

JULIO SANTOS CORRÊA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
UNIAMERICA DESCOMPLICA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JULIO SANTOS CORRÊA**

**CONTROLE DE TEMPERATURA *PI* APLICADO EM UMA ESTUFA  
ESTACIONÁRIA INDUSTRIAL**

**FOZ DO IGUAÇU**

**2023**

JULIO SANTOS CORRÊA

*CONTROLE DE TEMPERATURA PI APLICADO EM UMA ESTUFA  
ESTACIONARIA INDUSTRIAL*

Monografia apresentada  
ao Curso de Engenharia  
Elétrica do Centro  
Universitário Uniamérica  
Descomplica, como  
requisito parcial à obtenção  
do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra.  
Luciana Paro Scarin  
Freitas

**FOZ DO IGUAÇU**

**2023**

## RESUMO

Este trabalho descreve a implementação de um sistema de controle integral proporcional (PI) para controle preciso de temperatura em uma estufa industrial para cozimento de calabresa e bacon. Este estudo justifica-se pela importância crítica da temperatura no processo de cozimento na garantia da qualidade, segurança alimentar e eficiência operacional. A revisão da literatura destaca a eficácia do controle PI em sistemas dinâmicos e destaca a aplicabilidade do controle PI em ambientes industriais com requisitos específicos de temperatura. A estufa industrial em questão possui características especiais como: B. Sensibilidade às diferenças nos tempos de cozimento e às flutuações de calor. Esta metodologia detalha a implementação de controles PI, incluindo sensores de temperatura e atuadores estrategicamente posicionados para ajustes instantâneos. Os parâmetros de controle são adaptados às características de cozimento do pepperoni e do bacon para obter uma distribuição uniforme da temperatura e garantir uma qualidade consistente do produto final. Os benefícios esperados incluem a redução significativa das flutuações de temperatura durante o processo de cozimento, garantindo a conformidade com os padrões de segurança alimentar e aumentando a eficiência da produção. Espera-se que a implementação do controle de PI traga benefícios tangíveis, como redução do desperdício de matéria-prima e melhoria da uniformidade do produto final. Este estudo não apenas fornece uma solução técnica para estufas industriais específicas, mas também fornece informações valiosas para o uso bem-sucedido do controle de PI no processo de cozimento de produtos cárneos. Os resultados podem ser aplicados a outras indústrias alimentícias que dependem de processos térmicos controlados para garantir a qualidade e segurança do produto.

Palavras-chave: Padrões de produção. Controle PI. Temperatura.

## **ABSTRACT**

This work describes the implementation of a Proportional-Integral (PI) control system for precise temperature control in an industrial oven used for cooking sausage and bacon. The study is justified by the critical importance of temperature in the cooking process for ensuring quality, food safety, and operational efficiency. The literature review emphasizes the effectiveness of PI control in dynamic systems and highlights its applicability in industrial settings with specific temperature requirements. The industrial oven under consideration has special characteristics such as sensitivity to differences in cooking times and heat fluctuations. This methodology details the implementation of PI controls, including strategically positioned temperature sensors and actuators for instant adjustments. Control parameters are tailored to the cooking characteristics of pepperoni and bacon to achieve a uniform temperature distribution and ensure consistent product quality. Expected benefits include a significant reduction in temperature fluctuations during the cooking process, ensuring compliance with food safety standards, and increasing production efficiency. The implementation of PI control is anticipated to bring tangible benefits, such as reducing raw material waste and improving the uniformity of the final product. This study not only provides a technical solution for specific industrial ovens but also offers valuable insights for the successful use of PI control in the cooking process of meat products. The results can be applied to other food industries that rely on controlled thermal processes to ensure product quality and safety.

**Keywords:** Production standards, PI control, Temperature.

# Sumário

CENTRO UNIVERSITARIO UNIAMERICA DESCOMPLICA.....	1
JULIO SANTOS CORRÊA .....	1
1 INTRODUÇÃO .....	7
1.1 Objetivos.....	7
1.2 Motivação .....	7
1.3 Metodologia e Estrutura do Trabalho.....	7
1.4 Contextualização .....	8
2 Coleção de dados.....	9
2.1 Monitoramento contínuo .....	9
2.2 Conjunto de dados .....	9
2.3 Durante a coleta de dados.....	10
2.4 Comentários do operador.....	10
2.5 Análise de tendências .....	10
2.6 Documentação detalhada.....	10
3 Revisão literaria.....	11
4 Projeto de Sistema de Controle PI para estufas Industriais de calabresa e Bacon .....	12
4.1 Características da estufa e requisitos térmicos .....	12
4.1.1 Análise detalhada do efeito estufa.....	12
4.2 Seleção do Controlador Lógico Programável (CLP).....	12
4.3 Desenvolvimento de algoritmo de controle PI .....	12
4.4 Integração com sensores e atuadores.....	13
4.5 Lógica de programação e controle.....	13
4.6 Interface do usuário e monitoramento .....	13
4.7 Teste.....	13

4. 8 Documentação completa.....	13
5 Controle PI de estufas de cozimento: uma abordagem multiponto com foco em temperatura e umidade.....	14
5.1 Controle de temperatura multiponto.....	15
5.1.1 Necessidade de monitoramento rigoroso .....	15
5.1.2 Ajuste dinâmico .....	15
5.2 Preservação das propriedades do produto .....	15
5.2.1 Impacto na qualidade .....	16
5.3 Sensores termopar 3 fios.....	16
5.3.1 Excelente precisão .....	16
5.2.1 Estabilidade e confiabilidade .....	16
6 Comparação e análise de resultados obtidos usando controle de PI em estufas de calabresa e bacon.....	16
6.1 Comparação com dados anteriores .....	16
6.1.1 Resultados antes da implementação.....	17
6.1.2 Comparando resultados.....	17
6.2 Análise crítica dos benefícios alcançados .....	17
6.2.1 Estabilidade termica.....	17
6.2.2 Simplificando o processo de cozimento .....	17
6.2.3 Uniformidade do produto final .....	17
6.3 Identificando áreas para melhoria.....	18
7 Documentação e Relatório Final .....	18
7.1 Análise crítica dos benefícios alcançados .....	18
7.2 Relatório Final .....	18
7.3 Contribuindo para o conhecimento.....	18

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Objetivos**

O principal objetivo deste estudo é implementar e avaliar um sistema de controle proporcional-integral (PI) para controle eficiente de temperatura em estufas industriais, com foco particular nos processos de cozimento de calabresa e bacon. O objetivo é otimizar as condições térmicas ao longo do processo para melhorar a qualidade do produto final, garantir a segurança alimentar e promover a eficiência operacional da estufa.

## **1.2 Motivação**

A motivação para a realização deste estudo foi a importância crítica do controle preciso da temperatura durante o processo de cozimento de produtos cárneos como calabresa e bacon. As flutuações térmicas podem ter um impacto significativo na qualidade e uniformidade destes produtos. Além disso, a eficiência operacional da estufa é diretamente afetada pelo controle adequado da temperatura. Portanto, a implementação de sistemas de controle de PI é motivada pela busca de melhorias significativas na consistência, segurança alimentar e eficiência produtiva.

## **1.3 Metodologia e Estrutura do Trabalho**

**Coleção de dados:** Analisamos detalhadamente as condições operacionais atuais da sua estufa e identificamos os principais pontos e desafios relacionados ao controle térmico.

**Revisão da literatura:** Um estudo detalhado dos princípios de controle de PI aplicados a sistemas de cozimento industrial, com ênfase em processos similares na indústria alimentícia.

**Projeto do sistema de controle PI:** Desenvolvimento de projeto de sistema de controle de PI adaptado às características únicas da estufa e às necessidades de cozimento de calabresa e bacon.

Práticas de implementação: Instalação de sensores de temperatura estrategicamente posicionados dentro da estufa. Integração do sistema de controle PI e do atuador responsável pelo controle de temperatura.

Configurações de parâmetros: Realize experimentos para ajustar os parâmetros de controle do PI, levando em consideração a inércia térmica do processo e as variações esperadas.

Avaliação de desempenho: Monitoramento contínuo da temperatura durante vários ciclos de cozimento. Os resultados são analisados para verificar a eficácia do controle PI na redução das flutuações térmicas e na melhoria da uniformidade do processo.

Comparação e análise: Comparação dos resultados obtidos com dados históricos da estufa antes da implementação do PI Control. Analise criticamente os benefícios alcançados e identifique áreas de melhoria.

Documentos e relatório final: Documentamos todas as etapas da sua pesquisa, desde a concepção até a avaliação de desempenho, e produzimos um relatório abrangente com conclusões e recomendações para implementação futura.

Ao seguir esta metodologia, pretende-se não só implementar um sistema eficaz de controle de IP em estufas industriais, mas também contribuir para o avanço do conhecimento sobre o controle térmico em processos específicos na indústria alimentar.

#### **1.4 Contextualização**

O controle de sistemas dinâmicos desempenha um papel crítico em muitas aplicações industriais, desde processos de fabricação até sistemas de automação. No contexto do controle de temperatura em processos térmicos, o controle integral proporcional (PI) é uma abordagem notável e um método amplamente utilizado para otimizar a estabilidade e a precisão do sistema. Este capítulo introdutório apresenta uma análise abrangente do controle de PI, destacando sua relevância, princípios básicos e aplicações práticas.

A equação para encontrar os ajustes para ser usado no controle PI :

$$m(t) = Kc * e(t) + \frac{k}{ti} \int_0^t e(t)dt + b$$

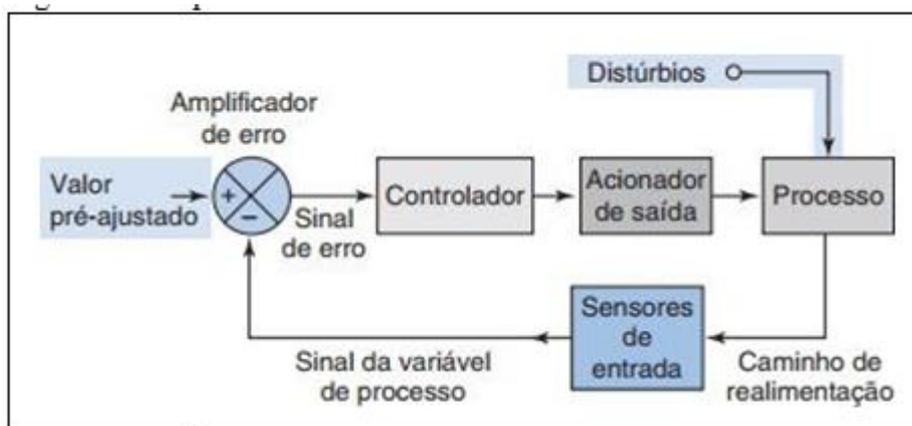
## 2 Coleção de dados

Nesse capítulo será abordado o processo de implementação do PI Control em seu ambiente começa com uma análise dos requisitos de implementação. Esta etapa crítica visa compreender o ambiente e identificar os principais pontos de interesse e desafios relacionados ao controle. Consciência estratégica: Sensores de temperatura são instalados em pontos estratégicos de toda a estufa, levando em consideração a distribuição média de produtos do processo de cozimento de calabresa e bacon.

### 2.1 Monitoramento contínuo

Iniciamos um aplicativo para monitorar as condições de temperatura interna durante a produção normal. Isso inclui a fase de aquecimento, manutenção da temperatura, etc.

Figura 1—Exemplo de sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Petruzella, 2014

### 2.2 Conjunto de dados

Obtenha dados precisos e detalhados e capture alterações ao longo do tempo. Os

dados incluem, mas não estão limitados a, temperatura ambiente, temperatura em diversas regiões e tempo necessário para atingir a temperatura de cozimento.

### **2.3 Durante a coleta de dados**

Identificamos desafios como flutuações significativas de temperatura, tempos de resposta imutáveis e ideais de longo prazo.

### **2.4 Comentários do operador**

Recolhemos informações valiosas através de entrevistas com operadores, investigando as suas observações e conhecimentos sobre situações de condução diárias.

### **2.5 Análise de tendências**

Utilizamos técnicas analíticas para analisar tendências recorrentes registradas em nossos dados. Isto inclui momentos críticos durante o processo de cozimento que afetam diretamente a qualidade do produto.

### **2.6 Documentação detalhada**

Documente minuciosamente cada etapa da coleta de dados para garantir que cada variável relevante seja coletada em sequência. Isto servirá como uma base sólida para a implementação de futuras regulamentações de PI.

Essa abordagem cuidadosa à coleta de dados não apenas fornece informações detalhadas sobre as condições operacionais atuais, mas também fornece a base para o projeto de controle de PI e para a captura eficaz. Essas descobertas são analisadas para ajudar a personalizar soluções de sistemas de controle de acordo com as necessidades específicas do setor.

### 3 Revisão literaria

O controle preciso da temperatura em estufas industriais desempenha papel fundamental na qualidade e eficiência do processo de cozimento, principalmente na produção de alimentos como calabresa e bacon. Esta revisão de literatura examina os principais fundamentos teóricos e aplicações práticas do controle integral proporcional (PI) neste cenário específico.

1. Controle PI em sistemas dinâmicos: - A literatura enfatiza a eficácia do controle PI em sistemas dinâmicos caracterizados por mudanças nas condições operacionais ao longo do tempo. O PI Control é particularmente adequado para estufas industriais porque pode se adaptar às flutuações e manter a estabilidade.

2. Ajustando o controle PI em processos térmicos: - Estudos anteriores destacaram a aplicabilidade do controle PI em processos térmicos, enfatizando a capacidade de ajustar a produção de aquecimento para atingir e manter as temperaturas desejadas. A adaptação dos controles de IP às estufas industriais é importante para lidar com a inércia térmica e as flutuações nas condições ambientais.

3. Estabilidade térmica e eficiência operacional: - A literatura enfatiza a importância da estabilidade térmica nos processos de cozimento industrial. Ao introduzir o controle PI, você pode não apenas manter a temperatura desejada, mas também reduzir as flutuações térmicas e melhorar a eficiência operacional.

4. Impacto na qualidade do produto: - Estudos de caso demonstraram que o controle preciso da temperatura tem impacto direto na qualidade do produto final, especialmente em processos delicados como o cozimento de carne. O controle de PI contribui para a uniformidade do processo de cozimento, garantindo um produto consistente em termos de sabor, textura e segurança alimentar.

5. Desafios e soluções: - A literatura descreve desafios comuns na implementação do Controle de PI em estufas industriais, incluindo: B. Ajuste correto dos parâmetros e consideração de fatores externos. A solução proposta inclui a integração de algoritmos avançados de votação automática e sensores inteligentes.

6. Progresso tecnológico: - Explorar as tendências atuais em tecnologia aplicada ao controle de PI, incluindo sistemas avançados de automação e a integração de inteligência artificial para previsão e ajuste em tempo real.

## **4 Projeto de Sistema de Controle PI para estufas Industriais de calabresa e Bacon**

### **4.1 Características da estufa e requisitos térmicos**

Este capítulo descreve o desenvolvimento de um sistema de controle integral proporcional (PI) utilizando um controlador lógico programável (CLP) para um forno industrial para cozimento de calabresa e bacon. O principal objetivo deste projeto é adaptar com precisão o sistema de controle às características da estufa para garantir uma gestão térmica eficaz.

#### **4.1.1 Análise detalhada do efeito estufa**

Uma análise minuciosa das características físicas da estufa, incluindo dimensões, isolamento e fluxo de ar, foi essencial. Adicionalmente, foram determinadas as necessidades específicas de calor para cada etapa do processo de cozimento do calabresa e do bacon.

### **4.2 Seleção do Controlador Lógico Programável (CLP).**

A seleção do PLC foi feita cuidadosamente com base na sua compatibilidade com as características da estufa e na sua capacidade de implementar o algoritmo de controle PI. A presença de entradas e saídas analógicas é verificada para garantir uma comunicação eficaz com o sensor de temperatura.

### **4.3 Desenvolvimento de algoritmo de controle PI**

#### **4.3.1 Ajustando parâmetros PI**

Os parâmetros de controle PI, como ganho proporcional e ganho integral, são cuidadosamente ajustados para garantir uma resposta estável e eficiente durante todo o

processo de cozimento. Um algoritmo adaptativo foi implementado para lidar com variações nas condições ambientais e processos térmicos.

#### **4. 4 Integração com sensores e atuadores**

Os sensores de temperatura estão estrategicamente posicionados e integrados ao PLC para fornecer feedback em tempo real. Um atuador foi conectado para controlar o sistema de aquecimento, permitindo o ajuste preciso da temperatura durante todo o ciclo de cozimento.

#### **4. 5 Lógica de programação e controle**

A lógica de controle foi desenvolvida de forma clara e compreensível utilizando a linguagem de programação ladder. Um algoritmo anti-windup foi implementado para evitar oscilações excessivas do sistema em situações de saturação.

#### **4. 6 Interface do usuário e monitoramento**

Uma interface homem-máquina (HMI) fácil de usar foi desenvolvida para monitoramento em tempo real e permite ajustes manuais, se necessário. Alarmes integrados indicam condições fora da tolerância.

#### **4. 7 Teste**

Simulações foram **realizadas** para verificar o desempenho do sistema em **diferentes cenários**.

#### **4. 8 Documentação completa**

Um manual detalhado de operação e manutenção foi desenvolvido para garantir o uso eficaz e a manutenção adequada do sistema de controle. Este capítulo fornece uma visão geral abrangente do projeto do sistema de controle PLC-PI e discute customização

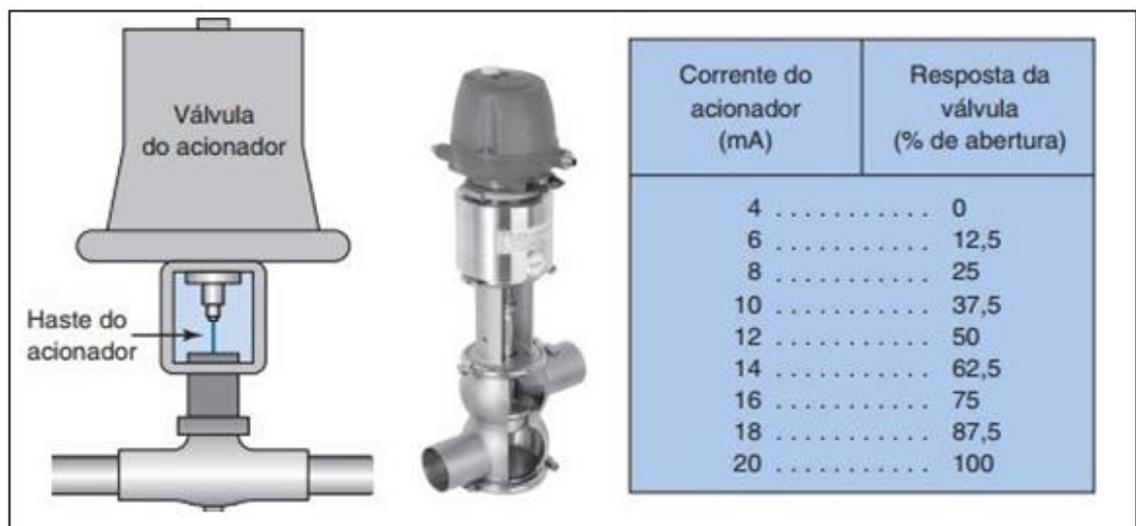
e integração cuidadosas para otimizar o processo de cozimento de calabresa e bacon em estufas industriais. A adaptação direcionada às características da estufa garante um controle de temperatura eficiente e consistente durante todo o processo de produção.

## 5 Controle PI de estufas de cozimento: uma abordagem multiponto com foco em temperatura e umidade

A implementação eficaz do controle integral proporcional (PI) em estufas requer uma abordagem multiponto para monitorar e controlar a temperatura em vários pontos críticos do processo de cozimento. Além disso, o gerenciamento preciso da umidade é essencial para manter as propriedades do produto. Neste contexto, a seleção cuidadosa do sensor desempenha um papel importante. O sensor termopar de 3 fios é o mais utilizado devido à sua excelente precisão.

Para que seja possível o controle de temperatura do cozimento na estufa é necessário utilizar uma válvula que irá liberar a passagem de vapor e aplicar os valores de controle PI pre definidos, a válvula utilizada é uma válvula proporcional que libera ou restringe a passagem de vapor conforme a necessidade do sistema até entrar em regime permanente.

Figure 2: Funcionamento de uma válvula de controle proporcional.



Fonte: Petruzella, 2014

## 5.1 Controle de temperatura multiponto

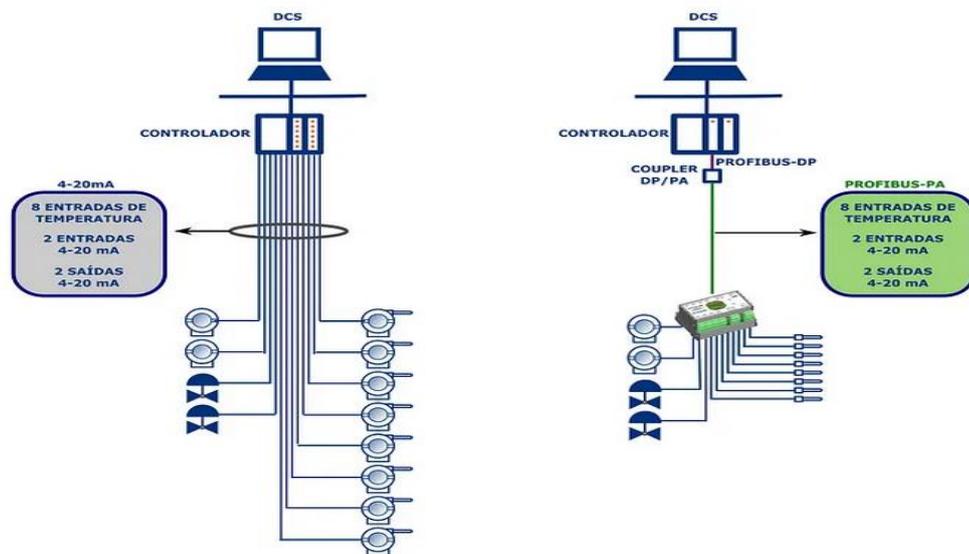
### 5.1.1 Necessidade de monitoramento rigoroso

A aplicação do controle multiponto permite a compreensão detalhada das necessidades de calor em cada etapa do processo de cozimento no forno.

### 5.1.2 Ajuste dinâmico

A capacidade de ajustar dinamicamente os controles PI em diferentes áreas da estufa otimiza a eficiência térmica.

Figure 3: Funcionamento de um sistema multiponto



Fonte: Petruzella, 2014

## 5.2 Preservação das propriedades do produto

O controle simultâneo da umidade é essencial para garantir que as propriedades sensoriais e a qualidade interna do produto sejam mantidas durante o processo de cozimento.

### **5.2.1 Impacto na qualidade**

A gestão da umidade minimiza o risco de perda de sabor, textura e qualidade do produto final.

## **5.3 Sensores termopar 3 fios**

### **5.3.1 Excelente precisão**

A seleção do sensor termopar (PT-100) de 3 fios é baseada em sua capacidade de fornecer precisão superior em medições de temperatura.

### **5.2.1 Estabilidade e confiabilidade**

O sistema de 3 fios contribui para melhorar a estabilidade e confiabilidade do sistema de controle.

Este capítulo destaca a importância de uma abordagem multiponto para o controle PI do fogão e enfatiza a necessidade de monitoramento preciso de temperatura e umidade. Além disso, a seleção criteriosa dos sensores, especialmente o termopar de 3 fios, potencializa a busca pela precisão e estabilidade.

## **6 Comparação e análise de resultados obtidos usando controle de PI em estufas de calabresa e bacon**

### **6.1 Comparação com dados anteriores**

A eficácia do controle integral proporcional (PI) em um estufas para cozinhar calabresa e bacon é avaliada por meio de análise comparativa com dados históricos antes da implementação do controle de PI. O objetivo desta comparação é destacar as melhorias significativas alcançadas após a introdução do sistema de controle.

### **6.1.1 Resultados antes da implementação**

Os dados históricos do efeito estufa antes da implementação do PI Control são compilados e analisados para criar uma linha de base. Mudanças na temperatura, tempo de cozimento e uniformidade são identificados como parâmetros importantes para análise comparativa.

### **6.1.2 Comparando resultados**

Os resultados obtidos após a implementação do PI Control são comparados com dados históricos. Ao cozinhar calabresa e bacon, atenção especial é dada à estabilidade da temperatura, redução das flutuações e uniformidade em todo o processo.

## **6.2 Análise crítica dos benefícios alcançados**

### **6.2.1 Estabilidade termica**

A estabilidade térmica é avaliada com base nas flutuações de temperatura dentro da estufa. Uma análise crítica examina como o controle PI ajuda a minimizar flutuações indesejadas e a manter condições térmicas consistentes.

### **6.2.2 Simplificando o processo de cozimento**

A eficiência do processo de cozimento é analisada em relação ao tempo necessário para atingir a temperatura desejada. A comparação dos resultados antes e depois do controle de PI mostra que a eficiência empresarial melhorou.

### **6.2.3 Uniformidade do produto final**

A uniformidade do produto final é cuidadosamente analisada considerando propriedades sensoriais e qualidade. A implementação do controle de PI visa melhorar a consistência do resultado final do cozimento.

### **6.3 Identificando áreas para melhoria**

A análise crítica também visa identificar áreas de melhoria no sistema de controle de PI. Se forem identificados desafios ou limitações de implementação, serão discutidas estratégias para otimização futura.

## **7 Documentação e Relatório Final**

### **7.1 Análise crítica dos benefícios alcançados**

Cada etapa do estudo, desde a concepção até a avaliação de desempenho, está bem documentada. Este documento cobre tudo, desde a seleção do PLC, desenvolvimento do algoritmo PI, integração de sensores e programação de controle até os testes e simulações realizados.

### **7.2 Relatório Final**

Será produzido um relatório final detalhado que inclui uma análise crítica dos resultados e conclusões da comparação com dados históricos. Além disso, são fornecidas recomendações claras para futuras implementações destinadas a melhorar ainda mais o sistema de controle térmico de estufas de calabresa e bacon.

### **7.3 Contribuindo para o conhecimento**

Este trabalho não se limita à implementação prática do controle de PI, mas também visa contribuir para a ampliação do conhecimento sobre controle térmico em processos específicos na indústria alimentícia. A análise crítica e a documentação abrangente dos resultados fornecem informações valiosas para futuras pesquisas e aplicações em vários contextos industriais.