – Servomotor acoplado ao eixo da válvula do forno de um fogão de piso.

As dificuldades para esta alternativa são a fixação no eixo da válvula e a necessidade de alcançar o manípulo do forno em diferentes posições dentre modelos de fogões.

### 3.1.4 Seleção da proposta

Para decidir qual alternativa seria selecionada alguns critérios foram impostos, os quais incluem:

- As condições nominais de vazão do produto não podem ser alteradas;
- O processo de estabilização não deve demorar;
- O dispositivo não deve alterar características de transferência térmica;
- Apenas o queimador do forno deve ser controlado.

Deste modo, a Proposta 1 foi eliminada porque esta estratégia não permite o controle individual de vazão entre os queimadores da mesa e do forno, a Proposta 2 foi descartada por exigir cortes e intervenções na linha de gás interna do produto. Restando apenas a Proposta 3 como sendo aquela que contempla todas as necessidades impostas, já que

não requer cortes, interfere apenas na vazão de gás do forno e a adaptação pode ser feita através do manípulo.

### 3.1.4.1 Conceito do dispositivo

A terceira proposta foi a escolhida por ser aquela que não afetará permanentemente o produto, por ser a alternativa com maior facilidade de acoplamento em diferentes modelos de fogões, e por alterar minimamente as características de aquecimento. De fato, o contato do dispositivo com a válvula altera a troca térmica original pois, dependendo da forma de junção com o atuador, a parte plástica do dispositivo conduzirá calor e auxiliará na dissipação da temperatura do manípulo. Contudo, esta restrição é contornável caso ocorra a remoção do dispositivo uma vez que a temperatura no centro geométrico do forno estiver constante, e o sinal de controle em um valor fixo, pois é sabido que existe uma posição na válvula em que a vazão de gás é suficiente para equilibrar o fluxo de calor inserido com o fluxo de calor dissipado.

Na sequência, para a montagem do dispositivo na válvula, duas abordagens distintas são levantadas:

1. Remover o manípulo e controlar o fluxo a partir do eixo da válvula, uma vez que todos os eixos possuem a mesma característica construtiva, similar ao detalhe do perfil do eixo na Figura 18, que em sua montagem típica receberia um manípulo de



Figura 18 – Característica do eixo das válvulas de fogões a gás.

plástico/metal para propiciar o manuseio pelo consumidor;

2. Envolver o manípulo com uma garra que se adapte à sua geometria, sendo que vários modelos de manípulos são produzidos.

A julgar pela intercambiabilidade da solução, sabendo que todos os eixos de válvula possuem a mesma forma geométrica, foi escolhido desenvolver um manípulo padrão com dimensões adequadas, conforme a primeira abordagem elencada, que servirá também como ligação ao atuador. Com isso definido, o protótipo para o acoplamento deverá ter

então em uma das extremidades uma abertura para entrar com interferência no eixo da válvula e, na outra, uma fixação para o servomotor.

Assim, a união do atuador com a válvula de controle do gás se dará através da peça prototipada conforme a representação espacial na Figura 19. E, tratando-se do acoplamento com o atuador, no mercado existem modelos de servomotores com acessórios que facilitam o acoplamento entre os eixos. Especificamente, o modelo escolhido traz a opção de um disco, similar ao representado na Figura 19.

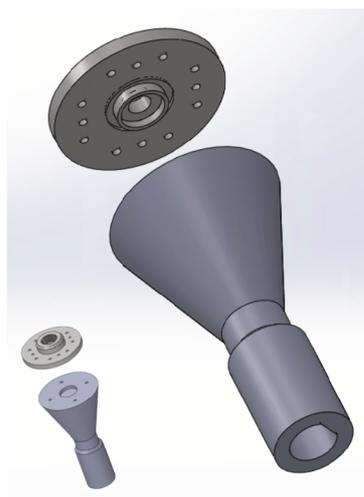


Figura 19 – Protótipo do acoplamento entre servomotor/eixo da válvula.

## 3.2 Identificação dos parâmetros e seleção do controlador

O último ponto para dar sequência ao projeto diz respeito ao tempo que um operador depende para realizar a tarefa manualmente, condição que determinará o valor limite que deve ser alcançado com o uso de um controle automático no processo de estabilização da temperatura no centro geométrico da cavidade do forno.

Para coletar tal informação, foi pedido para que um técnico experiente realizasse a estabilização do produto de referência na temperatura de 240°C. Para isto, ele teve três tentativas, sendo que a melhor realização está apresentada na Figura 20.

Na execução, foi escolhida a temperatura de 240°C como referência pois é aquela que leva mais tempo para ser atingida. Sendo assim, registrou-se o tempo aproximado de 18 minutos até o valor desejado. Na sequência são categorizados os requisitos que devem ser atendidos para justificar a implementação do controle automático.

### 3.2.1 Requisitos do sistema

Para a seleção do controlador os requisitos impostos são:

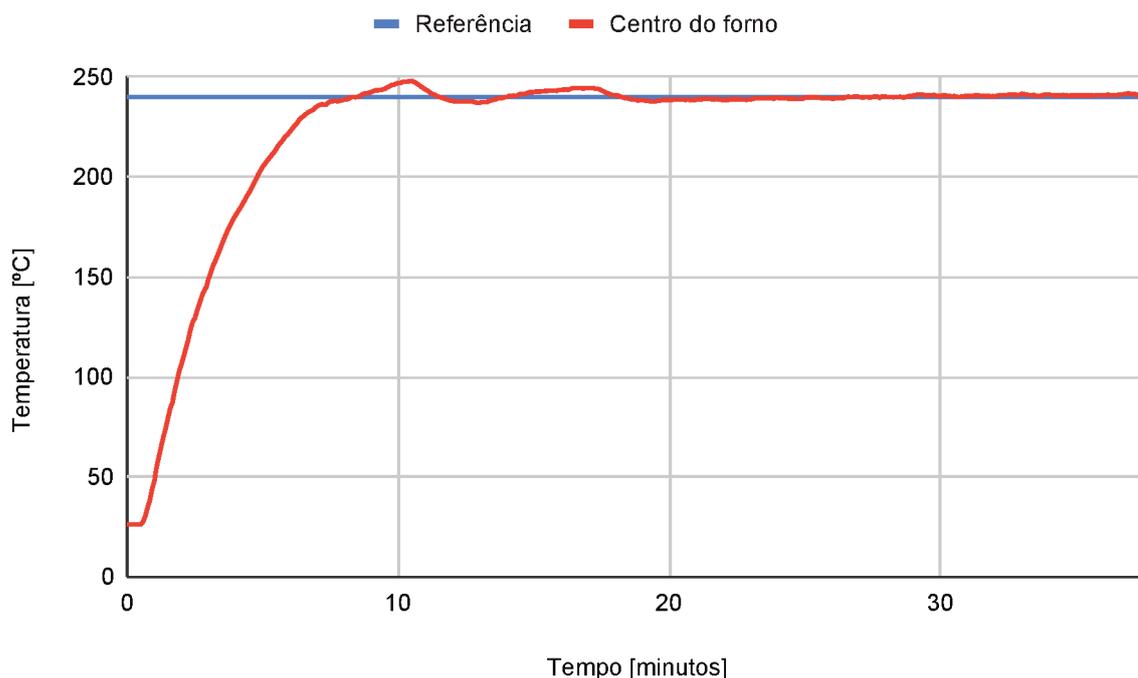


Figura 20 – Processo de estabilização da temperatura na cavidade do forno utilizando controle manual.

- Erro nulo para referências constantes, e;
- Tempo de estabilização menor que 18 minutos.

Com estas condições, a escolha de um controle com no mínimo a ação integral é requerido. A equação que descreve o integrador é composta de um polo localizado na origem do plano complexo, garantindo assim o seguimento de referências constantes com erro nulo.

Adicionalmente, como restrição, tem-se a limitação física da válvula. Na Figura 21 é mostrado o manípulo do forno e uma indicação com coloração gradual representando o intervalo angular entre as posições que correspondem à máxima e mínima vazão, totalizando um curso de 180°. Na representação, manípulo e marcação realizam juntos o movimento de rotação, sendo que no sentido anti-horário é realizado o percurso da máxima até a mínima vazão.

### 3.2.2 Implementação da solução

O microcontrolador Arduino Uno será responsável por calcular a lei de controle e também por receber e enviar os sinais das variáveis do processo. Será utilizado um módulo para medição de temperatura com termopar para coletar informações do sistema. A placa disponível é a *nanoshield* termopar da Circuitar, e foi empregada pois fornece a leitura diretamente em graus Celsius ao microcontrolador Arduino.

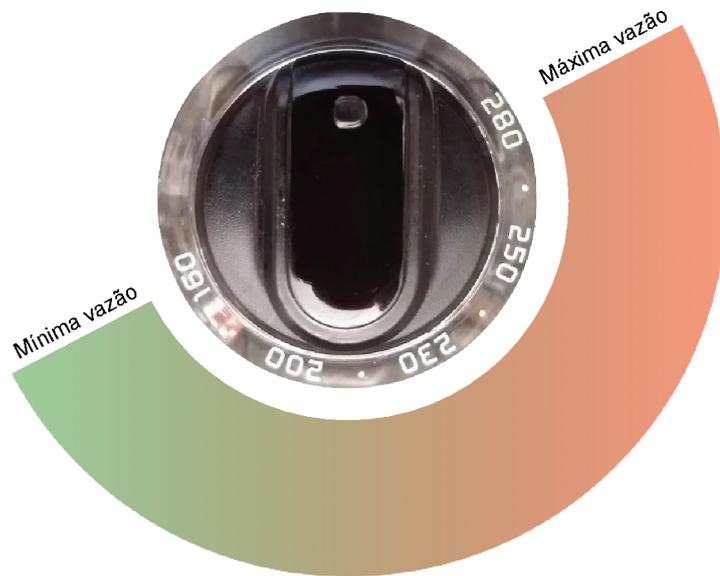


Figura 21 – Manípulo do forno identificado com as posições de vazão de gás correspondente.

Como atuador a motivação para se utilizar um servomotor dá-se pela precisão entregue no posicionamento angular ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ) aliado ao alto torque (11 kg.cm) pela relação de redução com engranagens metálicas. Especialmente no caso do servo MG995, pode-se operá-lo através de bibliotecas de controle disponíveis para microcontroladores Arduino.

### 3.3 Considerações

Neste capítulo foram discutidas três soluções plausíveis para a problemática de estabilizar a temperatura de um forno, definindo-se a solução que atende todos os requisitos impostos. Além disso, relatou-se a ideia de um controle automático que atende os parâmetros de projeto, através do cálculo das constantes  $K_p$  e  $T_i$ , e que é passível de ser implementado em um microcontrolador.

## 4 Resultados

O desenvolvimento do estudo leva em consideração o produto padrão do laboratório, configurado conforme as características nominais especificadas no manual técnico, e operando com GLP. O fogão Brastemp BF150ARNNA com quatro bocas e um forno, similar ao da Figura 22, recebe a denominação de produto padrão pois é utilizado para efeitos de comparação das condições laboratoriais ao longo do tempo. Ou seja, alguns procedimentos de testes são realizados no produto assim que ele sai da embalagem, e são replicados na mesma unidade após determinado tempo, para comparar os resultados.



Figura 22 – Produto padrão do LDAP - modelo BF150ARNNA.

### 4.1 Metodologia de teste

Para o caso específico do controle da temperatura do forno, o que se busca modelar é a característica de aquecimento do produto quando submetido às vazões que correspondem às posições de mínima e máxima vazão da válvula. Portanto, para obter a curva necessária basta acender o forno e mantê-lo em potência mínima tempo suficiente para que a temperatura no centro geométrico fique constante e, após, levá-lo à potência máxima até que a temperatura se estabilize outra vez.

Com isso feito, é possível utilizar o método de identificação de sistemas através da função de transferência, de primeira ou de segunda ordem, proposto na subseção 2.1.3 do Capítulo 2, para obter um modelo que descreva o comportamento obtido experimentalmente. Esta tarefa requer observações para definir se a curva resultante da identificação assemelha-se com a resposta de um sistema de primeira ordem, como no caso da Figura 9(a), ou se apresenta características de resposta de sistemas de segunda ordem, similar à Figura 9(b), para então seguir uma das abordagens.

Inicialmente, o controle será desenvolvido na IDE Arduino para atuar no modelo do produto de referência do laboratório e, posteriormente, a análise será expandida para um segundo modelo com características similares, a fim de se testar a robustez do controlador. Como a válvula do forno possui rotação aproximada de 180 graus, passando da mínima vazão para a máxima vazão, o sistema proposto atuará sobre este intervalo. A Figura 23 representa em três momentos o processo de aquecimento da cavidade do forno.

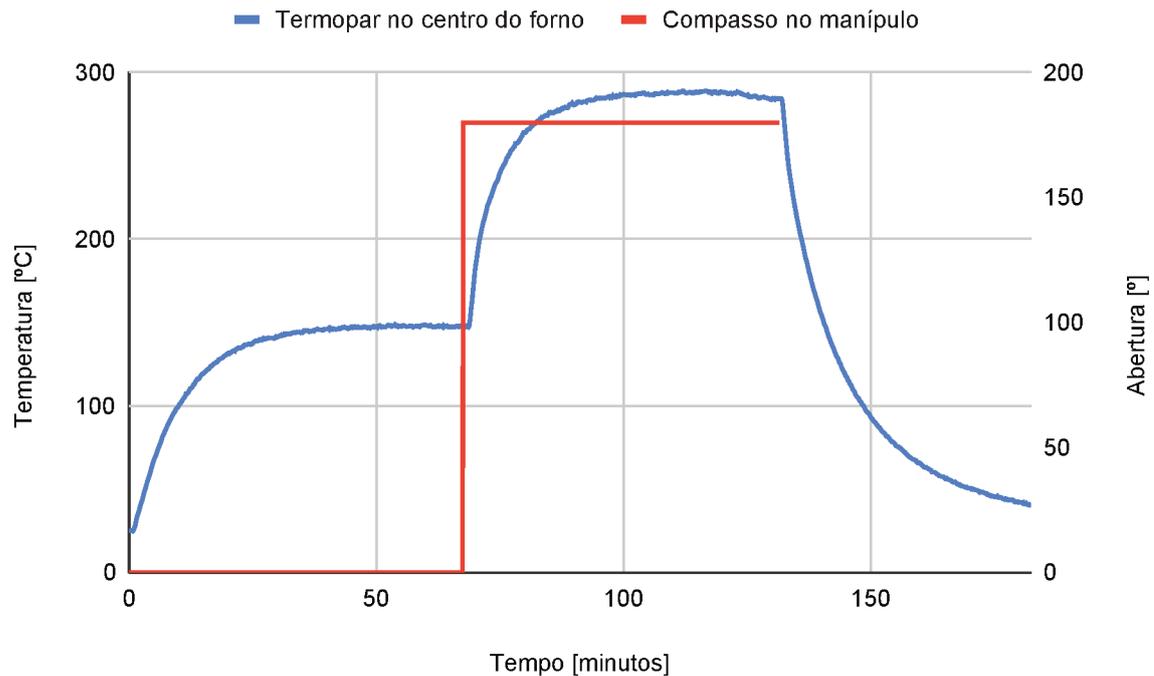


Figura 23 – Obtenção da dinâmica do sistema físico real do produto padrão (BF15OAR).

A primeira parte, que compreende os 67 minutos iniciais da evolução térmica, mostra o aquecimento desde a temperatura ambiente, até a estabilização na temperatura referente à posição de mínima vazão ( $0^\circ$  na indicação do compasso afixado ao manípulo). Posteriormente, da posição de mínima até a máxima vazão ( $180^\circ$ ), o tempo decorrido é de aproximadamente uma hora, realizado entre os minutos 68 até 131, finalizando com o resfriamento natural até a temperatura ambiente outra vez, nesta hora sem se importar com a referência angular pois o suprimento de gás foi interrompido. Com essa observação do comportamento do sistema, um modelo para a faixa de operação pode ser elaborado seguindo o método de modelagem para funções de primeira ordem.

## 4.2 Estrutura do modelo e estimação dos parâmetros

Analisando a característica da curva de temperatura obtida para o produto padrão, observa-se que o sistema em questão apresenta uma dinâmica que pode ser represen-

tada por uma função de transferência de primeira ordem. Desta forma, os métodos de Sundaresan e Krishnaswamy e de Smith são os mais adequados.

Aplicando ambas as metodologias para o ensaio realizado e considerando as unidades de tempo em minutos, as respostas ao degrau das funções que descrevem o sistema são apresentadas na Figura 24, numericamente expressas para o método de Sundaresan e Krishnaswamy por

$$G(s) = \frac{0,781}{7,035s + 1} e^{-1,025s} \quad (4.1)$$

e para o método de Smith

$$G(s) = \frac{0,781}{6s + 1} e^{-1s}. \quad (4.2)$$

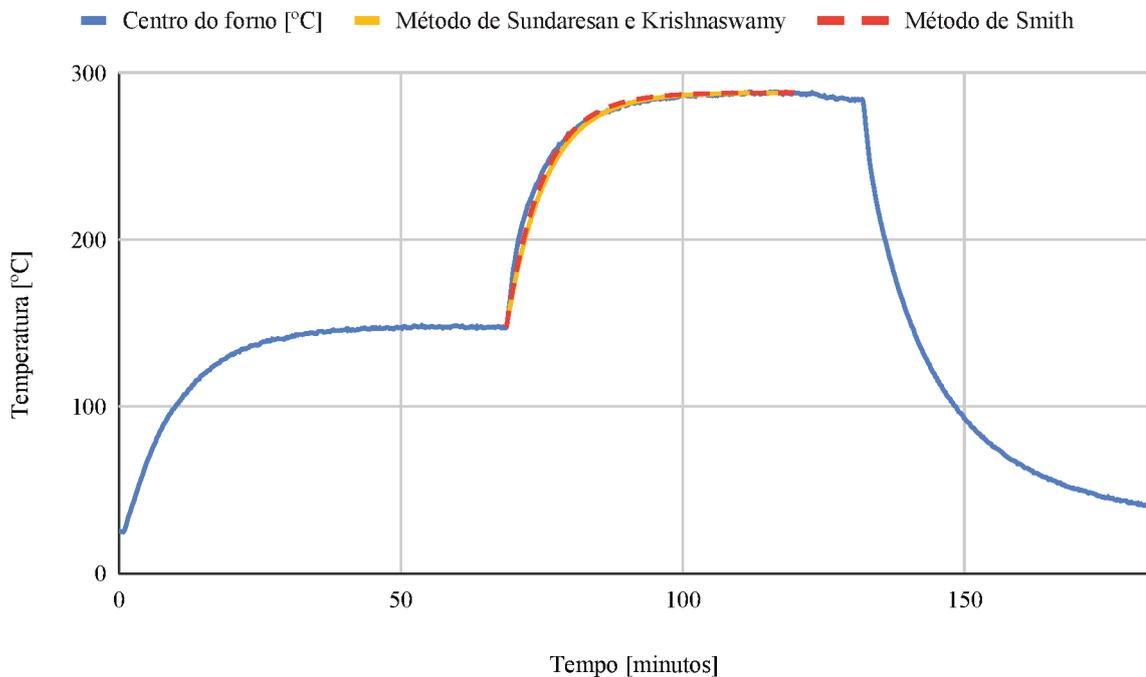


Figura 24 – Sobreposição dos sinais simulados para verificar a similaridade com o sistema físico real.

Comparando os dois resultados é possível concluir que ambos foram muito similares na tarefa de aproximar com suficiente precisão a resposta obtida na prática. Então, como forma de selecionar o melhor modelo, o critério do erro quadrático médio será utilizado. Esta análise considera o somatório dos quadrados da diferença entre o valor real e sua estimativa, obtido conforme a seguinte expressão:

$$EQM = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}. \quad (4.3)$$

Onde  $e_t$  é igual a diferença entre o valor real no período  $t$  e a previsão para o mesmo período, desde a primeira até a  $n$ -ésima observação. Através da análise do erro quadrático

médio o método de Sundaresan e Krishnaswamy apresentou  $EQM = 22,9^{\circ}C^2$ , e o método de Smith  $EQM = 12,6^{\circ}C^2$ , indicando que este último é mais preciso considerando o ensaio discutido anteriormente e, portanto, será utilizado no desenvolvimento do projeto do controlador.

### 4.3 Projeto do controlador

O controlador será empregado para atuar em uma determinada faixa de operação, que compreende os intervalos de mínima e máxima vazão da válvula, ou seja, de acordo com a Figura 24, de  $148^{\circ}C$  até  $288^{\circ}C$ . Tendo em conta que, inicialmente, os ensaios partirão de temperaturas próximas à ambiente, o erro rapidamente atingirá valores grandes o suficiente para saturar a saída de controle, mantendo a posição de máxima abertura da válvula até se aproximar da temperatura de *setpoint*.

Nesta abordagem, o tempo de assentamento ( $t_{5\%}$ ) foi definido como sendo de 15 minutos, o modelo de primeira ordem obtido através do método de Smith foi utilizado, e pelo fato do processo apresentar um atraso sete vezes menor que sua constante de tempo, o atraso de transporte foi desconsiderado.

Dada a ordem do modelo do sistema, a escolha de um controle com as ações proporcional e integral é a opção preferida. Algebricamente representado por 2.17, tem sua estrutura composta por um zero dinâmico, isto é, que muda de posição conforme o valor de  $T_i$ , permitindo alcançar o tempo de estabilização requerido, além do polo localizado na origem do plano complexo que garante o seguimento de referências constantes com erro nulo.

Utilizando (2.23) e (2.24) para determinação das constantes do controlador, obtem-se a seguinte lei de controle:

$$C(s) = \frac{3,63(s + \frac{1}{4,62})}{s}. \quad (4.4)$$

O último passo antes de implementar de fato o controle no Arduino é discretizar a relação encontrada, onde nesse caso será usado o método de aproximação de Tustin com tempo de amostragem 20 vezes maior que a constante de tempo do sistema, ou 18 segundos. Assim, sua forma final descrita utilizando equações à diferenças é dada por:

$$u[n] = 4,05e[n] - 3,91e[n - 1] + u[n - 1] \quad (4.5)$$

com  $u[n]$  denotando a ação de controle no instante  $n$ ,  $u[n - 1]$  o valor da ação de controle anterior,  $e[n]$  o sinal de erro e  $e[n - 1]$  o sinal de erro anterior. Com isso determinado, a implementação de um algoritmo para Arduino torna-se possível.

### 4.3.1 Laço de controle

Um fator importante a ser considerado é a saturação do sistema de atuação, imposto pela limitação física de movimento do atuador:  $0^\circ$  até  $180^\circ$ . Para isso, o programa no microcontrolador deve limitar os valores que são enviados para a função da biblioteca do servomotor da seguinte maneira:

- Se  $u[n] \leq 0$ , o ângulo do servo é igual a  $0^\circ$ ;
- Se  $u[n] \geq 180$ , o ângulo do servo é igual a  $180^\circ$ .

O seguinte passo é carregar as condições iniciais e, iniciar a atuação entregando valores angulares para a abertura da válvula conforme o controle definido anteriormente.

Para isso, deverá amostrar o valor de temperatura  $y(t)$  em intervalos de 18 segundos, medindo  $y[n]$ . Na sequência, calcular a diferença entre o valor desejado e o valor realizado conforme a expressão  $e[n] = x[n] - y[n]$ . Em seguida calcular  $u[n]$  através da equação que descreve o controlador e, finalmente, enviar este valor para o servomotor, que atuará fisicamente na planta.

## 4.4 Análise dos dados

A validação do algoritmo de controle implementado com Arduino foi realizada com 12 testes em dois produtos de características similares através da estabilização em duas faixas de temperatura. As condições ambientais durante a experimentação se mantiveram constantes, com temperatura ambiente de  $23,2^\circ\text{C}$ , pressão atmosférica de  $764,2\text{mmHg}$ , utilização de gás butano comercial à pressão nominal de  $280\text{mmH}_2\text{O}$ .

A Figura 25 ilustra a estratégia utilizada para obtenção dos resultados apresentados nas Figura 26 e Figura 27. Em ambos casos a estabilização deu-se em 12 minutos para a temperatura de  $240^\circ\text{C}$ , e 9 minutos para a temperatura de  $200^\circ\text{C}$ .

Desde o início de cada rodada, apenas o atuador servomecânico influenciou a dinâmica do sistema, sem a necessidade de ações por um operador humano.

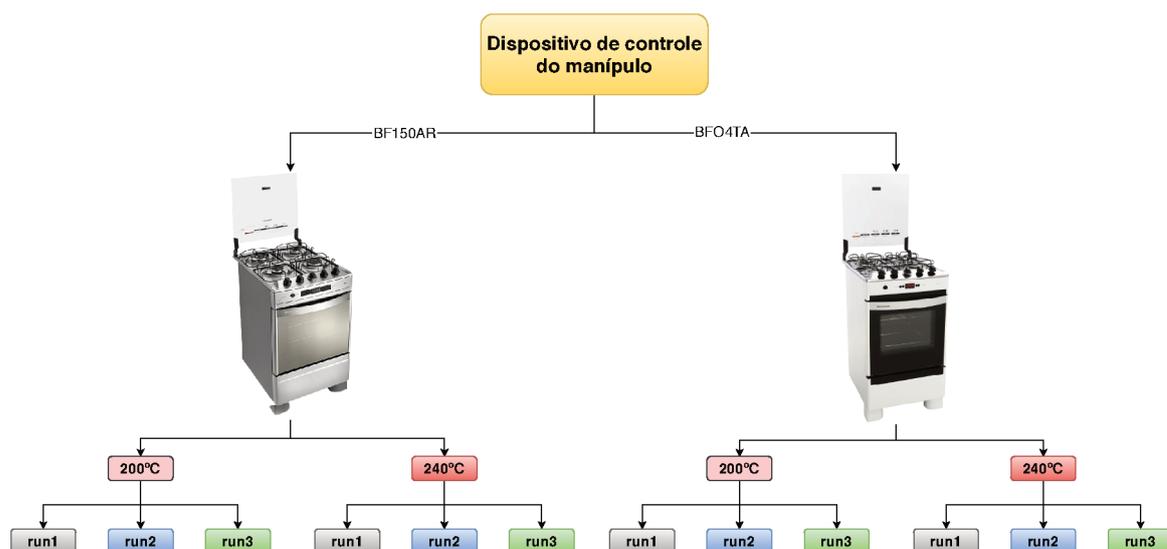
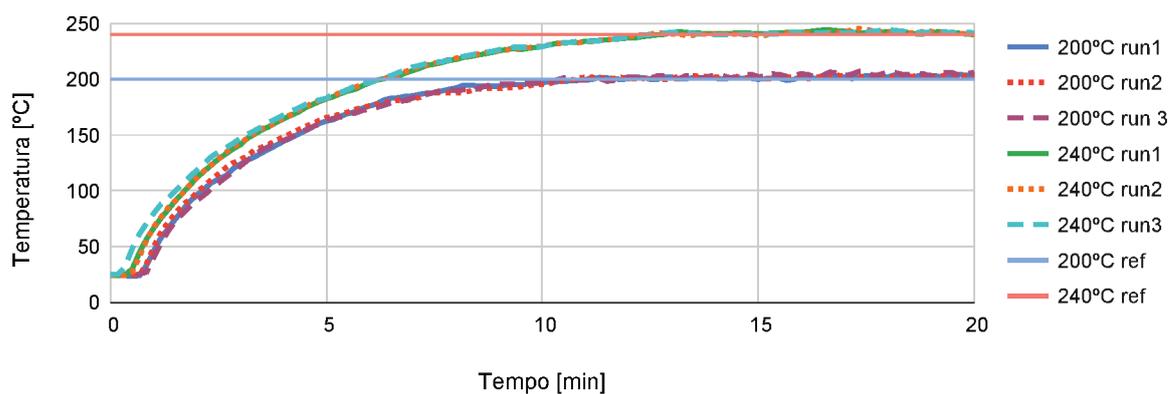
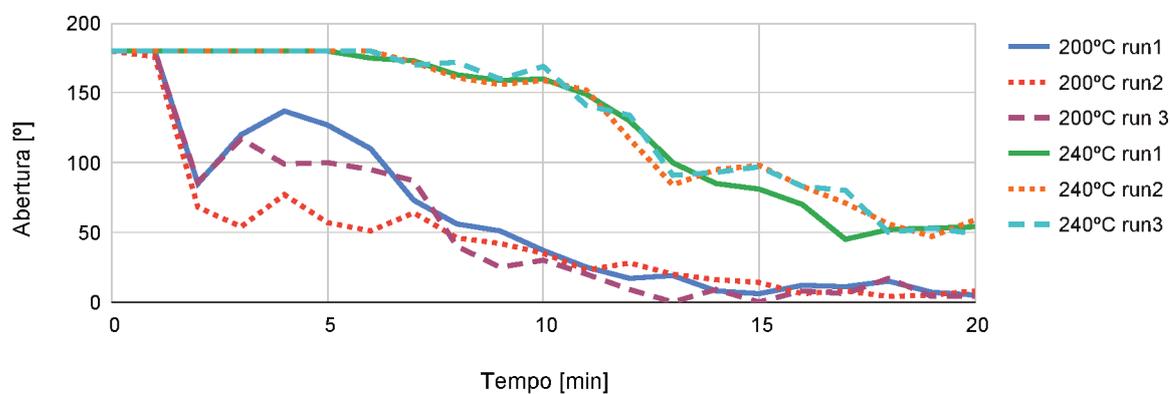


Figura 25 – Árvore de amostragem utilizada para análise dos dados.



(a) Sinal da variável controlada.

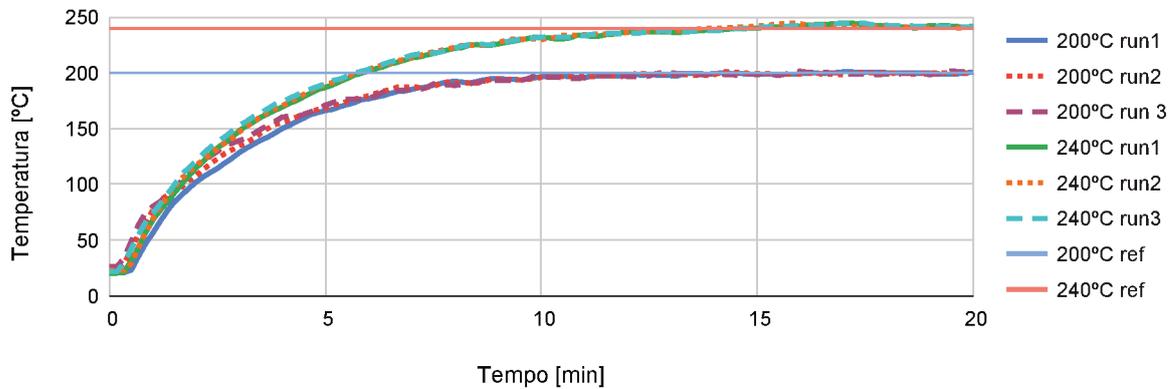


(b) Sinal da variável de controle.

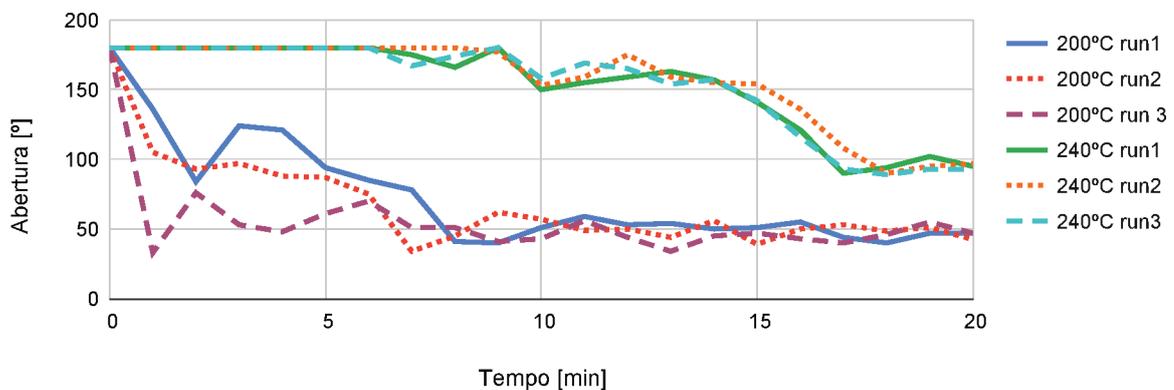
Figura 26 – Execução do controle projetado no produto padrão BF150AR.

No caso do produto padrão do laboratório, ao final do curso dos 20 minutos expressos

na Figura 26, a atuação no manípulo ficou estável com ângulo de rotação de abertura em  $19^\circ$  para o *setpoint* de  $200^\circ\text{C}$ , e  $45^\circ$  para o *setpoint* de  $240^\circ\text{C}$ .



(a) Sinal da variável controlada.



(b) Sinal da variável de controle.

Figura 27 – Execução do controle projetado em produto com a mesma cavidade BFO4TA.

Já no caso do segundo produto, que possui algumas alterações estéticas, mas mesma cavidade do forno e vazões nominais, decorridos os 20 minutos apontados pela Figura 27, o controle levou o ângulo de rotação do manípulo a  $43^\circ$  para o *setpoint* de  $200^\circ\text{C}$ , e  $95^\circ$  para o *setpoint* de  $240^\circ\text{C}$ .

Dada esta condição de mínima variação no tempo suficientemente longo, poder-se-ia retirar o dispositivo de controle do eixo da válvula no vigésimo minuto, reposicionar o manípulo original, e realizar as medições com mínima interferência nas condições originais de troca de calor entre as partes adjacentes.

Como forma de avaliar numericamente o desempenho de ambos sistemas, foi calculado o erro percentual entre o valor médio obtido com cada um dos 3 *runs* após o sistema estar estabilizado, e a temperatura desejado de cada execução, conforme 4.6. Para os valores de referência em  $200^\circ\text{C}$ , foram tomados para análise os 11 minutos finais, enquanto que

para os pontos de ajuste em 240°C, os 8 minutos restantes foram avaliados.

$$E\% = \frac{\overline{runs} - setpoint}{setpoint} 100 \quad (4.6)$$

com  $\overline{runs} = \frac{run1 + run2 + run3}{3}$  e  $setpoint$  assumindo valor de 200 ou 240.

A Tabela 2 compila os resultados obtidos nessa análise.

Tabela 2 – Compilado dos resultados obtidos

	<b>BF150AR</b>		<b>BFO4TA</b>	
<i>setpoint</i>	200°C	240°C	200°C	240°C
<i>ângulo</i>	19°	45°	43°	95°
<i>E%</i>	0,8%	0,4%	0,7%	0,6%

Com isso, é possível afirmar que em todas as execuções feitas para os dois valores de  $setpoint$ , independentemente do produto utilizado, os erros foram muito pequenos e dentro do aceitável para a realização dos testes. Uma das fontes dessa diferença encontrada pode ter relação com os erros de medição da instrumentação, ou ainda pela folga entre o acoplamento do atuador no manipulador. Do ponto de vista de controle, notou-se que o modelo do sistema para os dois fogões é muito próximo, não havendo grandes diferenças entre suas funções de transferência. Por isso, e contanto que o modelo do fogão não mude muito, por exemplo, outros materiais com propriedades térmicas diferentes, ou dimensões diferenciadas, o mesmo projeto de controlador pode ser utilizado. Caso contrário, deve-se encontrar um novo modelo para o fogão em questão e, conseqüentemente, uma nova estratégia de controle.

Retornando ao referencial normativo da subseção 2.2.1 e da subseção 2.2.2, o controle implementado é efetivo em todos os casos. Como próxima ação para validação, é necessário maior quantidade de amostras, execuções e faixas de temperatura.

## 4.5 Considerações

O penúltimo capítulo deste documento trouxe a aplicação dos conceitos teóricos para a definição e elaboração de um controlador que atende as especificações desejadas, também a análise dos resultados obtidos da sequência de ensaios em dois produtos com mesma capacidade térmica e a validação do controle escolhido através de um método numérico.

## 5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo entregar um dispositivo que permitisse a automação do processo de aquecimento da cavidade de fornos à gás. Foram estudadas metodologias para identificação de sistemas com base na complexidade do modelo escolhido e conseguinte composição de uma malha de controle.

Com a pesquisa realizada foi possível consolidar o entendimento de como é feita a identificação do modelo aproximado e de como se dá o controle automático. Também pôde-se entender mais a respeito das normas que regulamentam o ensaio de aquecimento realizado no laboratório.

A parte prática envolveu a escolha de uma, entre três soluções plausíveis para a problemática de estabilizar a temperatura de um forno, e mostrou como implementar com componentes do kit de desenvolvimento Arduino aquela que atende todos os requisitos impostos. Com relação à ideia de um controle automático que atenda aos parâmetros de projeto, verificou-se através do cálculo das constantes  $K_p$  e  $T_i$ , que é possível realizar os valores de temperatura desejados com uma estratégia discretizada implementada em um microcontrolador.

Por fim, com o objetivo de validar o controle desenvolvido, foram realizados ensaios utilizando dois modelos de produtos com características semelhantes. As temperaturas coletadas foram compiladas e os resultados entregues pela atuação do servomotor cumpriram com o objetivo proposto. Como melhorias para trabalhos futuros, sugere-se a prototipação de um suporte intercambiável entre linhas de produtos com quatro, cinco e seis queimadores, que seja compacto e ágil de ser posicionado no manípulo do forno, aumentando a abrangência da solução descrita.

# Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13723-1: Aparelho doméstico de cocção a gás: Parte 1 - desempenho e segurança*. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- BEGA, E. A. Instrumentação industrial. 2 edição. *Rio de Janeiro: Interciência: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás*, 2006.
- CHEN, C.-T. *Linear system theory and design*. [S.l.]: Oxford University Press, Inc., 1998.
- COELHO, A.; COELHO, L. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares, Editora da UFSC*. [S.l.]: Brasil, 2004.
- DU, W.; FU, Q.; WANG, H. Method of open-loop modal analysis for examining the subsynchronous interactions introduced by vsc control in an mt/dc/ac system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 840–850, 2017.
- EMPRESA DE ESTUDOS ENERGÉTICOS. Balanço energético nacional. *Séries históricas completas*, 2019.
- FLANDRIN, J.-L.; MONTANARI, M. *História da alimentação*. 9. ed. Sao Paulo: Estação Liberdade, 1998. 888 p. ISBN 978-85-7448-002-2. Disponível em: <<https://statics-americanas.b2w.io/sherlock/books/firstChapter/86490643.pdf>>.
- FORCELLINI, F.; ROZENFELD, H. Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo. *São Paulo: Saraiva*, 2006.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de controle para engenharia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- HENDRICKS, E.; JANNERUP, O.; SØRENSEN, P. H. *Linear systems control: deterministic and stochastic methods*. [S.l.]: Springer, 2008.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION AND OTHERS. *IEC 60335-2-6: Particular requirements for stationary cooking ranges, hobs, ovens and similar appliances*. Genebra, Suíça, 2014.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Genebra, Suíça, 2017.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares-2*. [S.l.]: Bookman, 2006.
- MOLLENKAMP, R. A. Controle automático de processos. *EBRAS Editora Brasileira-SMAR*, 1988.
- MURRILL, P. W. *Fundamentals of process control theory*. 3. ed. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation, 2000.
- OGATA, K.; YANG, Y. *Modern control engineering*. New Jersey: Pearson Upper Saddle River, 2010. v. 5.

PESSOA, M.; SPINOLA, M. *Introdução à Automação para Cursos de Engenharia e Gestão. 1ª Edição*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2014.

ROGGIA, L.; FUENTES, R. C. Automação industrial. *Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Rede e-Tec Brasil*, 2016.

SILVA, J. L. M. d. Transformações no espaço doméstico: o fogão a gás e a cozinha paulistana, 1870-1930. *Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material*, SciELO Brasil, v. 15, n. 2, p. 197–220, 2007.

SOARES, P. M. O. d. R. Discretização de controladores contínuos. 1996.

SUNDARESAN, K.; KRISHNASWAMY, P. Estimation of time delay time constant parameters in time, frequency, and laplace domains. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Wiley Online Library, v. 56, n. 2, p. 257–262, 1978.

# A Proposta comercial para válvula solenóide de ação proporcional



**NEPIN ACESSORIOS INDS LTDA**  
 Sao Paulo - SP - CEP : 03.021-000  
 CNPJ 51.598.902/0001-02 - Ins Est. 110.153.032.114  
 Endereço: Rua Catumbi, 697 - Bairro: Belenzinho

Fone: +55 (11) 2694-9520  
 Demais localidades 0800 774 3121  
 Site: www.nepin.com.br E-mail: nepin@nepin.com.br

## Proposta Comercial

N/Referência: 0000065472 Rev:

Data: 23/08/2019

**Empresa:** Cod: 715 - WHIRLPOOL S/ A - CNPJ / CPF: 59.105.999/0039-59

**Contato:** GUSTAVO A LINK

**Departamento:** ENGENHARIA

**e-mail:** gustavo\_link@whirlpool.com

**Telefone:** (47) 3803-4155

**Cel:**

**S/Referência:** Via Site Nepin



ENGINEERING  
TOMORROW

Refrigeração  
Industrial

Drives

Automação  
Industrial

Refrigeração  
Comercial

Heating e  
Colling

Item	Código	Descrição	NCM	Previsão de Entrega	Unid.	Quant.	Vir. Unit	ICMS (%)	Valor ST	Vir. Total
1	6830	VALV SOL DANFOSS EV260B 15 1/2"	8481.80.92	Em Estoque	PC	1,00	980,00	4,00	0,00	980,00
2	3324	BOBINA MODULANTE DANFOSS C/ CONV SINAL 4-20MA BL	8504.50.00	Em Estoque	PC	1,00	1.420,00	4,00	0,00	1.420,00

Este orçamento refere-se às mercadorias aqui discriminadas e está sujeito às condições indicadas abaixo:

**Sub Total:** 2.400,00  
**Total ST: (R\$)** 0,00  
**Frete:** 0,00  
**Total do Pedido:** 2.400,00

- Frete: FOB
- Impostos Inclusos, exceto nos casos com produtos em que possa ocorrer Substituição Tributária.
- Cond. Pgto.: 28 DDL
- Faturamento mínimo R\$ 300,00
- Reajuste conforme variação cambial do dólar da data do orçamento até a data do faturamento. Base do dólar US\$ 1,00 = R\$ 4,0444
- Observação: EM ESTOQUE: MATERIAL DISPONIVEL PARA RETIRADA; ENTREGA EM ATÉ 02 DIAS, SALVO VENDA PREVIA.

Vendedor: DANIELLE DE PAULA

E-mail: danielle@nepin.com.br

Pagina(s):1de1