UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

GUSTAVO VOLTANI VON ATZINGEN

**Simulação, controle e automação de um forno
tipo túnel utilizando tecnologia embarcada**

Pirassununga

2017

Gustavo Voltani von Atzingen

**Simulação, controle e automação de um forno tipo
túnel utilizando tecnologia embarcada**
Versão corrigida

Apresentada à Faculdade de Zootecnia e
Engenharia de Alimentos da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Doutor em
Ciências, na Área de Engenharia de Ali-
mentos
Orientador: Prof. Dr. Ernane Jose Xavier
Costa.

Universidade de São Paulo - USP
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Programa de Pós-Graduação

Pirassununga, SP
16 de maio de 2017

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V886s Voltani von Atzingen, Gustavo
 Simulação, controle e automação de um forno tipo
 túnel utilizando tecnologia embarcada / Gustavo
 Voltani von Atzingen ; orientador Ernane Jose
 Xavier Costa. -- Pirassununga, 2017.
 139 f.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia de Alimentos) -- Faculdade de Zootecnia
 e Engenharia de Alimentos, Universidade de São
 Paulo.

 1. Diferenças Finitas. 2. CFD. 3. Raspberry pi.
 4. Arduino. I. Jose Xavier Costa, Ernane, orient.
 II. Título.

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer ao meu orientador, o Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa, pela oportunidade e ajuda, tanto no âmbito profissional como pessoal.

À minha família, em especial à minha esposa, Magali Adriana da Silva von Atzingen, pela paciência, compreensão, ajuda e encorajamento durante todo este período. Aos meus pais que sempre incentivaram e proporcionaram condições para meus estudos.

A todos os amigos do Laboratório de Física Computacional Aplicada (LAFAC) pela ajuda e aprendizado. Ao Aldo Ivan Céspedes Arce, Especialista em laboratório, pelo seu grande conhecimento nas áreas de software e hardware e paciência para me ensinar. Ao aluno Fernando Henrique Garcia pela ajuda nos experimentos e confecção das placas de circuito impresso. A Professora Ana Carolina de Sousa Silva, Professor Marcio Kassouf Crocomo e Camila Nardi Pinto pela revisão da tese.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

ATZINGEN, G. V. v. **Simulação, controle e automação de um forno tipo túnel utilizando tecnologia embarcada.** 139 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga, 2017.

Baseado na grande evolução dos dispositivos eletrônicos nos últimos 35 anos e dos novos hardwares de baixo custo e alto poder computacional, esta tese tem como objetivo testar a seguinte hipótese: É possível o controle e automação de um forno em escala piloto com informações de sensores e simulação em tempo real utilizando computação embarcada de baixo custo. Para isto, modelagem matemática e simulação do perfil de temperatura do forno e do alimento foram realizadas para que o sistema de controle possa ter informação da temperatura no alimento em tempo real, contando apenas com os sensores fixos no forno. A informação desta simulação alimenta o controle PID, garantindo que o perfil de temperatura desejado para o aquecimento/cozimento do alimento seja obedecido, melhorando a qualidade do produto final. O sistema de controle possui duas unidades, a escrava que é localizada na lateral do forno é composta de um Arduino mini, da instrumentação para o controle dos sensores e atuadores do forno e a unidade mestre, que utiliza um Raspberry pi onde o software de controle com interface gráfica realiza as simulações, o controle PID e a comunicação via *bluetooth* com a unidade escrava. Experimentos foram realizados para testar e validar a simulação do perfil térmico do forno, do alimento e o controlador PID. Concluiu-se que é possível um controle de um forno industrial em escala piloto com simulação em tempo real utilizando computação de baixo custo.

Palavras-chave: Arduino, CFD, Diferenças Finitas, Raspberry Pi,

ABSTRACT

ATZINGEN, G. V. v. **Simulation, control and automation of a conveyor belt tunnel oven with embedded technology.** 139 f. PhD Thesis - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga 2017.

Based on the dramatic evolution of electronic devices in the last 35 years and the recent advent of low cost computational hardware, embedded sensors have become a cost-effective solution for real time machine monitoring and simulation. The objective of this thesis is to present both software and hardware intended for the real-time simulation and control of a conveyor belt tunnel oven using low cost embedded hardware, to ensure high quality food production. For this purpose, mathematical modelling and simulation of the temperature profile inside the oven was performed in order to supply the control system with the calculated temperature of the food in real time, using only the fixed sensors inside the oven. This simulation information is passed to the PID controller, ensuring that the desired temperature profile for heating the food is achieved, improving the quality of the final product. The system has two units, a slave that is located on the main body consisting of an Arduino mini and the instrumentation for controlling the sensors and actuators. The second unit is the master unit, which utilises a Raspberry pi to host the control software, the graphical user interface the PID controller and manages the Bluetooth connection with the slave unit. Experiments were performed in order to test and validate the thermal profile simulation of the oven and the food, as well as to test the PID controller. It was concluded that it is possible to control a prototype scale industrial oven using real time simulation with a low-cost computation unit.

Key-words: Finite Diference, CFD, Raspberry Pi, Arduino

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama mostrando o sistema de controle de malha fechada. . .	27
Figura 2 – Resposta no tempo de um controlador proporcional em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ em função de três diferentes valores do parâmetro K_p e com $K_i = 0$ e $K_d = 0$	30
Figura 3 – Resposta no tempo de um controlador proporcional em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ em função de três diferentes valores do parâmetro K_i e com $K_p = 1$ e $K_d = 0$	31
Figura 4 – Resposta no tempo de um controlador proporcional Integral e Derivativo em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ com três diferentes valores dos parâmetros K_p , K_i e K_d	32
Figura 5 – Grade (<i>stencil</i>) que descreve a relação entre os pontos das diferenças finitas. Os eixos x e y possuem elementos com índices discretos representados por i e j e n é o elemento temporal.	44
Figura 6 – Arduino Uno R3 – Principal placa da plataforma Arduino, com Atmega328pu e Comunicação USB.	47
Figura 7 – Modelos do Raspberry Pi.	51
Figura 8 – Imagem do forno em escala piloto, localizado no LAFAC, USP Pirassununga.	58
Figura 9 – Visão frontal do forno.	59
Figura 10 – Visão superior e lateral do forno.	60
Figura 11 – Diagrama da placa de controle desenvolvida para o forno. Diagrama completo no Anexo A.1.	61

Figura 12 – Corte lateral do forno com locais dos sensores.	62
Figura 13 – Diagrama geral do funcionamento do sistema de controle.	63
Figura 14 – Esquema elétrico da unidade escrava (parte da placa de controle do forno).	64
Figura 15 – Protocolo de comunicação entre as unidades. Comando "SHA42\n-Esteira no sentido para frente com 42% da velocidade.	65
Figura 16 – Estrutura em árvore da pasta contendo o software de controle. . .	69
Figura 17 – Eixo de coordenadas para o modelo da temperatura no alimento. .	75
Figura 18 – Experimento para determinação do número de elementos n e número de iterações i a ser escolhido para o algoritmo de simulação da temperatura do forno.	78
Figura 19 – Resultado da simulação da temperatura do forno em função da profundidade. Condições do experimento: $R1 = 80\%$, $R2 = 50\%$, $R3 = 10\%$ mantidas por 15 minutos. Leitura dos sensores em $t = 15$ minutos: $T_a = 27.1$, $T1 = 180.2$, $T2 = 170.8$, $T3 = 155.0$. . .	80
Figura 20 – Resultado da simulação adicionada a imagem do forno na interface de controle.	80
Figura 21 – Análise de sensibilidade de malha em função do número de elementos no eixo r N_r	84
Figura 22 – Temperatura no centro do alimento e no meio da superfície superior em função da temperatura para os dois softwares, Python/Fortran, e Comsol.	86
Figura 23 – Comparação da simulação da temperatura no alimento em um corte central no eixo xy , utilizando o algoritmo desenvolvido em Python/Fortran e o <i>software</i> Comsol.	87
Figura 24 – Teste do aquecimento com potência parcial, iniciando à temperatura ambiente.	89

Figura 25 – Teste das resistências, várias configurações de potência das resistências	90
Figura 26 – Diagrama do processo de controle da temperatura no forno. . . .	92
Figura 27 – Experimento de malha aberta, 50 minutos potência máxima, 50 minutos desligado.	93
Figura 28 – Experimento de malha aberta. Ligado 50 minutos, desligado 50 minutos.	94
Figura 29 – Experimentos de malha aberta e simulação da evolução temporal. Temperatura da esteira e do ar no centro do forno.	96
Figura 30 – Teste de malha aberta para determinação inicial dos parâmetros k_p , k_i e k_d pelo método de Cohen-Coon.	98
Figura 31 – Simulação de malha aberta para determinação inicial dos parâmetros k_p , k_i e k_d pelo método de Cohen-Coon.	100
Figura 32 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. <i>Setpoints</i> : 300 °C 0 - 50 minutos, 120 °C 50 - 100 minutos, 250 °C 100 - 150 minutos e 180 °C 150 - 200 minutos.	101
Figura 33 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. <i>Setpoints</i> : 200 °C 0 - 50 minutos, 300 °C 50 - 100 minutos e 200 °C 100 - 150 minutos.	102
Figura 34 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. <i>Setpoints</i> : 220 °C 0 - 50 minutos, 180 °C 50 - 100 minutos e 150 °C 100 - 150 minutos.	102
Figura 35 – <i>Layout</i> da placa com as trilhas e locais para colocar os componentes.	103
Figura 36 – Projeto da placa com componentes.	104
Figura 37 – Placa de controle instalada no forno.	105
Figura 38 – Biblioteca para a plataforma Arduino, disponível via gerenciador de pacotes da IDE.	106
Figura 39 – Formas de acessar a interface gráfica.	107

Figura 40 – Interface de controle, tela de controle manual.	108
Figura 41 – Interface de controle, tela de ajustes.	110
Figura 42 – Tela de controle dos dados da interface gráfica com as opções de seleção e exportar dados, seleção de experimentos e calibração dos sensores.	111
Figura 43 – Interface de controle, tela com display gráfico das temperaturas nos sensores.	113
Figura 44 – Interface de controle, tela com visualização da simulação do perfil térmico do forno e sobreposição na imagem do mesmo.	113
Figura 45 – Interface de controle, tela do controle automático com perfil tempo x potência.	114
Figura 46 – Interface de controle, tela do controle automático com perfil tempo x temperatura.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Codificação - Caractere ou grupo de caracteres e funcionalidade. .	66
Tabela 2 – Tempo para execução do algoritmo. Média de 10 repetições. . . .	79
Tabela 3 – Comparação entre predição da simulação e valor lido pelo sensor.	81
Tabela 4 – Propriedades físicas dos alimentos de teste, cookie e cupcake. . .	85
Tabela 5 – Resultado das constantes da Equação 5.8 que melhor representa os dados experimentais.	97
Tabela 6 – Resultado das constantes do controlador PID encontrado pelo método gráfico de Cohen-Coon.	99
Tabela 7 – Resultado dos parâmetros ótimos do controlador PID encontrados pelo gradiente descendente.	99

SIGLAS

- API - Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação).
- ARM - Advance Risc Machine (Arquitetura de máquina risc avançada).
- CLP - Controlador Lógico Programável.
- ECR - *Error Check Rule*.
- EDP - Equação Diferencial Parcial.
- EEPROM - Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (Memória programável apenas de leitura apagável eletricamente).
- FDM - Finite Difference Method (Método das Diferenças Finitas).
- FTCS - Foward in Time Central Space (Progressivo no tempo centrado no espaço).
- GPIO - General Purpose Input/Output (Entradas e saídas de propósito geral).
- GPL - General Public License.
- HDMI - High-Definition Multimedia Interface (Interface de multimídia de alta definição).
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IDE - Integrated Development Environment (Ambiente de desenvolvimento integrado).
- IoT - Internet of Things (Internet das Coisas).
- LCD - Liquid Crystal Display (Display de cristal líquido).
- MIT - Massachusetts Institute of Technology.
- PCB - Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso).
- PIB - Produto Interno Bruto.
- PID - Parcial, Integral e Derivativo.
- PWM - Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso)

- RAM - Random Access Memory (Memória de acesso aleatório).
- RISC - Reduced Instruction Set Computer - Computador com um conjunto reduzido de instruções.
- SBC - Single Board Computer (Computador em placa única).
- SO - Sistema Operacional.
- SOR - Successive Over-Relaxation (Super Relaxações Sucessivas).
- SQL - Structured Query Language (Linguagem de consulta estruturada).
- SSL - Secure Socket Layer (Camada de conexão segura).
- UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Receptor e transmissor assíncrono universal).

SÍMBOLOS

- $G = \times 10^6$, Giga.
- $W = \text{watt}$, unidade de potência (Joules/segundo).
- $s = \text{segundos}$.
- $T = \text{temperatura}$.
- $t = \text{tempo}$.
- $V = \text{Volts}$, unidade de medida para potencial elétrico.

SUMÁRIO

	Agradecimentos	3
	Resumo	5
	Abstract	7
	Lista de ilustrações	8
	Lista de tabelas	12
	Siglas	13
	Símbolos	15
	Sumário	16
1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO	23
2.1	Panorama da tecnologia na indústria de alimentos	23
2.2	Controle e automação na indústria de alimentos	25
2.2.1	Controle de processo	26
2.2.2	Controle PID - Proporcional Integral e Derivativo	28
2.2.3	Automação	32
2.3	Modelagem matemática e simulação aplicada à indústria de alimentos	33
2.3.1	Fornos tipo túnel	34
2.3.2	Processos forneamento	35
2.3.2.1	Transferência de calor no alimento	36

2.3.2.2	Modelo matemático da condução de calor no alimento	37
2.3.3	Método das diferenças finitas aplicados à transferência de calor	40
2.3.3.1	Regime permanente	41
2.3.3.2	Regime não-permanente	43
2.4	Sistemas embarcados em controle de processos	44
2.4.1	Microcontroladores	46
2.4.1.1	Plataforma Arduino	46
2.4.2	Computadores em placa única	49
2.4.2.1	Raspberry Pi	50
2.4.2.2	Internet das coisas	52
3	OBJETIVO	55
4	MATERIAIS	57
4.1	Forno tipo túnel em escala piloto	57
4.1.1	Funcionamento do forno	57
4.1.2	Instrumentação para captura de dados e controle dos atuadores	60
4.2	Sistema de Controle	62
4.2.1	Unidade escrava	63
4.2.1.1	Hardware	63
4.2.1.2	Protocolo de comunicação	64
4.2.1.3	Software	67
4.2.2	Unidade mestre	67
4.2.2.1	Hardware	68
4.2.2.2	Software	68
4.2.2.2.1	Persistência de dados	70
4.3	Controle do processo	71
4.3.1	Software controle PID	71
4.3.2	Resposta no tempo	71

4.3.3	Otimização dos parâmetros de controle	72
4.4	Simulação Numérica	72
4.4.1	Perfil térmico do forno	73
4.4.2	Perfil térmico do alimento	74
5	RESULTADOS	77
5.1	Simulação numérica	77
5.1.1	Temperatura no forno	77
5.1.2	Temperatura no alimento	81
5.2	Controle do PID	88
5.2.1	Controle por modulação de largura de pulso (PWM)	88
5.2.2	Modelo da resposta potência-tempo-temperatura do forno	90
5.2.2.1	Controles e zonas de aquecimento	90
5.2.2.2	Determinação do modelo de resposta no tempo	92
5.2.3	Ajustes do controlador	97
5.2.3.1	Determinação dos parâmetros do controlador	97
5.2.3.2	Resultados do controlador	101
5.3	Sistema de controle - escravo	103
5.3.1	Placa de controle	103
5.3.2	Software de controle	105
5.4	Sistema de Controle - mestre	106
5.4.1	Controle manual	108
5.4.2	Configurações	109
5.4.3	Armazenamento dos dados	110
5.4.4	Visualização dos dados	112
5.4.5	Controle automático	114
5.4.5.1	Potência do forno x tempo	114
5.4.5.2	Temperatura no forno X tempo	114
5.4.5.3	Temperatura no alimento	115

6	CONCLUSÕES	117
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
	REFERÊNCIAS	121
A	APÊNDICE	127
A.1	Diagrama Placa de controle	127
A.2	Controle PID	129
A.2.1	Controlador	129
A.2.2	Modelo-resposta	130
A.3	Diferenças Finitas 1D Forno - Python	131
A.3.1	SOR Python2.7	131
A.3.2	SOR Fortran90	133
A.3.3	Análise de malha	134
A.3.4	Gráfico e imagem do forno	135
A.4	Diferenças Finitas Cilindrica Alimento	136
A.4.1	Python 2.7	136
A.4.2	Fortran - f90	138

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a indústria de alimentos e bebidas é responsável por aproximadamente 9,5% do Produto Interno Bruto (PIB). Além de empregar 1,63 milhão de pessoas, esta área manteve crescimento estável nos últimos 10 anos (IBGE, 2013). Nos períodos de desaceleração ou crise econômica este é um dos setores que é menos afetado visto que os cortes de consumo começam por produtos supérfluos e não por alimentos, e de fato em 2015 e 2016 houve um crescimento no ramo alimentício (FGV, 2016). O Agronegócio apresentou uma balança comercial com superávit de US\$ 5,6 bilhões em novembro de 2016 (FIESP, 2016), fazendo deste setor um ponto estratégico de investimento tecnológico. Este investimento é necessário também em virtude da mudança no padrão de consumo do brasileiro nas últimas décadas, que está migrando de produtos *in natura* para processados, que passaram de 56% em 1980 para 70% em 1990 e 85% em 2013 (ABIA, 2013).

O investimento em tecnologia para a produção de produtos processados, além de atender às novas demandas do mercado interno com produtos mais saudáveis, bem-estar e comidas de preparo rápido, pode agregar valor ao alimento exportado, já que o lucro com produtos processados é muito maior do que com insumos brutos. No entanto, apesar de possuir um grande parque industrial alimentício, o Brasil ainda possui carências no setor tecnológico que dá suporte à indústria. A maioria das empresas de grande porte que atuam no Brasil importam seus equipamentos mais sofisticados ou possuem seus setores de desenvolvimento tecnológico fora do país (QUEIROZ, 2011).

De acordo com Ruiz, Britto e Souza (2014), no Brasil a área tecnológica aplicada a inovação industrial ainda é pouco desenvolvida e, então, as grandes empresas muitas vezes buscam assistência tecnológica fora do país, diminuindo os lucros do setor e gerando no Brasil apenas a mão de obra barata, contribuindo para o crescimento

de uma indústria de caráter regressivo. Na indústria de alimentos, a automação da produção e processamento melhorou muito nas últimas duas décadas devido às tecnologias de controle, integrando dispositivos eletrônicos aos sensores e atuadores.

No entanto, os sistemas de automação industrial no Brasil não têm acompanhado tal evolução e ainda são muito caros e de difícil uso, além de serem todos de tecnologia importada e fechada. Neste cenário, a utilização de computadores em placa única - SBC (*Single Board Computer*) para controle de processos industriais de pequeno e médio porte podem ser uma solução viável e de baixo custo.

Neste trabalho foi desenvolvido um software e hardware de controle e simulação em tempo real utilizando um sistema embarcado de hardware projetado para um forno tipo túnel em escala piloto para produção de biscoitos, com o objetivo de testar a seguinte hipótese:

"É possível o controle e automação de um forno em escala piloto para processamento de alimentos com informações de sensores e simulação computacional em tempo real utilizando computação embarcada de baixo custo"

2 REVISÃO

Revisão bibliográfica e fundamentação teórica.

2.1 PANORAMA DA TECNOLOGIA NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

O desenvolvimento tecnológico mundial da indústria alimentícia foi enorme nas últimas duas décadas. Foram feitos progressos e descobertas em todas as etapas, começando pelo plantio, passando pelo processamento até o armazenamento (SAGUY et al., 2013). No entanto, no Brasil também é necessário que as novas tecnologias de produção estejam mais acessíveis às pequenas empresas, dando a elas o suporte para que possam ser mais eficientes e entregar um produto de maior qualidade de forma competitiva. O estudo de novos sensores, equipamentos e métodos na produção de alimentos é o desafio para o futuro, já que será necessário atender uma população cada vez maior, que também tem se tornado exigente quanto ao produto que consome.

Integrar sensores e atuadores para controlar de forma automática o processamento de um produto sempre foi um dos principais focos dos setores de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) das indústrias de alimentos. De acordo com (JÄMSÄ-JOUNELA, 2011), a importância da automação nos processos industriais aumentou dramaticamente nas últimas décadas, melhorando a qualidade e segurança dos produtos, reduzindo os custos de produção, gastos energéticos e emissão de poluentes. A utilização de modelos matemáticos e simulações integradas ao controle e automação cresceu notavelmente nos últimos 10 anos, principalmente devido ao aumento do poder computacional dos dispositivos eletrônicos, melhorando consideravelmente a automação industrial.

Padronizar a produção é o principal mecanismo para garantir a boa percepção

dos clientes em relação aos produtos, especialmente na indústria de alimentos. A diminuição na variabilidade dos processos somente pode ser promovida com o estabelecimento de rotinas de produção que permitam a aquisição de informações e tratamento das mesmas, resultando em um controle que aumenta a eficiência da produção de forma que seja possível fornecer produtos com padrão de qualidade e evitar desperdícios na produção (HALEY; MULVANEY, 1995).

Para a produção e processamento de alimentos forneados, a etapa que apresenta mais perdas e problemas de controle é o aquecimento forçado, principalmente em fornos industriais. O monitoramento do ambiente interno de um forno de produção de alimentos é fundamental para padronizar algumas características importantes do alimento como a atividade de água, textura, coloração, crocância entre outros, além de evitar o desperdício energético. O perfil tempo-temperatura de exposição de um alimento ao processo de cozimento é um dos principais fatores que alteram tais características e portanto, é essencial o desenvolvimento de ferramentas e dispositivos eletrônicos que auxiliem no controle térmico.

A importância das técnicas de controle e automação aplicadas a qualquer processo industrial cresceu drasticamente nos últimos 20 anos, sendo atualmente indispensáveis para garantir a qualidade e segurança dos produtos e torná-los competitivos no mercado internacional. Apesar desta importância global, os investimentos são concentrados nos países mais desenvolvidos e em alguns países asiáticos, sendo toda a América do Sul responsável por apenas 4,9 % dos investimentos tecnológicos em 2010 (JÄMSÄ-JOUNELA, 2011).

De forma geral, na indústria de alimentos, o desenvolvimento tecnológico busca garantir um padrão de qualidade nos produtos, produzindo da forma mais eficiente e controlada possível. Para que isto possa ocorrer, os conceitos de controle, automação, modelagem e simulação devem estar integrados à indústria de alimentos, constituindo uma das principais áreas de pesquisa da Engenharia de Alimentos.

Na indústria de alimentos, os processos envolvem a manipulação de insumos que

terão suas propriedades físicas e químicas alteradas na linha de produção. Para controlar estas propriedades, o uso de sistemas de controle automatizados que respondam em tempo real (baseado no conhecimento das propriedades e características físicas do sistema bem como dos dados da linha de produção) garante uma melhora na qualidade do produto, segurança alimentar, menos desperdício de produtos, maior produção e segurança para os trabalhadores.

Para que isto possa ocorrer, é necessário implementar um sistema de controle e automação especificamente desenhado para o processo em questão, levando em consideração um modelo matemático do processo e a utilização de sensores e sistemas de medidas em tempo real, dando mais confiabilidade ao sistemas.

2.2 CONTROLE E AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

A implantação de um processo de controle e automação industrial tem como objetivos gerais aumentar a produtividade, reduzir as perdas e aumentar a padronização dos produtos finais. No entanto, na indústria alimentícia, o controle do processamento de alimentos tem algumas particularidades que a diferenciam das demais áreas. Segundo (TRYSTRAM, 1994), as necessidades específicas que a indústria de alimentos deve considerar são:

- Aumento na higiene do processo de produção;
- Diminuição dos efeitos da variabilidade natural intrínseca dos produtos alimentícios;
- Diminuição dos efeitos perecíveis atribuídos a manipulação industrial;
- Garantia das propriedades sensoriais do produto final, garantindo a padronização e qualidade;

2.2.1 CONTROLE DE PROCESSO

Monitorar parâmetros físicos e químicos por meio de sensores e utilizar instrumentação eletrônica para que os dados coletados possam ser interpretados e tratados são os passos iniciais na implantação de um sistema de controle. Na indústria de alimentos, os parâmetros mais comuns que necessitam de monitoramento são a temperatura, umidade, pH, pressão, massa, volume, cor, forma, composição e geometria. Portanto, são necessários sensores adequados para medir estes parâmetros, de forma que estes sejam inócuos ao alimento, suportem as adversas condições do processo (temperatura, pressão, etc), possuam uma baixa resposta no tempo em comparação com o tempo do processo e sejam confiáveis (SELMAN, 1990).

Uma vez escolhidos os sensores e instrumentação adequados, é delineado o sistema de controle. Ainda segundo Selman (1990), controle é mais um problema estratégico do que um problema de hardware ou software e ele está na intersecção entre a instrumentação, métodos de produção, automação e aspectos bioquímicos do alimento. Por isto, o sistema de controle deve ser feito levando em consideração o ponto de vista de três áreas de engenharia: a Engenharia de Alimentos, a Engenharia de Processo e a Engenharia de Controle.

Os processos industriais, do ponto de vista do produto, podem ser separados em regime de operação de fluxo contínuo e batelada. Na indústria de alimentos, devido à especificidade de algumas etapas como esterilização, descanso, fermentação e cozimento, a realidade é mais complexa e na maioria das vezes, o que existe é um combinado de processos contínuos e batelada (TRYSTRAM, 1994).

O controle de processos térmicos em alimentos geralmente consiste em manter condições de operações específicas que já foram pré-determinadas e que garantam que as exigências de saúde alimentar sejam satisfeitas. Caso não haja um sistema de controle, quando ocorre algum desvio no processo e as condições de operação não são garantidas, é necessário corrigir o processo alterando o tempo para compensar, fazendo com que sejam gerados produtos fora da especificação sensorial (SIMPSON

A. TEIXEIRA, 2006). Sistemas inteligentes buscam alterar as condições de controle em tempo real para garantir que o alimento passe pelas condições pré-determinadas mesmo com perturbações externas.

O objetivo do controle envolve atingir e manter os valores de referência para as variáveis de importância (sendo a principal a temperatura no alimento) por meio de manipulação dos atuadores como a potência das resistências, controle da combustão, micro-ondas, fluxo de ar forçado ou outro método de acordo com o sistema de aquecimento. Este tipo de controle, onde a atuação é calculada de acordo com os valores recebidos pelos sensores é chamada de malha de controle retroalimentada por *feedback* ou também malha fechada. Controles mais simples, como o de malha aberta não levam em consideração as informações dos sensores e agem de forma predeterminada (HALEY; MULVANEY, 1995), sendo que ambos são encontrados na indústria de alimentos, um por sua eficiência e outro pela simplicidade.

No controle de malha fechada, que é ilustrado na Figura 1, as leituras dos sensores são utilizadas como informação para se calcular a resposta dos atuadores. Estes alteram o sistema, e esta alteração pode ser medida pelos sensores novamente, sendo que este processo será repetido continuamente.

Figura 1 – Diagrama mostrando o sistema de controle de malha fechada.

Fonte: Própria autoria.

Um outro modelo de controle, que contrasta com o *feedback*, é o método de controle *feedforward*, onde a perturbação que é introduzida no processo (ver Figura 1) é mensurada e as informações são enviadas diretamente ao controlador, de forma que este possa tomar as ações corretivas antes que o processo seja afetado. Tal tipo de controle é mais comum em processos de resposta temporal curta e altamente instáveis e por isto não é comumente encontrado na indústria de alimentos.

O controlador (Figura 1) deverá atuar de forma a levar e manter o sistema no valor desejado para a variável objetivo (que é chamada de *setpoint*). Para isto, este controlador deverá possuir o algoritmo adequado, sendo que este depende de como o sistema responde as perturbações no tempo, ou seja, qual é o modelo de resposta temporal do mesmo. Existem vários algoritmos e métodos de controle, porém um que se destaca pela sua simplicidade e eficiência é o controle PID.

2.2.2 CONTROLE PID - PROPORCIONAL INTEGRAL E DERIVATIVO

Num sistema de malha fechada, o controlador deve receber os dados dos sensores e o *setpoint* e deverá calcular como o atuador irá agir, de forma a atingir e manter o estado objetivo (OGATA; MAYA; LEONARDI, 2003). Existem várias formas de realizar este cálculo, desde um simples sistema ON/OFF que liga ou desliga o atuador baseado na diferença entre a leitura do sensor e o *setpoint*, controle PID, até mecanismos complexos, envolvendo lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, algoritmos evolutivos, filtro kalman entre outros. O controle Proporcional Integral e Derivativo (PID) é a estratégia de controle em malha fechada mais utilizada na indústria. Segundo Knospe (2006), estima-se que mais de 90% dos controles em *loop* fechado utilizem alguma variante do controle PID, e na indústria química, este valor é de 97% (DESBOROUGH; MILLER; NORDH, 2000).

Este controle foi desenvolvido antes dos sistemas digitais, com a primeira análise matemática publicada por Minorsky (1922) e posteriormente implantada com sucesso pela primeira vez para controlar automaticamente a direção de navios da marinha

americana na década de 1930 (BENNETT, 1986).

Na equação 2.2 temos o formato geral da resposta do controlador PID, dando a resposta $u(t)$ em função do erro obtido pela equação 2.1 .

$$e(t) = obj(t) - y(t) \quad (2.1)$$

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.2)$$

em que $e(t)$ representa o erro em um dado instante t , que é a diferença entre o valor desejado $obj(t)$ e o valor atual no sistema fornecido pelos sensores $y(t)$. Na equação 2.2, os parâmetros K_P , K_I e K_D são constantes pré-estabelecidas do controle. Alterações nestes parâmetros modificam o caráter do controle e a resposta $u(t)$ que é passada ao atuador.

Utilizando como exemplo um forno elétrico simples com controlador PID, que contém apenas um sensor de temperatura, uma resistência e um botão de ajuste de temperatura, o objetivo ou *setpoint* ($obj(t)$ na Equação 2.1) seria o valor da temperatura escolhido pelo usuário no ajuste de temperatura. A variável $u(t)$ na Equação 2.2 seria a potência da resistência e $y(t)$ o valor da temperatura registrado pelo sensor. Em cada instante de tempo t , o valor da temperatura é lida, comparada com o *setpoint* (diferença entre o objetivo e o valor real) e o controlador PID é acionado para calcular a potência da resistência.

O termo proporcional, K_P , dá uma resposta ao sistema que é diretamente proporcional ao erro. Quando um controle é apenas Proporcional, com $K_I = 0$ e $K_D = 0$, o controle falha em atingir o objetivo no regime contínuo ($t \rightarrow \infty$) para um valor pequeno K_P , já que $u(t)$ diminui quando $e(t)$ diminui. Portanto, este tipo de controle é efetivo quando o valor real está longe do *setpoint* porém não atua de forma suficiente quando o objetivo está próximo, levando a um *offset* no regime contínuo. Ao aumentar o valor de K_P aumenta-se o valor de $u(t)$, podendo saturar a saída para

o atuador, caso em que o controle terá o mesmo efeito de um controle ON/OFF. (Figura 2).

Figura 2 – Resposta no tempo de um controlador proporcional em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ em função de três diferentes valores do parâmetro K_p e com $K_i = 0$ e $K_d = 0$.

Fonte: Própria autoria.

Os estados anteriores do controle (passado) não tem influência num controle apenas proporcional, o que aponta para suas limitações em alguns casos. Quando K_I é diferente de zero, o controle possui uma componente integral ($K_I \int_0^t e(t) dt$ na Equação 2.2) e portanto este termo dependerá dos estados anteriores, ou seja, quanto e por quanto tempo foi o erro (Equação 2.1). A componente integral ajuda a eliminar o erro estático (*offset*), pois mesmo quando o valor atual se aproxima do *setpoint*, a componente integral não tende a zero como a componente Proporcional (Figura 3).

O termo Derivativo responde em função da variação do erro $e(t)$ no tempo. Por isto, ele prevê a posição futura de $e(t)$ e com isto diminui a oscilação e portanto o tempo que o sistema demora para chegar ao estado estacionário. Por este motivo, o

Figura 3 – Resposta no tempo de um controlador proporcional em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ em função de três diferentes valores do parâmetro K_i e com $K_p = 1$ e $K_d = 0$.

Fonte: Própria autoria.

controle Derivativo é aplicado utilizando valores não altos para K_d e com algum tipo de filtro (via software ou hardware) para minimizar o ruído. Além disso, este controle também é aplicado em conjunto com o Proporcional e Integral (controle PID).

Para que o controle PID funcione de forma eficiente é necessário que os parâmetros K_p , K_i e K_d utilizados sejam os melhores possíveis, para evitar os problemas descritos acima e alcançar o *setpoint* o mais rápido possível com estabilidade. Este procedimento é chamado de sintonia ou *tunning* e apesar de existirem apenas 3 parâmetros a serem descobertos, sem um conhecimento do tipo de resposta impulsiva do sistema e suas características é difícil encontrar em qual intervalo se encontram os parâmetros para começar a sintonia. Na Figura 4 é apresentado um exemplo de controle PID com diferentes ajustes e a consequência no controle.

Existem diferentes métodos que vão do mais simples como a sintonia manual até

Figura 4 – Resposta no tempo de um controlador proporcional Integral e Derivativo em um sistema de segunda ordem com função de transferência $G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1}$ com três diferentes valores dos parâmetros K_p , K_i e K_d .

Fonte: Própria autoria.

sistemas automatizados com uso de aprendizado de máquina, sendo um dos mais utilizados na indústria o método de Ziegler-Nichols, o método de Cohen-Coon e o método manual (TEMEL SEMIH YAGLI, 2013).

2.2.3 AUTOMAÇÃO

Para que os conceitos de controle discutidos previamente possam funcionar em tempo real, as ações devem ser tomadas automaticamente pelo sistema. Portanto a automação é muito mais que uma forma de reduzir o número de trabalhadores braçais. Segundo Selman (1990), os objetivos particulares da indústria de alimentos para a utilização de automação são:

- Qualidade e Confiabilidade;
- Segurança do Alimento;
- Flexibilidade e Manutenção;
- Aquisição de dados;

A qualidade, a confiabilidade e a segurança do alimento já foram discutidas nos benefícios do controle de processo (seção 2.2.1). A flexibilidade e a manutenção são facilitados pela automação, pois numa planta de produção de alimentos, muitos produtos dividem os mesmos equipamentos, portanto a vantagem está em alterar facilmente o sistema para a produção de vários produtos (ILYUKHIN; HALEY; SINGH, 2001).

A aquisição de dados ajuda a melhorar o sistema, observando as respostas dos atuadores em várias circunstâncias e verificando os pontos que podem ser aprimorados. O monitoramento dos dados pode servir também como uma forma de alerta para evitar problemas na produção.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

A modelagem matemática é a descrição de um sistema real por meio de equações matemáticas, de forma que, por meio destas equações possam ser entendidos os efeitos de diferentes componentes do sistema bem como prever o comportamento deste diante de diferentes cenários. A modelagem matemática é a base das ciências naturais, das ciências sociais e da engenharia, já que modelos podem ser testados, sendo validados ou refutados, passando assim pelo crivo do método científico. Do ponto de vista da Engenharia, o objetivo é analisar e otimizar sistemas, sendo que a descrição matemática dos mesmos possibilita que testes sejam feitos por meio de simulações, economizando tempo e dinheiro.

Na indústria de alimentos, os principais sistemas específicos a serem modelados são

os relacionados à segurança do alimento, como crescimento bacteriano (MCCLURE et al., 1994), os processos de contaminação (LAU; WONG, 2000) e o processo de aquecimento/cozimento de alimentos (NICOLAS et al., 2014). Conhecer a fundo os processos térmicos envolvidos na produção de alimentos é essencial, já que estes representam um alto gasto energético e pequenas alterações no perfil de temperatura do alimento podem implicar em grandes mudanças sensoriais e perda do produto (GULATI; DATTA, 2013).

Como o perfil de temperatura adequado é necessário para a qualidade do produto final, muitos estudos tem sido realizados com o intuito de modelar o processo dos sistemas de aquecimento e os processos que ocorrem no alimento.

2.3.1 FORNOS TIPO TÚNEL

Existem vários sistemas e métodos para realizar o tratamento térmico necessário no processamento de alimentos, sendo que 95% dos processos industriais utilizam pelo menos um tipo de forno (CORPORATION, 1991). Os tipos de forno variam de acordo com o mecanismo de aquecimento, formato e maneira de operação. Dos mecanismos de aquecimento, os mais utilizados são a combustão a gás (propano, butano ou outra mistura) e resistência elétrica, representando 50% e 40% do uso industrial respectivamente (FISHER TODD BELL, 2002). Quanto ao tipo, existe uma enorme variedade nos tipos de fornos, porém para processos contínuos em alta velocidade o que mais se destaca é o forno tipo túnel (CORPORATION, 1991).

Os fornos tipo túnel estão disponíveis em diferentes tamanhos e configurações, de acordo com o perfil térmico e quantidade de alimento que precisam processar. Este tipo de forno possui uma cavidade ou câmara que é aberta nos dois lados (entrada e saída) e algum tipo de esteira que conduz o alimento de um lado ao outro. O aquecimento é normalmente feito por gás ou resistência elétrica nas partes superior e inferior, havendo controle independente em áreas diferentes do forno (zonas) para possibilitar diferentes temperaturas simultaneamente em posições diferentes (FISHER

TODD BELL, 2002). Alguns fornos deste tipo utilizam fluxo forçado de ar aquecido para aumentar a transferência de temperatura ao alimento via convecção. O fluxo de ar também pode ser utilizado para controlar o perfil térmico através de estanques que garantem a diferença de temperatura em zonas distintas (CORPORATION, 1991).

Vários trabalhos foram realizados visando a otimização no processo de aquecimento em fornos tipo túnel. Zanoni, Pierucci e Peri (1994), estudaram o processo interno de assamento levando em consideração o transporte de calor e de massa que ocorre no interior do forno e dentro do alimento. O aquecimento do forno também foi abordado por Nicolas et al. (2014), que estudaram os processos de transferência de calor e massa que ocorrem dentro de um forno linear tipo esteira com áreas de aquecimento inferior e superior e zonas de exaustão de ar. Tal tipo de forno é o mais comum na produção de pães e biscoitos, e por este motivo este tipo de estudo ajudou a projetar fornos mais eficientes e que garantem o perfil de temperatura de forma mais adequada. Ainda em fornos tipo esteira, Illés Balázs (2014) estudou a velocidade do gás e o processo de convecção e Boulet et al. (2010) realizaram simulações utilizando dinâmica de fluido computacional (CFD) para resolver as equações do processo térmico dentro do forno.

2.3.2 PROCESSOS FORNEAMENTO

Quando um alimento é forneado (assado), uma série de mudanças físicas, químicas e bioquímicas ocorrem no alimento. Modelar e otimizar os processos que ocorrem no assamento é fundamental na indústria, para se alcançar eficiência energética e qualidade do produto (VRIES; SLUIMER; BLOKSMA, 1989; HAYAKAWA; HWANG, 1981). O modelo matemático permite quantificar as interações entre o produto e o ambiente do forno e as mudanças no produto assado (SAKIN; KAYMAK-ERTEKIN; ILICALI, 2007).

Estudos do modelo de assamento variam conforme o alimento mas em geral envolvem um processo simultâneo de transferência de calor e transferência de massa (ÖZIL-

GEN; HEIL, 1994; VRIES; SLUIMER; BLOKSMA, 1989; HAYAKAWA; HWANG, 1981; KAISER, 1974; HAYAKAWA; HWANG, 1981).

O aquecimento do alimento aciona uma série de alterações físicas e químicas que levam a expansão da massa, evaporação de água, formação de poros, desnaturação de proteínas, formação de crosta entre outros (SABLANI et al., 1998). Como o processo é muito complexo e depende de muitas variáveis, os estudos e modelos desenvolvidos apresentam simplificações. Lostie et al. (2002) desenvolveram um modelo matemático do processo de assamento em termos do perfil de temperatura e umidade que ocorre em duas etapas, o aquecimento e a formação da crosta. Na primeira etapa ocorre maior mudança no perfil de temperatura e na segunda ocorre maior mudança no perfil de umidade. Este modelo também foi utilizado por Sakin, Kaymak-Ertekin e Ilicali (2007), que estudaram o assamento de *cupcakes* em duas etapas. A importância de cada uma das etapas varia de acordo com o tipo de alimento assado, bem como a complexidade do perfil resultante. Arogba (2001) mediu o perfil de umidade e temperatura em biscoitos finos e encontrou uma relação linear entre a umidade e a temperatura, permitindo simplificar o modelo ou seja, conhecendo-se o perfil térmico do biscoito serão conhecidas suas propriedades.

2.3.2.1 Transferência de calor no alimento

Nos fornos tipo túnel (exceto os fornos com aquecimento por micro-ondas), durante o assamento, o calor é transferido para o alimento por três processos: radiação advinda das superfícies do forno quente, por condução da superfície que está em contato com o alimento e por convecção pelo ar em volta do mesmo. Os três processos transferem energia para o alimento pela superfície, e então o calor é difundido até o centro por condução (SABLANI et al., 1998). A importância que cada um dos três processos (radiação, condução e convecção) tem no aquecimento do alimento depende da geometria do forno, tipo de fonte de calor e funcionalidades do mesmo (fluxo de ar forçado ou não, aquecimento direto ou indireto entre outros).

Conhecendo as condições de transferência de calor do forno para o alimento durante o tempo de assamento, é possível modelar o aquecimento do alimento como um processo de condução, supondo que a densidade ρ , a condutividade térmica $k_{\vec{r}}$ e o calor específico a pressão constante C_p dependem da temperatura (AROGBA, 2001), (LOSTIE et al., 2002).

2.3.2.2 Modelo matemático da condução de calor no alimento

O processo de transferência de calor pode ser modelado aplicando um dos princípios mais básicos da Física, a conservação da Energia (E). O problema geral consiste em resolver a Equação advinda da conservação de Energia para encontrar a temperatura em todos os pontos do sistema em função do tempo, ou seja, encontrar $T(\vec{r}, t)$. Utilizando o princípio da conservação de Energia à um elemento infinitesimal de volume podemos escrever a Equação 2.3:

$$\frac{\partial E_{armazenada}}{\partial t} = \frac{\partial E_{dentro}}{\partial t} - \frac{\partial E_{fora}}{\partial t} + \frac{\partial E'_{gerada'}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Onde E_{dentro} e E_{fora} se referem a energia para dentro e para fora do volume de controle, e $E'_{gerada'}$ corresponde a reações químicas endotérmicas ou exotérmicas, mudança de estado ou absorção eletromagnética.

A Taxa de armazenamento de Energia no tempo $\frac{\partial E_{dentro}}{\partial t}$ que ocorre em um elemento de volume infinitesimal pode ser relacionada a temperatura por meio do Calor Específico pela Equação 2.4.

$$\frac{\partial U}{\partial x} \cdot m = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

Em que U é a energia interna, m é a massa, ρ a densidade e c_p é o calor específico à pressão constante.

A quantidade de Energia que entra menos a que sai em um elemento infinitesimal, em coordenadas cartesianas pode ser escrita utilizando a expansão em Série de Taylor

(Equação 2.5), utilizando apenas o termo de primeira ordem.

$$E_{adicionada} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial q_z}{\partial z} \cdot dz\right) \quad (2.5)$$

Pela Lei de Fourier, os fluxos de calor que entram nos volumes de controle q_x , q_y e q_z podem ser escritas como

$$\begin{aligned} q_x &= -k_x \cdot (dy \cdot dz) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y &= -k_y \cdot (dz \cdot dx) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z &= -k_z \cdot (dx \cdot dy) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.6)$$

onde k_x , k_y e k_z são as constantes de condutividade térmica nos três eixos cartesianos. Substituindo a Equação 2.6 na Equação 2.3 e então temos a Equação 2.7.

$$E_{entra} - E_{sai} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right) + E'_{gerada'} \quad (2.7)$$

Por último, temos o termo de “geração” de energia (Equação 2.7 e 2.3), que pode ser decorrente de reações químicas, sendo positivo para exotérmicas (termo fonte) e negativo para endotérmicas (sumidouro) ou também energia eletromagnética absorvida, como por exemplo micro-ondas.

$$E'_{gerada'} = \dot{q} \quad (2.8)$$

Com isto, temos a Equação geral da transferência de calor, que em coordenadas cartesianas é dada pela Equação 2.9.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} \quad (2.9)$$

Para se encontrar $T(\vec{r}, t)$ deve-se resolver a Equação diferencial 2.9, partindo de uma condição inicial conhecida $T(\vec{r}, 0)$ e aplicadas as condições de contorno do problema (fornecimento de calor em uma superfície, temperatura constante em uma face entre outras possíveis). Porém, como a Equação 2.9 é uma EDP (Equação Diferencial

Parcial), na maioria dos casos reais ela não pode ser resolvida analiticamente e por isto algum tipo de aproximação que não comprometa os resultados deve ser feita.

Para resolver este tipo de problema de forma analítica é necessário que exista alguma simetria, geométrica ou de condições de contorno, que possibilitem manipulações na EDP (Equação Diferencial Parcial) para se encontrar a solução. Outra maneira de contornar o problema da resolução da EDP é desconsiderar termos menos significativos, que podem muitas vezes facilitar muito a solução da Equação. Quando a condutividade térmica é igual ao longo de todas as direções ($k_x = k_y = k_z$), o meio é considerado isotrópico e então a Equação 2.9 pode ser escrita como

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{q} \quad (2.10)$$

Em que $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$. Outro caso muito utilizado nos processos térmicos da indústria de alimentos é a solução da Equação de calor no regime permanente, em que a variação do perfil de temperatura em função do tempo é desprezível e, portanto a solução que se quer encontrar, $T(x, y, z, t)$, passa a não ser mais função de t e então temos $T(x, y, z)$. Com isto, a Equação 2.9 é drasticamente simplificada já que $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ e então temos a Equação 2.11.

$$k \nabla^2 T + \dot{q} = 0 \quad (2.11)$$

Para se resolver a Equação 2.11 ou 2.9, além de conhecer as condições iniciais (a temperatura em todos os pontos no instante $t=0$) é preciso conhecer as condições de contorno, que no caso implicam em como o calor é introduzido no sistema. As condições de contorno mais encontradas no caso do aquecimento de alimento são as de Dirichlet, em que a temperatura em um ponto é especificada (como o alimento em contato com um material com temperatura conhecida) ou condições de contorno de Newmann, em que a derivada da temperatura em relação ao tempo (fluxo de calor) é especificada em algum ponto.

Mesmo com a Equação 2.11, dependendo de $\dot{q}$ e também da geometria, pode não ser possível resolver o problema analiticamente. Nestes casos, existem vários métodos computacionais que podem ser utilizados.

2.3.3 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS APLICADOS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O método das diferenças finitas é uma técnica utilizada para encontrar soluções aproximadas de uma ou de um conjunto de equações diferenciais. Basicamente, o método consiste em aproximar a derivada de uma função pela Equação 2.12, utilizando o teorema fundamental do cálculo, com um valor pequeno de Δk . Desta forma, quanto menor for o valor de Δk , maior será a precisão do cálculo uma vez que o limite de Δk tendendo a zero resulta no valor exato da derivada, onde k é uma das variáveis da Equação a ser discretizada.

$$\frac{\partial}{\partial k} T(k, a, b, \dots) \simeq \frac{T(k + \Delta k, a, b, \dots) - T(k, a, b, \dots)}{\Delta k} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial k} = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta k} \quad (2.13)$$

A Equação 2.13 representa a discretização da função $T(k)$ em elementos discretos de tamanho Δk . As derivadas de maior ordem podem ser obtidas aplicando a discretização da Equação 2.13 n vezes, sendo n a ordem da derivada. Para $n = 2$ por exemplo, aplicando a Equação 2.13 aos termos T_{i+1} e T_i da mesma Equação e então temos:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial k^2} = \frac{T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}}{\Delta k^2} \quad (2.14)$$

Desta forma, o resultado é um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas para encontrar a solução discretizada da Equação. Quanto menor for Δx , maior será a precisão do método (desconsiderando os problemas de truncamento de

variáveis de ponto flutuante), no entanto maior será a quantidade de equações e portanto, resolvê-las exigirá maior poder computacional e memória.

Nos problemas de transferência de calor, a temperatura é função de mais de uma variável, e o método mostrado acima é aplicado em relação a todas as variáveis. O resultado é um conjunto de equações algébricas complexas para se resolver diretamente e, portanto, simplificações podem ser feitas de acordo com o caso, para facilitar a resolução numérica, como por exemplo a resolução do regime permanente em que $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ou alguma simetria geométrica que permita reduzir a dimensão do problema.

2.3.3.1 Regime permanente

No regime permanente, o método das diferenças finitas é aplicado à Equação 2.11, visto que a temperatura não varia com o tempo. Em uma dimensão, a Equação 2.11 é discretizada utilizando a Equação 2.14, o que resulta em:

$$T_k = \frac{T_{k+1} + T_{k-1} + \frac{q_k \cdot (\Delta x)^2}{k}}{2} \quad (2.15)$$

Em 2 e 3 dimensões a Equação resultante é similar a 2.15, porém com termos discretizados também nas outras coordenadas. Como geralmente existe uma grande quantidade de equações, vários métodos de resolução podem ser aplicados, com vantagens e desvantagens que dependem da geometria, quantidade de dimensões e tipo de condições de contorno presentes no problema. As principais a serem destacadas são o método direto, o método de Jacobi, Gauss-Seidel e Sucessive Over-Relaxation (SOR).

No método direto, é montada uma Equação matricial no formato $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B}$, em que $\mathbf{A}$ é a matriz dos coeficientes das equações acopladas, $\mathbf{x}$ é a matriz das incógnitas (temperatura) e $\mathbf{B}$ é uma matriz conhecida de valores dada pelas condições de contorno do problema. Encontrar a matriz das temperaturas $\mathbf{x}$ se resume a um problema de encontrar a inversa da matriz $\mathbf{A}$, porém o problema é complexo quando

o tamanho da matriz é grande uma vez que o custo computacional de encontrar a inversa de uma matriz cresce com o quadrado do número de linhas e colunas.

Além do método de resolução direta, existem formas iterativas de se resolver o conjunto de equações acopladas. Os métodos de Jacobi, Gauss-Seidel e SOR consistem em obter a solução resolvendo ponto a ponto as equações, partindo de um "chute inicial" para a temperatura. Este cálculo é reiterado até que os valores da temperatura atinjam uma estabilidade e não se alterem significativamente.

Os quatro métodos citados variam na forma com que é feita a resolução das equações. No método de Jacobi (Equação 2.16), o cálculo de T_k^i é dado em função de T_{k+1}^{i-1} e T_{k-1}^{i-1} , ou seja, em função da iteração passada.

$$T_k^i = \frac{T_{k+1}^{i-1} + T_{k-1}^{i-1} + \dot{q}_k \cdot (\Delta x)^2}{2} \quad (2.16)$$

Na Equação 2.16, i representa a iteração e T_k^1 , é um 'chute' inicial da temperatura para todo k . A Equação 2.16 é resolvida para todos os valores de k , repetidamente para $i = 2$, $i = 3$, e assim por diante até que não haja mais alterações significativas nos valores de T_k em relação a iteração anterior, indicando que o algoritmo convergiu e foi encontrada a solução de T_k para todo k .

O método de Gauss-Seidel (Equação 2.17), é um aprimoramento do anterior, e o cálculo de T_k^i é feito em função de T_{k+1}^i e T_{k-1}^i , e não da iteração anterior ($i - 1$), o que acelera o processo de convergência.

$$T_k^i = \frac{T_{k+1}^i + T_{k-1}^i + \dot{q}_k \cdot (\Delta x)^2}{2} \quad (2.17)$$

No método SOR, a atualização do valor T_k^i leva em conta também um parâmetro chamado parâmetro de relaxação que aumenta a velocidade de convergência. Primeiramente, é calculada a diferença entre T_k^{i-1} e T_k^i encontrado pelo método de Gauss-Seidel. Essa diferença é então amplificada pelo fator w , o parâmetro de relaxação, sendo que $1 < w < 2$. Finalmente o valor T_k^i real é encontrado, como é mostrado

na Equação 2.18.

$$T_k^i(sor) = T_k^{i-1} + w \cdot (T_k^i(Gauss - Seidel) - T_k^{i-1}) \quad (2.18)$$

2.3.3.2 Regime não-permanente

No regime não permanente é necessário discretizar a Equação 2.9, visto que a derivada temporal não é igual a zero como no caso do regime permanente. Aplicando as discretizações descritas nas equações 2.13 e 2.14 a Equação 2.9, para um sistema em duas dimensões em coordenadas cartesianas obtemos a seguinte Equação:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \alpha \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) \quad (2.19)$$

em que $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, i e j são os índices dos elementos discretizados nas direções x e y, e n é o índice de discretização no tempo.

Para resolver esta EDP, é necessário conhecer o perfil de temperatura no tempo inicial ($T_{i,j}^0$) para todos os valores de i e j. Existem métodos diretos e indiretos de se encontrar a evolução no tempo. No método direto chamado de FTTCM (*foward in time centered in space* - a frente no tempo e centrado no espaço), o valor a frente no tempo $T_{i,j}^{n+1}$ é encontrado conhecendo-se os valores no instante anterior a sua volta (por isso centrado no espaço), ou seja, os valores $T_{i+1,j}^n$, $T_{i-1,j}^n$, $T_{i,j+1}^n$ e $T_{i,j-1}^n$, como mostrado no *stencil* da Figura 5. O procedimento é feito para todos os valores i e j em um instante de tempo n, então n é incrementado e o procedimento é repetido até se chegar no tempo final desejado.

Figura 5 – Grade (*stencil*) que descreve a relação entre os pontos das diferenças finitas. Os eixos x e y possuem elementos com índices discretos representados por i e j e n é o elemento temporal.

Adaptado de Hawke (2014).

2.4 SISTEMAS EMBARCADOS EM CONTROLE DE PROCESSOS

Os circuitos eletrônicos mudaram muito desde o início da era digital, com o poder computacional aumentando cerca de 10.000 vezes entre 1978 e 2010, dada a evolução nas técnicas de produção dos circuitos integrados, o que foi previsto pela lei de Moore tem se mantido verdadeiro até os dias de hoje, sem previsão de estagnação (MACK, 2015; FULLER; MILLETT, 2011). Além disso, o tamanho, preço e consumo dos dispositivos diminuíram sensivelmente, melhorando a facilidade de uso e conectividade. No entanto, os sistemas de automação industrial, principalmente no Brasil, não têm

acompanhado tal evolução e ainda são muito caros e de difícil uso, além de serem em sua grande maioria de tecnologia importada.

Sistemas embarcados são dispositivos eletrônicos com poder computacional que fazem parte de um sistema mecânico/eletrônico maior. Estes dispositivos interagem com outras partes do sistema realizando operações lógicas em tempo real, assim como um PC (computador pessoal), porém os periféricos de entrada e saída de cada sistema embarcado são feitos para as suas funções específicas e portanto geralmente possuem menor custo, tamanho e gasto energético. Eles são encontrados vários dispositivos eletrônicos atuais, desde controles remotos de televisão, televisões, rádios, semáforos, radares, fornos de micro ondas, entre outros (MILECKI, 2015).

Dentro da indústria de alimentos, os sistemas embarcados mais importantes são os que controlam o processo de produção. Estes sistemas devem estar conectados aos sensores e a outros sistemas da indústria, processando os dados recebidos e tomando as decisões de controle que são enviadas aos atuadores. As alternativas de sistemas embarcados para este tipo de controle são os CLP's (Controlador Lógico Programável), microcontroladores, computadores e sistemas mistos com processamento distribuído. Segundo uma pesquisa de Ilyukhin, Haley e Singh (2001), 88 % das indústrias de alimentos utilizam os CLP's como principal forma de controle e em apenas 6 % predominam sistemas distribuídos. Esta pesquisa também revelou que uma grande gama de marcas e sistemas comerciais são utilizados, inclusive dentro de uma mesma empresa, o que dificulta uma integração mais inteligente dentro do sistema.

Apesar do grande uso de CLP's dentro das indústrias de alimentos, estes dispositivos não tiveram a mesma evolução que os computadores portáteis e dispositivos móveis tiveram nos últimos 15 anos, com um grande aumento no processamento e redução no preço. Por este motivo, o desenvolvimento de sistemas de controle baseados em microcontroladores tem crescido muito, com placas que podem realizar as mesmas operações com tamanho e custo reduzido (HOEHN; SBENATY, 2005). Para controles mais complexos, que exijam um maior processamento de dados, os sistemas

de computação de baixo custo baseados em hardwares similares a tablets e celulares também são uma alternativa emergente.

2.4.1 MICROCONTROLADORES

Microcontroladores são pequenas unidades de processamento que possuem todos os seus elementos de processamento e memória em um único chip e, portanto podem operar sem a necessidade de periféricos. Esta é a principal diferença entre um microcontrolador e um microprocessador, como os que são encontrados nos computadores. Por possuir todas as unidades em um único chip, seu processamento e memória são em geral muito inferiores a de um computador, porém as vantagens estão na quantidade de energia utilizada, tamanho e robustez.

Os microcontroladores surgiram na década de 1970 e tiveram um enorme avanço até o momento. Atualmente, existem centenas de empresas que produzem microcontroladores e suas especificações variam de acordo com o objetivo do mesmo dentro do sistema, podendo ir de chips minúsculos e baratos com velocidade da ordem de kHz e apenas um pino digital de entrada e saída a microcontroladores ARM (*Advanced RISC Machine* – Máquina RISC Avançada), que possuem processamento e arquitetura superior aos microcontroladores RISC (*Reduced Instruction Set Computer* - Computador com um conjunto reduzido de instruções) tradicionais, atingindo processamento da ordem de GHz (MAZIDI et al., 2009).

2.4.1.1 Plataforma Arduino

Sistemas eletrônicos de hardware livre são projetados e oferecidos da mesma forma que um software livre, oferecendo todas as informações necessárias para se replicar um projeto, como diagrama de circuito, componentes e *layout* da placa de circuito impresso (POWELL, 2012). Com a difusão de microcontroladores de baixo custo, o conceito de *hardware* livre se integrou aos de *software* livre, sendo parte primordial no movimento *maker*, que teve grande impacto no desenvolvimento de novos produtos e

também na educação voltada a tecnologia (MARTIN, 2015).

Dentro deste conceito de hardware livre surge a plataforma Arduino (Figura 6). Esta plataforma foi concebida em 2005 por uma equipe sediada na Itália liderada pelo pesquisador Massimo Banzi, que queria ensinar eletrônica e programação de computadores a alunos de design, para que eles usassem em seus projetos de arte, interatividade e robótica (ARAÚJO et al., 2013). O intuito da equipe era desenvolver uma plataforma para introduzir os conceitos de eletrônica e programação para leigos de forma intuitiva, simplificada e de baixo custo (BARRETT, 2013).

Figura 6 – Arduino Uno R3 – Principal placa da plataforma Arduino, com Atmega328pu e Comunicação USB.

Imagem obtida em www.arduino.cc Acesso em 13/01/2017

O Arduino é uma plataforma para placas microcontroladoras que permite a leitura de sensores (analógicos e digitais), comunicação serial, e acesso aos GPIO's (*General-purpose input/output* - Entradas e saídas de propósito geral) para controle de motores, LEDs e outros dispositivos. A principal placa da linha Arduino, o Arduino Uno utiliza um microcontrolador ®Atmel da linha Atmega, o Atmega328p-PU com um oscilador de 16 MHz externo, um regulador de tensão de 5 V, botão de *reset*,

conector de alimentação, pinos conectores, e alguns LEDs para facilitar a verificação do funcionamento. A conectividade é feita diretamente por uma porta USB, tanto para gravar os programas quanto para comunicação serial. Além disso, a porta USB pode também fornecer a alimentação de 5 V para a placa.

A gravação dos programas na placa é controlada por um *chip* que faz a conversão USB para Serial, sendo nos primeiros modelos o CHIP FT232RL, que na terceira revisão do Arduino UNO foi substituído por um microcontrolador Atmega16U2, que tem o papel exclusivo de ser a interface entre a porta USB e o Arduino (D'AUSILIO, 2012). Este conceito é uma das chaves do sucesso da plataforma, já que a gravação dos programas pode ser feita diretamente na placa, não exigindo um gravador externo e uma fonte regulada como a maioria dos microcontroladores do mercado. Isto viabilizou a utilização de microcontroladores por pessoas que não tem acesso a um laboratório de eletrônica.

A programação do microcontrolador utiliza uma IDE (*Integrated Development Environment* - interface integrada de desenvolvimento) baseada no *software Processing*, que utiliza uma versão simplificada da linguagem C/C++ com uma camada de pós-processamento que adiciona funcionalidades e simplifica o seu uso (BUECHLEY et al., 2008). Esta Linguagem foi desenvolvida em 2001 no laboratório de mídia do MIT (Massachusetts Institute of Technology), e esta disponibilizada sobre a licença GPL (General Public License - Licença Pública Geral) e LGPL (GNU Lesser General Public License - licença menos pública GNU), sendo completamente *open source* e multi plataforma, podendo ser utilizado nos sistemas Windows, Linux e Mac OS. O *Processing* foi desenvolvido inicialmente para facilitar o uso de programação por artistas e ensinar programação de forma simples e visual e pela sua facilidade é utilizado atualmente por milhões de pessoas do ensino e prototipagem à produção de softwares (REAS; FRY, 2007).

Outra facilidade da plataforma Arduino é a padronização dos pinos de Entrada e Saída, possibilitando que uma série de circuitos de expansão, chamados de *Shields*,

possam ser utilizados com as placas, dando funções extras ao microcontrolador, como comunicação Bluetooth, *wi-fi*, GSM, Relês entre outros. Estes *Shields*, assim como as próprias placas, podem ser produzidos por qualquer companhia já que o Arduino é um hardware livre. Com a popularização das placas, mais sensores, *Shields* e periféricos são produzidos para abastecer o ecossistema, o que torna o Arduino ainda mais popular, fazendo disto um ciclo positivo (MCROBERTS, 2011). O mesmo ciclo ocorre com a disponibilização de projetos com código aberto e dessa forma, quanto maior for o número de usuários da plataforma, maior será a quantidade de projetos livres e suporte disponíveis para o ecossistema.

Com o sucesso inicial da plataforma, todo um ecossistema foi criado ao redor do Arduino, com muitas bibliotecas e funcionalidades implementadas por terceiros, disponibilizadas livremente. Isto atraiu outras empresas e fabricantes de microcontroladores e placas integradas pois a quantidade de suporte a ferramentas disponíveis para o Arduino tornou a plataforma atrativa e muitas outras empresas adotaram a IDE do Arduino para seus microcontroladores e placas customizadas, como por exemplo o esp8266, teensy, intel galileo entre outros. Quanto maior a comunidade e ferramentas, mais usuários são atraídos, aumentando a comunidade e a quantidade de ferramentas. Este efeito "bola de neve" levou o Arduino a ser a referência atual em microcontroladores.

2.4.2 COMPUTADORES EM PLACA ÚNICA

Com o avanço e desenvolvimento de novos hardwares com mais memória e processamento e, principalmente devido à corrida tecnológica dos dispositivos móveis, surgiu nos últimos anos a computação de ultra baixo custo (Ultra Low Cost Computing – ULCC), que basicamente utiliza o hardware de smartphones e periféricos de entrada e saída em uma única placa (HEEKS; ROBINSON, 2013). Vários projetos têm se desenvolvido neste sentido, entre eles podemos citar o Raspberry Pi, Beaglebone, Intel Galileo e Edson, Arduino Yun, Orange pi entre outros. Tais projetos

entregam placas de baixo custo (a partir de 5 dólares) que possibilitam aplicações em várias áreas como automação, robótica, equipamentos médicos (TEIKARI et al., 2012), ensino de computação e programação, aquisição dinâmica de dados, servidores web, monitoramento remoto e até controle de satélites (BERDAHL; LLIMONA, 2013), entre outras aplicações.

Existem vários modelos de computadores em placa única, que diferem nas suas especificações, preço, processamento, sistema operacional e tipo de licença. Levando em conta o preço, licença e a quantidade de usuários, o Raspberry Pi é a placa que mais se destaca no mercado atualmente, principalmente pelo tamanho da comunidade envolvida e suporte, trazendo estabilidade para o sistema.

2.4.2.1 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um computador em placa única do tamanho de um cartão de crédito (Figura 7a), desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation, que se iniciou com o intuito de promover o ensino básico de computação com baixo custo em escolas de baixa renda.

O projeto foi concebido em 2006 como uma forma barata e simples de ensinar computação, programação e eletrônica às crianças. Em 2011 o projeto saiu do papel com o pré-lançamento do modelo A, que possuía 256 Mb de memória RAM (Random Access Memory) e uma entrada USB. Este modelo recebeu um upgrade (modelo B) em 2012 com o primeiro lançamento oficial em larga escala, contando agora com uma memória de 512 Mb e duas entradas USB.

O Raspberry Pi 1 modelo B (o primeiro vendido em larga escala), Figura 7a, foi produzido em um único chip broadcom BCM2835, com um processador ARM de 700 MHz e 512 Mb de memória RAM. A memória física fica em um cartão SD de até 32 Gb e suporta uma série de sistemas operacionais baseados em Linux e a distribuição oficial da Raspberry Pi Foundation é um Linux Debian chamado *wheezy*. Este modelo possui duas entradas USB, uma porta Ethernet, uma saída HDMI, uma saída RCA,

uma saída de vídeo e oito pinos GPIO (General Purpose Input/Output - Pinos de entrada/saída de propósito geral).

Em sequencia, novos modelos foram lançados consecutivamente. O modelo b+ surgiu em 2014, contando agora com 4 portas USB e 40 GPIO mas nenhuma alteração no processador. Em 2015 o modelo 2 foi lançado, alterando o processador para um ARM-cortex A7 quadri-core operando a 900 MHz e 1GB de memória RAM. Em 2016, o modelo 3 foi lançado (Figura 7c), contendo agora um ARM-cortex A53 quadri-core com instruções de 64 bits à 1.2GHz. Em 2016 também foi lançado o Raspberry Pi zero (Figura 7d), um modelo econômico, custando apenas 5 dólares e de tamanho reduzido, mantendo o processador do modelo B+ .

Figura 7 – Modelos do Raspberry Pi.

(a) Raspberry Pi 1 – Modelo B

(b) Raspberry Pi – Modelo B+

(c) Raspberry Pi 3

(d) Raspberry Pi zero

Imagens retirada de www.raspberrypi.org (acesso em 16.01/2017)

Por ser um projeto totalmente open-source ele usa uma distribuição Unix com

licença GNU além de um hardware aberto. Com isto, o Raspberry Pi ganhou muitos adeptos rapidamente, sendo utilizado atualmente em várias áreas como ensino, processamento de dados, clusters, webserver, robótica e uma série de projetos embarcados.

Na área da educação, a placa tem sido utilizada devido ao seu baixo custo (Todos os modelos foram lançados a US\$35, exceto o Raspberry Pi zero, cujo valor é US\$5) e também por ser simples e acessível para o usuário entender e manipular o hardware. Nesta última década, dispositivos computacionais tem se tornado equipamentos fechados, que o usuário o encara como unidades lacradas de alumínio ou plástico, sem ideia do que está dentro. Neste sentido, o Raspberry Pi possibilita ao usuário o entendimento das alterações no hardware assim como do software, já que pode utilizar várias distribuições de Linux, que possuem várias vantagens didáticas. Baseado nestas ideias, alguns projetos para ensino de computação em comunidades carentes utilizam esta plataforma como uma alternativa barata e poderosa como, por exemplo, o projeto de Haghighi e Cliff (2013).

Além de projetos educacionais, o Raspberry Pi é utilizado também em projetos de pesquisa de ponta, como por exemplo o satélite CCRMA (BERDAHL; LLIMONA, 2013) que envia placas para controlar pesquisas científicas em satélites. Na área da medicina, existem vários projetos de controle e desenvolvimento de equipamentos baratos Teikari et al. (2012).

2.4.2.2 Internet das coisas

No novo conceito de IoT (Internet of Things - Internet das Coisas), desenvolvido por Kevin Ashton em 2009, em um mundo onde objetos físicos estão integrados a uma rede de informações, os objetos se tornam “inteligentes” e podem interagir com o resto da rede (COVINGTON; CARSKADDEN, 2013).

Em 2015 existiam em torno de 10 bilhões de dispositivos conectados à internet, com a previsão de chegar a 34 bilhões em 2020. Com este mercado em crescimento, a

expectativa é de que 6 trilhões de dólares sejam investidos em tecnologias e soluções para dispositivos IoT nos próximos 5 anos (LEE; LEE, 2015; INSIDER, 2016).

Neste cenário, computadores pequenos e de baixo custo como o Raspberry Pi são extremamente importantes já que podem servir como unidades móveis de processamento de dados (TEIKARI et al., 2012) bem como receber e processar dados de sensores numa rede de sensores interconectados (HAGHIGHI; CLIFF, 2013). Desta forma, o desenvolvimento de sistemas *open source* e *open hardware* de controle inteligente que utilizem as recentes tecnologias embarcadas de baixo custo conectados a internet é extremamente importante para a competitividade das empresas de pequeno e médio porte.

3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo testar a seguinte hipótese:

"É possível o controle e automação de um forno em escala piloto para processamento de alimentos com informações de sensores e simulação computacional em tempo real utilizando computação embarcada de baixo custo"

Para testar esta hipótese os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- Modelagem matemática e simulação numérica do comportamento térmico do forno utilizando o método das diferenças finitas;
- Modelagem matemática e simulação numérica do aquecimento do alimento no forno em função do tempo;
- Implantação de um controle PID baseado na resposta das simulações do perfil térmico do forno e do alimento;
- Desenvolvimento de hardware e software de uma unidade de controle escrava no forno utilizando Arduino para controle dos atuadores e sensores;
- Desenvolvimento de um sistema de controle mestre com interface gráfica, utilizando um Raspberry pi, que realiza as simulações e o controle do forno;
- Validação do sistema de controle;

4 MATERIAIS

4.1 FORNO TIPO TÚNEL EM ESCALA PILOTO

4.1.1 FUNCIONAMENTO DO FORNO

Todo o sistema de controle, as modelagens matemáticas e as simulações foram desenvolvidas no forno em escala piloto tipo túnel com esteira, localizado no LAFAC (Laboratório de Física Aplicada e Computacional), situado em Pirassununga, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP (Figura 8). Este forno foi desenvolvido por Pereira (2012) e pelos pesquisadores do LAFAC como parte de um projeto de automação de uma linha de produção industrial (FAPESP 2009/07593-1).

O forno, mostrado na Figura 8, possui 2,0 metros de comprimento por 0,5 metro de altura e largura, sendo revestido externamente por aço inox e placas de cerâmica refratária. O espaço interno do forno possui 2,0 metros de comprimento por 0,4 metros de altura e largura, espaço este que possui duas áreas principais, o topo e o lastro, que estão separados pela esteira de transporte (Figura 9). A esteira é circular e tanto a entrada, como a saída do forno são abertas.

Figura 8 – Imagem do forno em escala piloto, localizado no LAFAC, USP Pirassununga.

Fonte: Própria autoria.

O aquecimento do forno é feito por resistências que estão posicionadas ao longo da parte superior e inferior do forno, com três zonas de aquecimento independentes na parte superior e três na parte inferior, como ilustra a Figura 10a e 10b, com R1 no setor 1, R2 no setor 2 e R3 no setor 3 e as zonas de 4 à 6 na parte inferior.

Figura 9 – Visão frontal do forno.

Adaptado de Pereira (2012)

A resistência total em cada um dos setores é formada por três resistores em formato de "W" e potência de 1200 watts cada. Juntas, elas possuem largura e comprimento de 0.4 metro e suas posições podem ser visualizadas na Figura 10b. As resistências inferiores e superiores estão superpostas verticalmente. As resistências são acionadas por contadores que por sua vez são controlados pelo sistema de controle desenvolvido para o forno (Seção 4.2)

Figura 10 – Visão superior e lateral do forno.

(a) Visão lateral do forno.

(b) Visão superior do forno.

Fonte: Própria autoria.

4.1.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA CAPTURA DE DADOS E CONTROLE DOS ATUADORES

Para que o sistema de controle (Seção 4.2) possa efetuar a leitura dos sensores e controlar os atuadores, foi desenvolvida uma placa de controle (diagrama da Figura 11), englobando tanto a instrumentação para a leitura dos sensores termopar quanto o controle dos atuadores (resistências e motor da esteira).

O circuito elétrico e layout dos componentes foi desenvolvido utilizando o software *Eagle-PCB* versão 7.7. O layout escolhido foi de placa de cobre de lado único com 20x25 cm e foi feito utilizando a máquina de prototipação de PCB marca LPKF e os componentes foram soldados manualmente.

Figura 11 – Diagrama da placa de controle desenvolvida para o forno. Diagrama completo no Anexo A.1.

Fonte: Própria autoria.

O controle dos contatores que acionam as resistências foi feito utilizando acopladores óticos MOC3210 para isolar a parte de alta tensão do sistema (contatores) da parte de baixa tensão (Figura 11 - atuador). Dois sistemas de alimentação distintos foram usados para evitar que ruído de tensão fosse injetado no sistema de controle (Figura 11 - fonte). Para o controle do motor da esteira (um motor com inversor modelo CFW-08), foram usados três transistores BC337, conectados diretamente ao microcontrolador (Figura 11 - inversor).

Os sensores de temperatura utilizados no forno foram termopares tipo k, ligados a amplificadores com compensação de junção fria AD595, com tensão de referência igual a 5V. No projeto inicial realizado por Pereira (2012), três sensores estavam posicionados na parte superior da esteira (setores 1, 2 e 3) e três na parte inferior

(setores 4, 5 e 6). Os sensores foram recolocados em posições que pudessem fornecer as informações necessárias para obter o perfil térmico das Seções 5.1.2 e 5.1.1. Para isso, um sensor foi colocado no centro da esteira, dois no topo entre as resistências 1 e 2 e 2 e 3 e os outros três na lateral, em altura média entre a esteira e o topo igualmente espaçados no sentido de profundidade do forno (Figura 12).

Figura 12 – Corte lateral do forno com locais dos sensores.

Fonte: Própria autoria.

4.2 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle do forno foi desenvolvido como mostrado na estrutura da Figura 13, com duas unidades funcionando de forma integrada. A unidade escrava localizada na lateral do forno realiza a interação com a instrumentação eletrônica para a leitura dos sensores e controle dos atuadores, os pré-processamentos e controles de baixo nível e se comunica com a unidade mestre. A unidade mestre é responsável pela interação com o usuário, controle de alto nível, simulação numérica, armazenamento de dados e ajuste de configurações.

Todo o projeto do sistema é aberto (software e hardware livre) e se encontra disponível em Atzingen (2016b) e Atzingen (2016a) sob licença MIT.

Figura 13 – Diagrama geral do funcionamento do sistema de controle.

Fonte: Própria autoria.

4.2.1 UNIDADE ESCRAVA

A unidade escrava é uma parte da placa de controle do forno (*hardware*), situada na lateral do mesmo e isolada em uma caixa de controle (Figura 11) responsável pela lógica de controle (*software*) e comunicação com a unidade principal.

4.2.1.1 Hardware

Esta unidade consiste em um microcontrolador Atmega328p-PU, comunicador *bluetooth* serial HC-06 e as conexões para a instrumentação relativa aos sensores e atuadores (Figura 14).

Figura 14 – Esquema elétrico da unidade escrava (parte da placa de controle do forno).

Fonte: Própria autoria.

Como este circuito faz parte da placa de controle, o mesmo software para montagem de diagrama e layout foi utilizado, facilitando a integração entre os dois circuitos da placa.

4.2.1.2 Protocolo de comunicação

Toda a comunicação entre a unidade mestre e a unidade escrava foi feita utilizando dois módulos *bluetooth* (um em cada unidade), modelo HC-05 e HC-06 da marca *linvour*, com comunicação serial assíncrona padrão RS232 e *baudrate* de 96000 bits/segundo.

O *firmware* de ambos os módulos foram alterados e configurados via comando AT para que as unidades se conectassem especificamente uma à outra pelo endereço de MAC (Media Access Control) ao iniciarem, evitando a necessidade de pareamento manual ou por software como é comum nos dispositivos *bluetooth*.

Para a comunicação, foi criado o protocolo mostrado na Figura 15, no qual os dados são enviados como uma sequência de bytes, e cada byte é traduzido como um caractere alfanumérico utilizando a Tabela ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* - padrão americano para código de troca de informação). Todas as comunicações (independente do sentido) são compostas por um caractere de início, uma sequência de caracteres de informação e um caractere de fim de comunicação (Figura 15).

Figura 15 – Protocolo de comunicação entre as unidades. Comando "SHA42\n- Esteira no sentido para frente com 42% da velocidade.

Fonte: Própria autoria.

A codificação dos caracteres e objetivo está descrita na Tabela 1, e foi escolhida para manter o padrão com outros dispositivos de controle desenvolvidos no LAFAC. Tanto a unidade mestre quanto a unidade escrava podem emitir e interpretar mensagens utilizando a codificação definida pelo protocolo mostrado na Figura 15 e por padrão os caracteres escolhidos são os da Tabela 1, podendo ser alterados no *software* da interface gráfica de controle e nas opções da biblioteca do software no Arduino.

Toda vez que uma nova mensagem é enviada, independente do sentido da transmissão, quando a outra unidade recebe a mesma, a mensagem é transmitido de volta como um eco, para que a unidade que enviou o sinal possa conferir que a outra

Tabela 1 – Codificação - Caractere ou grupo de caracteres e funcionalidade.

Informação	Caractere	Código ASCII
Início de mensagem	S	83
Emergência	E	69
Pedido de temperatura	T	84
Ligar resistência (100%)	1	49
Desligar resistência	2	50
Potencia PWM resistência	P	80
Pino da resistência	1..6	49..54
Esteira para frente	H	72
Esteira para tras	A	41
Esteira parada	D	44
Período PWM resistência	U	85
Verificação de status	K	75
Ajuste leitura ADC	L	76
Fim de mensagem	\n	10

realmente recebeu o comando e está operando normalmente.

4.2.1.3 Software

O software para o microcontrolador foi desenvolvido utilizando a plataforma arduino e implementa as seguintes funcionalidades:

- Realizar a comunicação com a unidade mestre;
- Realizar a conversão AD (Analógico/Digital) nos 6 sensores de temperatura;
- Calcular e retornar para a unidade mestre a média de leituras consecutivas, com o número de leituras e intervalo entre elas ajustável;
- Implementar um controle de potência independente para as 6 resistências, com um PWM (*Pulsed Width Modulation* - Modulação por largura de pulso) com período ajustável;
- Guardar os dados de ajustes na memória EEPROM para persistência em caso de desligamento;

As funcionalidades do software foram integradas em uma classe feita em c++ chamada *controleProcesso* que aglutina as rotinas e facilita a manutenção do código bem como o uso por outros pesquisadores já que a complexidade é abstraída. A classe de c++ obedece aos padrões do guia de estilo para bibliotecas do Arduino em termos de modularidade e simplicidade. Com os padrões da companhia atendido, a biblioteca foi submetida ao repositório oficial de bibliotecas que pode ser acessado pela IDE (ATZINGEN, 2016a).

4.2.2 UNIDADE MESTRE

A unidade mestre é responsável por receber e enviar os comandos para a unidade escrava, realizar os cálculos da simulação para o perfil de temperatura do forno e do alimento, receber e interpretar os comandos do usuário e armazenar as informações no banco de dados e realizar o controle PID enviando constantemente a unidade escrava as mensagens para realização de ajustes a serem aplicados durante o processo de aquecimento.

4.2.2.1 Hardware

A unidade mestre é composta por um Raspberry Pi, um *bluetooth* HC-06 e uma tela LCD *touch* de 5 polegadas (Figura 13). A unidade central utilizada foi um Raspberry Pi modelo 3, com processador quadri-core funcionando a 1.2GHz, 1 Gb de memória RAM, Wifi embutido e 16 Gb de memória persistente em um cartão micro-SD classe 10 para armazenar o sistema operacional (Linux Debian Jessie com kernel 4.4) e o banco de dados.

O *bluetooth* HC-06 foi conectado diretamente aos GPIO's 14 e 15 do SBC, que possuem a funcionalidade de comunicação serial UART. O console serial foi desabilitado para evitar o conflito do uso da UART pelo *kernel*. O *display* capacitivo de 5 polegadas é conectado ao HDMI e diretamente aos GPIO's para acesso às funcionalidades *touchscreen*, dando controle total ao software diretamente pela tela.

4.2.2.2 Software

Todas as funcionalidades pela qual a unidade mestre é responsável (Seção em 4.2.2) são controladas pelo software de controle, cuja estrutura em árvore das pastas com arquivos de banco de dados, código fonte, imagens e outros podem ser visualizados na Figura 16.

Figura 16 – Estrutura em árvore da pasta contendo o software de controle.

Fonte: Própria autoria.

Na interface gráfica, que é a parte central do software mestre de controle, o usuário tem acesso a todas as informações sobre o forno, pode fazer o controle manual ou automático (Seção 5.4.5), acessar, visualizar e exportar os dados dos experimentos (Seção 4.2.2.2.1).

A interface gráfica foi desenvolvida utilizando o conjunto de bibliotecas QT 4.1, que é um *framework* de plataforma cruzada para c++ que possui um *wrapper* para Python, o PyQt4. Todo o *layout* da interface foi feito utilizando a ferramenta QtDesigner e convertido para a linguagem Python, versão 2.7.12, utilizando a ferramenta pyuic4.

Todo o código fonte da interface gráfica está na pasta *source* (Figura 16), separado em *scripts* de acordo com a funcionalidade, sendo que cada *script* agrega classes e/ou funções com propósitos afins.

As classes e funções foram projetadas para serem modulares e possuírem flexibilidade, de modo que partes deste projeto possam ser reutilizados ou aproveitados de alguma forma para controle de outro tipo de automação industrial ou fornos de outro tipo e formato.

A interface gráfica pode ser visualizada de duas formas: pelo *display* LCD diretamente conectado ao Raspberry Pi ou por um computador utilizando o acesso remoto via VNC (Virtual Network Computing - Rede virtual de computadores). Devido a diferença de resolução na tela (800x480 no LCD contra 1080 pelo VNC), duas GUI's diferentes são apresentadas de acordo com o tipo do acesso. As informações sobre os *layouts* montadas no QtDesigner estão na pasta GUI da Figura 16.

Para acesso por dispositivos móveis uma interface mais simples apenas com os controles principais é disponibilizada na forma de um aplicativo web, feito utilizando o *framework* Flask para Python e toda a estrutura web está na pasta *remote-forno*, que pode ser acessado pela porta 5001 do Raspberry Pi com segurança TLS (Transport Layer Security) e *login* com senha.

4.2.2.2.1 Persistência de dados

Para persistência de dados, foi escolhido um banco de dados SQL (*Structured Query Language* - Linguagem de Consulta Estruturada), utilizando o *software* *sqlite3*, que possui uma biblioteca de interface nativa para Python. Foi escolhido o *SQLite* como gerenciado de banco de dados devido a facilidade de uso e migração e porque não existe concorrência de acessos já que o forno é controlado apenas por um usuário por vez.

O arquivo com todo o banco de dados está na pasta *bancoDados* mostrado na Figura 16, com o nome *forno-data.db* e as configurações de uso no arquivo *cfg.p*. As

funções e classes que manipulam o banco de dados, para fazer consultas e inserções estão na pasta *banco* e separadas em arquivos de acordo com a afinidade.

4.3 CONTROLE DO PROCESSO

Para realizar o controle do processo, mantendo a temperatura no valor desejado numa posição do forno ou do alimento, foi desenvolvido um algoritmo de controle PID que foi integrado ao software de controle.

4.3.1 SOFTWARE CONTROLE PID

A classe *PID*, que foi desenvolvida utilizando a linguagem Python2.7, realiza o controle PID do forno, sendo usada pelo programa principal (que possui a interface gráfica com o usuário). O código da classe está disponível no Apêndice A.2.

4.3.2 RESPOSTA NO TEMPO

Para encontrar os melhores parâmetros do controle PID (K_p , K_i e K_d), foram feitos testes em malha aberta no forno para verificar a resposta da temperatura em função do tempo.

Foram realizados testes de subida e descida da temperatura no forno. Iniciando com temperatura ambiente, as resistências eram ligadas e mantidas no mesmo estado até a temperatura estabilizar e então desligadas e aguardando-se a queda até a temperatura ambiente. Estes testes em malha aberta foram realizados mantendo todas as resistências com a mesma potência, sendo que foram testados os valores de 25%, 50%, 75% e 100%, todos em triplicata.

Também foram realizados testes de malha aberta como o descrito acima porém ligando algumas resistências e deixando outras desligadas. As esteiras ligadas tiveram potência fixa de 100% e as configurações escolhidas para o teste foram:

- Todas as superiores ligadas, todas as inferiores desligadas;

- Todas as superiores desligadas, todas as inferiores ligadas;
- as resistências centrais ligadas (inferior e superior) e as outras desligadas;
- as resistências laterais ligadas (inferior e superior) as centrais desligadas;

Com o perfil da resposta no tempo, este foi comparado com modelos de resposta impulsiva de primeira e segunda ordem e o método do gradiente descendente foi empregado para encontrar a melhor correlação entre os dados e os coeficientes do modelo.

4.3.3 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE

Utilizando um modelo de Equação Diferencial de segunda ordem para a resposta da temperatura no tempo (tanto da temperatura da esteira quanto da temperatura do ar dentro da esteira), as constantes da EDO de segunda ordem foram encontradas para corresponder aos resultados dos experimentos de malha aberta. Estes parâmetros foram encontrados pelo método do gradiente descendente utilizando o pacote de computação científica *scipy optimize* (SCIPY, 2017)

Os valores iniciais de K_p , K_i e K_d foram encontrados utilizando o método de Cohen-Coon (TEMEL SEMIH YAGLI, 2013) baseado nos resultados dos experimentos de malha aberta. Com estes valores iniciais, foi aplicado um algoritmo de gradiente descendente que procura minimizar tempo para o controle atingir o *setpoint* e estabilizar, encontrando os parâmetros ótimos de K_p , K_i e K_d . Estes parâmetros foram então testados em experimentos reais no forno para verificar a sua eficiência.

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações do perfil de temperatura (tanto do forno como do alimento) foram realizadas utilizando o método das diferenças finitas, implementado inicialmente em Python 2.7. As rotinas computacionalmente mais intensas foram então convertidas para subrotinas de fortran90, resultando em uma API criada com o auxílio da ferra-

menta *f2py* (F2PY, 2007), que compila as rotinas de fortran utilizando o compilador gfortran4.91 e cria um módulo que pode ser chamado diretamente pelo programa principal em Python.

4.4.1 PERFIL TÉRMICO DO FORNO

A simulação do perfil térmico do forno foi realizada para se conhecer a temperatura em função da profundidade no forno. Esta relação da temperatura em função da profundidade é utilizada na simulação da temperatura do alimento e no controle PID. As simulações numéricas foram feitas assumindo que a temperatura no interior do forno é regida pela Equação 2.9, e assumindo as seguintes simplificações:

- Modelo unidimensional, desconsiderando a altura e a largura do forno e levando em conta apenas a profundidade do mesmo;
- Não há convecção forçada;
- O regime permanente é atingido rapidamente em comparação com as grandezas de tempo envolvidas nos processos de assamento;
- O calor no sistema é adicionado apenas pelas resistências (das quais é conhecida a potência dissipada - Figura 10b);
- O forno é considerado um isolante térmico exceto pelas áreas abertas na entrada e saída, onde troca calor com o ambiente;
- A temperatura é conhecida na posição dos três sensores laterais (Figura 12) e à 0,5 metros da entrada e da saída do forno, onde existe equilíbrio térmico com a temperatura ambiente;

Assumindo o estado estacionário, em que $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, a Equação governante passa a ser a Equação 2.11, que pode ser resolvida por diferenças finitas, separando-a em um conjunto de equações algébricas descrito pela Equação 2.15, com k variando de 1 a n .

Este conjunto de equações foi resolvido utilizando o método SOR, com a constante w (Equação 2.18) escolhida utilizando a relação de otimização descrita em Young

(1971)

O valor de n (número de elementos $k = 0 \dots n$ na Equação 2.18) foi determinado por uma análise de sensibilidade de malha, variando este valor até que a diferença na simulação não fosse significativa. O número de iterações do método também foi descoberto por análise de sensibilidade de malha.

Para validação da simulação, os resultados de temperatura da mesma foram comparados com valores da temperatura de um outro termopar móvel colocado nas posições 0.2m, 0.725m, 1.275m e 1.8m de profundidade no forno.

4.4.2 PERFIL TÉRMICO DO ALIMENTO

A simulação do perfil térmico do alimento foi realizada para se conhecer a temperatura dentro do alimento em função do tempo, com o intuito de ajudar no controle do processo de forneamento em tempo real.

Para encontrar a temperatura em um instante de tempo t no regime não permanente, foi utilizando o método numérico das diferenças finitas FTCS para resolver a Equação 2.10 (Seção 2.3.3.2). O modelo do alimento contém as seguintes simplificações:

- O formato do alimento é cilíndrico (disco), com raio $>$ altura;
- A temperatura inicial do alimento (ao iniciar o processo de forneamento) é a temperatura ambiente;
- Em coordenadas cilíndricas (Figura 17), existe simetria em relação à coordenada ϕ e, portanto, a temperatura é dada em função apenas do tempo, e das coordenadas r (raio) e z (altura);
- A massa do alimento é homogênea;
- O calor específico do alimento é dependente da temperatura;
- O valor do coeficiente de condutividade térmica é dependente da temperatura;
- O volume do alimento depende da temperatura, com alteração apenas na altura do cilindro;

- O alimento troca calor com o ambiente pelas faces superior, lateral e inferior;
 - Na face inferior, o alimento troca calor com a bandeja por contato, assumindo que a temperatura na bandeja é a temperatura da esteira e portanto uma condição de contorno de Dirichlet;
 - Nas laterais e face superior, o alimento troca calor por radiação e convecção com o meio (ar dentro da esteira);

Figura 17 – Eixo de coordenadas para o modelo da temperatura no alimento.

Fonte: Própria autoria.

5 RESULTADOS

5.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Nesta Seção são apresentados os resultados das simulações que foram realizadas para se conhecer a temperatura ao longo da profundidade do forno (Seção 5.1.1) e dentro do alimento (Seção 5.1.2).

5.1.1 TEMPERATURA NO FORNO

O Algoritmo para realizar a simulação descrita na Seção 4.4.1, que calcula o perfil térmico do forno em função dos sensores de temperatura e da potência das resistências, feito em Python-2.7.12 e Fortran-90 é apresentado por completo nos Anexos A.3.1 e A.3.2 e a rotina principal que executa o método numérico é mostrado abaixo.

```

1 for i in range(num_iteracoes):
2     for k in range(1,n):
3         T_temp = (T[k-1] + T[k+1]) /2.0 + (dx**2)*fonte[k]* potencia
4         T[k] = T[k] +n_sor *( T_temp - T[k] )

```

A Figura 18a mostra o resultado da análise de sensibilidade de malha, cujo algoritmo (que se encontra no Anexo A.3.3) foi utilizada para encontrar o número mínimo de elementos discretos n que podem ser utilizados sem comprometer o resultado devido ao tamanho da malha. Para isto, o algoritmo (Apêndice A.3.2) foi chamado com valores de n de 2 a 500 e calculada a diferença entre o resultado em função de n .

Com o resultado mostrado na Figura 18a, foi escolhido um valor de $n = 50$ para as simulações por não existir variação significativa na simulação para valores de n acima deste número. O valor ótimo para w , da Equação 2.18, foi calculado utilizando a relação $w \approx \frac{2}{1+\frac{\pi}{n}}$, de Young (1971), com $n = 50$, o que resultou em um valor de $w = 1.8818$, que foi utilizado nas simulações.

O resultado da convergência do algoritmo (utilizando o valor ótimo de w e $n = 50$), pode ser visto na Figura 18b na qual a norma da diferença entre o perfil de temperatura na iteração T_{i-1} e T_i é mostrado em função do número de iterações i . Com este resultado foi escolhido um número de iterações $i = 30$, como um valor suficiente para a convergência do método sem comprometer a eficiência do *software* de controle.

Figura 18 – Experimento para determinação do número de elementos n e número de iterações i a ser escolhido para o algoritmo de simulação da temperatura do forno.

Fonte: Própria autoria.

O algoritmo com os parâmetros acima descritos foi implementado no software de controle, com uma rotina em Fortran que é chamada diretamente pelo programa principal em Python. A Tabela 2 mostra o tempo de execução do algoritmo nas duas linguagens, sendo executados no Raspberry Pi 3.

A conversão do algoritmo para um módulo em Fortran acelerou a resolução numérica em aproximadamente 6 vezes, sendo que o tempo de execução (0.21 segundos) consegue retornar o cálculo da simulação ao controle PID (que chama esta rotina e re-

Tabela 2 – Tempo para execução do algoritmo. Média de 10 repetições.

Linguagem	Tempo (segundos)	Desvio padrão
Fortran	0.22	0.012
Python	1.34	0.15

cebe seu retorno) sem atraso, já que a rotina de leitura da temperatura ocorre a cada 5 segundos, quando uma nova leitura de temperatura é recebida do microcontrolador.

A execução do módulo desta simulação é chamada em um processo diferente do programa principal, possibilitando que este continue executando enquanto a simulação ocorre em paralelo, sem atraso ao programa principal, uma vez que a SBC que foi utilizada (Raspberry pi 3) possui 4 núcleos.

Para visualizar o resultado da simulação, o perfil calculado da temperatura em função da posição (Figura 19a) é convertido em um gráfico com mapa de cores (Figura 19b). Visando uma melhor experiência do usuário, a Figura 19b também é apresentado no *software* de interface com o usuário como uma composição com a imagem do forno obtida pela câmera (Figura 20), usando uma transformada afim na imagem com a ajuda da biblioteca openCV (OPENCV, 2016).

Figura 19 – Resultado da simulação da temperatura do forno em função da profundidade. Condições do experimento: $R1 = 80\%$, $R2 = 50\%$, $R3 = 10\%$ mantidas por 15 minutos. Leitura dos sensores em $t = 15$ minutos: $T_a = 27.1$, $T1 = 180.2$, $T2 = 170.8$, $T3 = 155.0$.

(a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em função da profundidade do forno em metros. (b) Visualização da Figura 19a em escala de cores *jet*.

Fonte: Própria autoria.

Figura 20 – Resultado da simulação adicionada a imagem do forno na interface de controle.

Fonte: Própria autoria.

O resultado da simulação apresentada na Figura 19a foi obtido utilizando os

valores dos sensores após 15 minutos que as resistências R1, R2, e R3 permaneceram ligadas com potência de 80%, 50% e 10% respectivamente e as resistências inferiores (R4, R5 e R6) ligadas com 70% da potência total (3600 W). Para verificar o resultado da simulação, outro sensor termopar foi inserido nas posições 0.2m, 0.725m, 1.275m, 1.8m de profundidade e os resultados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre predição da simulação e valor lido pelo sensor.

Posição metros	Temperatura Sensor °C	Temperatura Simulação °C
0,2	146.1	144.6
0,725	190.0	186.5
1,275	168.4	165.0
1,8	124.5	126.1

O resultado da simulação apresentou valores similares aos da leitura dos sensores (Tabela 3), mostrando que a simulação realizada foi útil para prever a temperatura em um ponto distante dos sensores. A informação da temperatura na profundidade em que o alimento se encontra é útil para alimentar as informações do controle PID e também é necessária para a simulação do perfil térmico do alimento.

É importante notar que por ser um forno em escala piloto, o alimento está sempre a pelo menos 0.35 metros de um sensor, tornando os resultados da simulação próximos a uma extrapolação de um perfil linear entre os pontos conhecidos. No entanto, para um forno industrial, que possui tipicamente 15 metros de comprimento, a simulação se torna crucial para evitar o uso de um número elevado de sensores no forno.

5.1.2 TEMPERATURA NO ALIMENTO

Para o cálculo da temperatura no alimento foi utilizado o método FTCS com as condições de contorno e simplificações assumidas na Seção 4.4.2. A Equação 2.10 foi convertida em coordenadas cilíndricas, considerando $\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$ e aplicada a discretização descrita pelas equações 2.13 e 2.14. Isto leva à Equação 5.1 como descrito na Seção

2.3.3.2 no desenvolvimento para a Equação 2.19.

$$\frac{T_{i,j}^n - T_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} = \alpha \cdot \left(\frac{T_{i+1,j}^{n-1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n-1} + T_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{n-1} - T_{i,j}^{n-1}}{\Delta r} + \frac{T_{i,j+1}^{n-1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n-1} + T_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta z^2} \right) \quad (5.1)$$

Sendo $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, e i e j os índices dos elementos discretos nas coordenadas r e z , Δr e Δz o tamanho destes elementos e n o índice dos elementos discretos no tempo. Como o método FTCS segue o *stencil* da Figura 5, podemos isolar $T_{i,j}^{n+1}$ e calculá-lo em função do instante anterior $n - 1$, o que significa rearranjar a Equação 5.1 no formato abaixo.

$$T_{i,j}^n = T_{i,j}^{n-1} + \Delta t \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T_{i+1,j}^{n-1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n-1} + T_{i-1,j}^{n-1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{n-1} - T_{i,j}^{n-1}}{\Delta r} + \frac{T_{i,j+1}^{n-1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n-1} + T_{i,j-1}^{n-1}}{\Delta z^2} \right) \quad (5.2)$$

Devido a estabilidade condicional do método, a escolha do tempo Δt deve ser relacionada aos parâmetros α , Δr e Δz pela Inequação 5.3, descrita por Kreith, Manglik e Bohn (2012), para coordenadas cartesianas em duas dimensões.

$$\alpha \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} + \alpha \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} + \alpha \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} < \frac{1}{2}. \quad (5.3)$$

Considerando a transformação para coordenadas cilíndricas e da Equação 5.2, temos a Equação 5.4.

$$\alpha \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} + \alpha \frac{\Delta t}{(\Delta r)^2} + \alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta r} < \frac{1}{2}. \quad (5.4)$$

Para resolver a Equação 5.2, um algoritmo foi desenvolvido em Python2.7 (Anexo A.4.1) com a rotina computacionalmente mais custosa convertida para Fortran-90 (Anexo A.4.2) como um módulo que pode ser chamado pelo programa principal. A parte principal do algoritmo é apresentada abaixo.

```

1
2 T[0,:] = T_esteira
3 for n in range(nt):

```

```

4   Tn = T.copy()      # Cria uma nova matriz para não alterar a inicial no
processo
5   T[1:-1,1:-1] = Tn[1:-1,1:-1] + alpha * ( \
6       (dt/dh**2) * (Tn[2:,1:-1] - 2*Tn[1:-1,1:-1] + Tn[:-2,1:-1]) +\
7       (dt/dr**2) * (Tn[1:-1,2:] - 2*Tn[1:-1,1:-1] + Tn[1:-1,:-2]) +\
8       (dt/(dr*r_cilindrico)) * (Tn[2:,1:-1] - Tn[1:-1,1:-1]) )
9   ##### Condições de contorno:
10  # Direichilet e Mista
11  # Radiação + convercção
12  T[:, -1] = T[:, -2] + dt*(epsilon*sigma*( (T_paredes**4) - (T[:, -1]**4) ) +
h_convec*(T_ar - T[:, -1]))
13  T[-1, :] = T[-2, :] + dt*(epsilon*sigma*( (T_paredes**4) - (T[-1, :]**4) ) +
h_convec*(T_ar - T[-1, :]))
14  # simetria em r=0:
15  T[:, 0] = T[:, 1]

```

Os valores de Δz e Δr foram escolhidos por análise de sensibilidade de malha, variando o número de elementos na malha no eixo r entre 2 e 200, com o número de elementos no eixo z dependente de r pela Equação 5.5

$$N_z = N_r \cdot \frac{H}{R} \quad (5.5)$$

Em que H é a altura do alimento, R o raio do mesmo e N_z e N_r são os números de elementos da malha dos eixos z e r respectivamente. Para o valor de Δt foi escolhido o valor de $\frac{1}{8}$ no lado direito da inequação 5.4 para garantir a estabilidade.

O parâmetro N_z da Equação 5.5 foi utilizado para realizar uma análise de sensibilidade de malha cujo resultado é apresentado na Figura 21. Foi escolhido um valor de $N_r = 30$, visto que a diferença na simulação é muito pequena para valores maiores. Pela interface de controle (Seção 5.4.5.3), o usuário poderá inserir e/ou escolher o tipo de alimento que será utilizado, fornecendo as informações sobre as propriedades físicas do mesmo. Para os testes da simulação, dois alimentos tipicamente utilizados em fornos tipo esteira foram escolhidos, o biscoito e o cookie, cujas propriedades relevantes para a simulação foram retiradas da literatura (HAYAKAWA; HWANG, 1981; SAKIN; KAYMAK-ERTEKIN; ILICALI, 2007; KULACKI; KENNEDY, 1978; BAIK et al., 1999; CAMPINAS, 2011) e se encontram na Tabela 4. Ao inserir um novo alimento, os valores da Tabela 4 são informados pelo usuário na interface gráfica e os valores são salvos no banco de dados do sistema de controle e são acessíveis em futuros experimentos.

Figura 21 – Análise de sensibilidade de malha em função do número de elementos no eixo r N_r

Fonte: Própria autoria.

O algoritmo foi testado utilizando as propriedades e dimensões do *cookie* da Tabela 4, em uma simulação de assamento mantendo a temperatura da esteira e parede interna do forno em 207 °C e o ambiente em 27 °C e tempo variando de 0 à 30 minutos. Para validar o algoritmo, o resultado desta simulação foi comparado ao resultado obtido pelo *software* Comsol5.0 (COMSOL, 2005), com as mesmas condições de temperatura, propriedades do alimento e geometria, com malha triangular fina. Os resultados comparando as simulações estão apresentados na Figura 22, que mostra a temperatura no centro do alimento em função do tempo até o fim do processo.

Tabela 4 – Propriedades físicas dos alimentos de teste, cookie e cupcake.

Sigla	Informação	Unidade	Cookie	cupcake
r	raio do alimento	cm	5	4
h	altura do alimento (inicial e final)	cm	1.5 - 2.5	1.5 - 4
k	condutividade térmica temperatura ambiente	$\frac{W}{mK}$	0.295	0.1064
k	condutividade térmica temperatura final	$\frac{W}{mK}$	0.414	0.2064
ρ	densidade tempera- tura ambiente	$\frac{Kg}{m^3}$	705	629
ρ	densidade tempera- tura final	$\frac{Kg}{m^3}$	466	236
h_{conv}	coeficiente de convec- ção	$\frac{W}{m^2K}$	5	4
c_p	Calor específico tem- peratura ambiente	$\frac{J}{KgK}$	2420	2516
c_p	Calor específico tem- peratura final	$\frac{J}{KgK}$	3182	2658
e	emisividade corpo ne- gro	1	0.95	0.92
T_c	temperatura final centro	$^{\circ}C$	200	190
T_s	temperatura final superfície	$^{\circ}C$	210	195

Na Figura 23 temos a mesma simulação descrita anteriormente, visualizada como um corte no plano yz passando pelo centro do alimento no instante de tempo $t = 1.000$ segundos.

Figura 22 – Temperatura no centro do alimento e no meio da superfície superior em função da temperatura para os dois softwares, Python/Fortran, e Comsol.

Fonte: Própria autoria.

Com os resultados apresentados nas Figuras 22 e 23, observamos uma concordância entre as simulações. O uso de um software de simulação como o Comsol traz facilidades como a interface gráfica, possibilidade de importar formas geométricas feitas em outros softwares e a abstração completa do método numérico utilizado. No entanto, o uso de um *software* de alto nível requer muito mais processamento e memória, o que dificulta o uso em sistemas embarcados como o Raspberry Pi. Além disso, por ser um software fechado, existem limitações no uso do mesmo como uma API que possa ser chamada por outro programa para simulação e coleta de resultados de forma flexível.

Para realizar experimentos com outros alimentos ou outras formulações, o usuário

Figura 23 – Comparação da simulação da temperatura no alimento em um corte central no eixo xy , utilizando o algoritmo desenvolvido em Python/Fortran e o *software* Comsol.

(a) Python/Fortran

(b) Comsol5.0

Fonte: Própria autoria.

deverá fornecer os valores da Tabela 4, que podem ser obtidos na literatura (quando houver), experimentalmente ou pelo cálculo centesimal (CAMPINAS, 2011). Futuros experimentos poderão ser feitos para comparar a temperatura simulada com a real com o intuito de validar o modelo de simulação.

5.2 CONTROLE DO PID

5.2.1 CONTROLE POR MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO (PWM)

O controle da potência das resistências foi feito com um PWM, que envia um sinal modulado (ligado/desligado) e a razão entre o período ligado e desligado implicará na potência dissipada pela resistência. Este modo de controle foi escolhido para não haver necessidade de alterações no sistema de aquecimento já que o PWM foi implementado via *software*.

Os sistemas PWM geralmente utilizam uma chave de estado sólido como um transistor bipolar ou MOSFET, porém devido alta corrente que passa por cada resistor (aproximadamente 16.5 amperes), o forno utiliza um relê mecânico já que um de estado sólido seria consideravelmente mais caro.

A limitação do uso de um relê mecânico é o período mínimo do PWM que pode ser utilizado, já que a vida útil de um relê está ligada ao número de chaveamentos efetuados. Esta limitação, junto com o tempo que o chaveamento demora para ocorrer limitam severamente o período mínimo do PWM, que no software foi estabelecido com um limite inferior de 5 segundos.

O Arduino possui uma função nativa de controle PWM chamada *analogWrite* (pino, valor), que produz um sinal PWM com período de 0.00204 segundos (490Hz) utilizando o Timer0 do Atmega328p. Apesar da possibilidade de se alterar o período da função *analogWrite*, não é aconselhável utilizar um valor tão alto de período como da ordem de segundos devido ao sobrecarregamento do Timer do microcontrolador, que também é utilizado para outras funções e por isso um método de controle de PWM foi desenvolvido e adicionado a biblioteca *controleProcesso*.

```
1 controleProcesso forno; // cria um objeto da classe controleProcesso
2 forno.setPeriodoPwm(15); // escolhe o tempo do pwm (em segundos)
3 forno.resistencia[0].potencia = 75; // 75\% de potencia na resistencia 1
4 forno.resistencia[0].pwmLigado = true; // Ativa o pwm na resistencia 1
```

Nas linhas de código acima, temos um exemplo do uso da biblioteca *controleProcesso*, no qual na linha 1 é instanciado um objeto da classe mãe na biblioteca, na

linha 2 o período do PWM é escolhido (em segundos), na linha 3 o valor da potência (em % com valores inteiros de 0 a 100) é passado e na linha 4 o controle é iniciado. Com este exemplo é possível ver as facilidades e flexibilidade de utilizar a biblioteca, ao invés do usuário ter que alterar manualmente o código fonte.

A Figura 24, mostra a temperatura do sensor da esteira e do centro do forno nos testes do PWM, iniciando com a temperatura ambiente e mantendo as potências de 90%, 75%, 50% e 25% (Figura 24d, 24c, 24b e 24a respectivamente).

Figura 24 – Teste do aquecimento com potência parcial, iniciando à temperatura ambiente.

Fonte: Própria autoria.

5.2.2 MODELO DA RESPOSTA POTÊNCIA-TEMPO-TEMPERATURA DO FORNO

5.2.2.1 Controles e zonas de aquecimento

O forno foi inicialmente concebido para possuir três zonas de aquecimento, porém devido a falta de exaustores e fluxo de ar forçado que são comuns em muitos fornos industriais deste tipo, os experimentos (Figura 25a e 25b) mostraram que não é possível manter três zonas de temperatura completamente independentes devido a transferência de calor que ocorre no forno.

Figura 25 – Teste das resistências, várias configurações de potência das resistências

Fonte: Própria autoria.

Devido a esta dificuldade de manter zonas de temperatura separadas, foi escolhido

utilizar um controle com um perfil de temperatura que varia em função do tempo e não da profundidade no forno, já que nos experimentos os testes com potências iguais mostraram que não há variação significativa da temperatura com a profundidade (Figura 25c e 25d).

Como discutido nas subseções 4.4.2 e 4.4.2, as temperaturas a serem controladas (objetivo) são a da esteira e do ar próximo ao alimento, que influenciam no processo de aquecimento do mesmo. Foram utilizados dois controles distintos atuando em conjunto. Como mostrado na Figura 26, o controlador 1 é o responsável por manter a temperatura no ar próximo ao alimento no valor desejado, utilizando a como informação a temperatura atual no ar (resultado da simulação numérica da temperatura no forno) controlando as resistências superiores. O controlador 2 é responsável por manter a temperatura da esteira, utilizando como informação o sensor da esteira.

Como a temperatura na esteira é afetada tanto pelas resistências inferiores como superiores, o estado das resistências superiores é utilizado pelo controlador 2 para calcular a potência das resistências inferiores (Equação 5.6) de forma que potência total necessária para se atingir a temperatura da esteira seja obtida.

$$u_2(t) = u_{2-parcial} - u_1(t) \quad (5.6)$$

Sendo $u_2(t)$ é a saída do controlador 2 que comandará a potência das resistências inferiores e $u_{2-parcial}$ a saída parcial calculada pelo segundo controlador 28. Este valor é o necessário para atingir a temperatura da esteira, porém a saída real para as esteiras inferiores é recalculada em função da potência nas resistências superiores $u_1(t)$, que foi ajustada pelo controlador 1.

Figura 26 – Diagrama do processo de controle da temperatura no forno.

Fonte: Própria autoria.

5.2.2.2 Determinação do modelo de resposta no tempo

Os testes em malha aberta, descritos na seção 4.3.2 são apresentados na Figura 28, mostrando a temperatura no centro do forno e na esteira. Com os dados da resposta

térmica do forno em malha aberta, foi testado um modelo de equação diferencial de segunda ordem para a temperatura, mostrado na Equação 5.8.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\rho}{m} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x - \frac{F(t)}{m} = 0 \quad (5.7)$$

$$\frac{d^2T}{dt^2} + A \frac{dT}{dt} + B \cdot T + C \cdot P = 0 \quad (5.8)$$

Figura 27 – Experimento de malha aberta, 50 minutos potência máxima, 50 minutos desligado.

Fonte: Própria autoria.

Para dar um sentido físico a equação, podemos compará-la ao sistema massa-mola amortecido forçado, que possui um formato similar (Equação 5.7) e pode ser tido como referência de modelo de segunda ordem.

Correlacionando a Equação 5.8 com a 5.7, notamos que o termo A está ligado com a "inércia" do sistema (quanto maior este valor maior o tempo para se atingir a

Figura 28 – Experimento de malha aberta. Ligado 50 minutos, desligado 50 minutos.

Fonte: Própria autoria.

temperatura final), B a "elasticidade" do sistema e C a uma força externa, que para o modelo do forno é diretamente proporcional a Potência P (em % de 0 a 100) das resistências.

Utilizando a Equação 5.8, foi construído uma função em Python2.7 (Seção A.2.2) para resolvê-la numericamente, separando-a em duas equações de primeira ordem e aplicando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem através da biblioteca *scipy* para Python.

Esta função tem como entrada o período de evolução temporal que será calculado, o valor do elemento de tempo discreto dt , o valor da potência das resistências em função do tempo (um vetor com $\frac{t}{dt}$ elementos) e os coeficientes A , B e C .

```
T_sim = evolui_tempo(t_final=20*60, dt=0.01, A=10, B=15, C=200)
```

No exemplo anterior, a função é chamada e retorna uma simulação de 20 minutos (20×60) que será calculada com passo de 0.01 segundos e as constantes da Equação 5.8 a ser resolvidas também são passadas como parâmetro à função, que retorna um vetor com tamanho 120.001 ($1 + 20 \times 60 / 0.01$) correspondente a temperatura no tempo com as condições fornecidas.

Com os resultados dos experimentos de malha aberta (Figura 28) e a função *evolui_tempo*, foi aplicado o algoritmo do gradiente descendente (utilizando o método *optimize* da biblioteca *scipy*) para encontrar os parâmetros A , B e C que minimizem a diferença entre a temperatura experimental e o resultado da função *evolui_tempo*, encontrando assim as constantes que definem a Equação 5.8, apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Experimentos de malha aberta e simulação da evolução temporal. Temperatura da esteira e do ar no centro do forno.

- (a) Resistências ligadas na potência máxima, (b) 75 % de potência com início em temperatura ambiente até 50 minutos. Resistências desligadas de 50 à 100 minutos.

- (c) Início em potência máxima com temperatura estabilizada, todas as resistências desligadas em $t = 0$. (d) 50 % de potência, início em temperatura ambiente.

Fonte: Própria autoria.

Os resultados dos parâmetros A , B e C encontrados pelo método do gradiente descendente estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado das constantes da Equação 5.8 que melhor representa os dados experimentais.

Constantes	A	B	C
Ar	$8.531 \cdot 10^{-3}$	$1.806 \cdot 10^{-5}$	$6.37 \cdot 10^{-5}$
Esteira	$7.508 \cdot 10^{-3}$	$1.406 \cdot 10^{-5}$	$4.511 \cdot 10^{-5}$

5.2.3 AJUSTES DO CONTROLADOR

Utilizando o modelo matemático encontrado na Seção 5.2.2, foram realizados os procedimentos para determinação dos parâmetros ótimos do controlador e então testes reais no forno para verificar a eficiência do mesmo.

5.2.3.1 Determinação dos parâmetros do controlador

Utilizando a EDO 5.8 com os parâmetros da Tabela 5, esta equação foi utilizada para simular a evolução temporal da temperatura do forno (ar e esteira), sob o controle PID. Foi desenvolvida uma função em Python, *simulacaocontrole*(Kp , Ki , Kd , $t0$, tf , *setpoint*), disponível no Anexo A.2.2, para realizar esta evolução temporal com o controle PID em função dos parâmetros k_p , k_i e k_d . Para testar a eficiência do controle, a simulação foi testada em um perfil térmico iniciando a temperatura ambiente e realizando os seguintes *setpoints*:

- *Setpoint* 300 °C: 0 - 50 minutos;
- *Setpoint* 120 °C: 50 - 100 minutos;
- *Setpoint* 250 °C: 100 - 150 minutos;
- *Setpoint* 180 °C: 150 - 200 minutos;

Para encontrar os melhores valores para os parâmetros k_p , k_i e k_d , foi criado uma função que realiza o perfil térmico descrito acima utilizando o a função *simulacaocontrole* e retornando a somatória da diferença entre o objetivo e a temperatura simulada.

Minimizar a resultado desta função significa encontrar os melhores valores para os parâmetros k_p , k_i e k_d e portanto foi utilizado o método do gradiente descendente através da função *optimize.minimize* da biblioteca *scipy* (SCIPY, 2017), buscando minimizar a diferença entre a simulação e o *setpoint* ao longo do tempo.

A função *optimize.minimize* requer valor inicial para os parâmetros a serem encontrados pelo gradiente descendente, e estes foram encontrados pelo método de Cohen-Coon (TEMEL SEMIH YAGLI, 2013), utilizando os valores do ganho, tempo morto e τ encontrados graficamente em uma simulação de malha aberta apresentada na Figura 30

Figura 30 – Teste de malha aberta para determinação inicial dos parâmetros k_p , k_i e k_d pelo método de Cohen-Coon.

(a) Malha aberta, potência 100% - Temperatura do ar no centro do forno (b) Malha aberta, potência 100% - Temperatura da esteira

Fonte: Própria autoria.

Com os valores da Figura 30, (do ganho, tempo morto e τ) foi calculado os parâmetros k_p , k_i e k_d utilizando a regra de Cohen-Coon (Equações 5.9, 5.10 e 5.11) e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

$$k_c = \frac{1.35}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.185 \right) \quad (5.9)$$

$$K_i = \left(2.5 t_d \frac{\tau + 0.185 t_d}{\tau + 0.611 t_d} \right)^{-1} \quad (5.10)$$

$$K_d = (0.37t_d \frac{\tau}{\tau + 0.185t_d})^{-1} \quad (5.11)$$

Tabela 6 – Resultado das constantes do controlador PID encontrado pelo método gráfico de Cohen-Coon.

Constantes	K_p	K_i	K_d
Ar	34.12	0.0064	0.041
Esteira	39.02	0.0067	0.044

Os valores da Tabela 6 foram utilizados como valor inicial no algoritmo do gradiente descendente, limitando a busca a duas ordens de grandeza acima e abaixo. O resultado da rotina *scipy.optimize.minimize* é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado dos parâmetros ótimos do controlador PID encontrados pelo gradiente descendente.

Constantes	K_p	K_i	K_d
Ar	28.95	0.0807	0.042
Esteira	33.9	0.0063	0.041

Na Figura 31a, uma simulação do controle com os parâmetros otimizados pelo GD (Gradiente Descendente) é apresentado em comparação com os valores obtidos pelo método de Cohen-Coon e por um controle ON/OFF. Pode-se notar que a rotina de otimização melhorou a resposta do sistema, diminuindo a oscilação sem prejudicar o tempo para atingir o *setpoint*. Na Figura 31b temos a mesma simulação com diferente escala, permitindo visualizar melhor a diferença entre os controladores.

Figura 31 – Simulação de malha aberta para determinação inicial dos parâmetros k_p , k_i e k_d pelo método de Cohen-Coon.

(a) Malha aberta, potência 100% - Temperatura do ar no centro do forno

(b) Malha aberta, potência 100% - Temperatura da esteira

Fonte: Própria autoria.

5.2.3.2 Resultados do controlador

Com os parâmetros do controlador encontrados, experimentos foram realizados para verificar o funcionamento do controle. O primeiro a ser realizado foi o mesmo da simulação utilizada para se encontrar os parâmetros (seção 5.2.3.1) do controlador, 280 °C de 0 à 20 minutos, 120 °C de 20 à 40 minutos, 160 °C de 40 à 60 minutos e 180 °C de 60 à 80 minutos, cujo resultado é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. *Setpoints*: 300 °C 0 - 50 minutos, 120 °C 50 - 100 minutos, 250 °C 100 - 150 minutos e 180 °C 150 - 200 minutos.

Fonte: Própria autoria.

A Figura 33 mostra o teste feito com os *setpoints* em 300 °C de 0 à 50 minutos, 120 °C de 50 à 100 minutos, 250 °C de 100 à 150 minutos e 180 °C de 150 à 200 minutos. Na Figura 34 foi mantida a potência máxima até os 25 minutos e depois ajustado para 180 °C.

Figura 33 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. *Setpoints*: 200 °C 0 - 50 minutos, 300 °C 50 - 100 minutos e 200 °C 100 - 150 minutos.

Fonte: Própria autoria.

Figura 34 – Experimento para verificação da eficiência do controlador PID. *Setpoints*: 220 °C 0 - 50 minutos, 180 °C 50 - 100 minutos e 150 °C 100 - 150 minutos.

Fonte: Própria autoria.

5.3 SISTEMA DE CONTROLE - ESCRAVO

5.3.1 PLACA DE CONTROLE

O esquema elétrico da Figura 11, que contém a instrumentação do forno e a unidade de controle com o Arduino foi convertido em um *layout* de PCB para a confecção da placa. Na Figura 35 temos as trilhas de cobre e a disposição dos componentes.

Figura 35 – *Layout* da placa com as trilhas e locais para colocar os componentes.

Fonte: Própria autoria.

Os componentes na placa de circuito estão separados em setores, de acordo com a função. No canto superior esquerdo temos controle das resistências, com os contatores e acopladores óticos. No canto inferior esquerdo temos a fonte e regulador de tensão. No canto inferior direito, temos outro regulador de tensão que alimenta a instrumentação do motor da esteira (centro inferior), visto que este motor pode gerar

ruído elétrico no circuito e portanto o mesmo possui uma alimentação separada.

Na lateral direita da placa está a instrumentação dos sensores termopar, no topo a conexão do bluetooth e finalmente no centro a unidade de controle com o Arduino utilizando um atmega328p-pu.

Antes da confecção da placa, o projeto passou por uma rotina de checagem de erros (ECR - *Error Check Rule*) e então o circuito foi feito na placa de cobre e os componentes montados. Nas Figuras 36 e 37 vemos a simulação do projeto e a placa já montada com os componentes soldados.

Figura 36 – Projeto da placa com componentes.

Fonte: Própria autoria.

Figura 37 – Placa de controle instalada no forno.

Fonte: Própria autoria.

5.3.2 SOFTWARE DE CONTROLE

O software que controla o Arduino e realiza as ações descritas na Seção 4.2.1.3 está disponível no repositório Atzingen (2016a) e condensa todas as funções e classes em uma biblioteca com nome *controleProcesso*.

Todas as funcionalidades do controle do forno foram embutidas na biblioteca, de acordo com o padrão de estilo, modularidade e simplicidade requisitado para incorporação da biblioteca no repositório oficial da IDE. Com os requisitos atingidos, a biblioteca foi aceita no repositório e pode ser obtida e instalada automaticamente pelo *software* como ilustra a Figura 38

Figura 38 – Biblioteca para a plataforma Arduino, disponível via gerenciador de pacotes da IDE.

Fonte: Própria autoria.

Com isto, quando a biblioteca for atualizada no repositório, automaticamente será liberada uma nova versão no software do Arduino que tiver a biblioteca instalada, facilitando as atualizações. A padronização do software em uma biblioteca também trouxe a vantagem de abstrair a maior parte da complexidade do usuário do programa, mas permitindo que muitas mudanças possam ser feitas caso experimentos de outro tipo sejam realizados neste forno ou mesmo como uma base para que outros sistemas de controle sejam feitos utilizando as classes da biblioteca, já que a mesma está disponível sobre licença MIT.

5.4 SISTEMA DE CONTROLE - MESTRE

O software de controle mestre é responsável pelo controle geral do sistema, realizando o comando do microcontrolador no forno, as simulações da temperatura do alimento e do forno, os cálculos do controle PID, e a interação com o usuário via *display* de 5 polegadas, tela de controle acesso VPN ou aplicação web para uso em celulares, tablets ou navegadores web. Nas Figuras 39 e 40, vemos os três tipos de

acesso: web, VPN e *display* Figura 39a, 40 e 39b.

Figura 39 – Formas de acessar a interface gráfica.

- (a) Interface web para acesso móvel (celulares e tablets) via ip do dispositivo.
- (b) Interface do display de 5 polegadas, conectado diretamente ao Raspberry pi.

Fonte: Própria autoria.

O *display* de 5 polegadas, que fica conectado em cima do Raspberry pi (Figura 39b), possui uma resolução de 800x480 *Pixels* e por esta razão a interface gráfica para ele foi desenvolvida com esta mesma resolução, de modo que ocupe a tela toda em modo *full screen*. Foi colocado um serviço no SO que inicia o programa junto com o sistema e as opções de uso do *desktop* (barra de tarefas, menu de inicialização entre outros) foram desabilitadas dando ao usuário o controle da interface sem a percepção de estar usando um aplicativo num sistema operacional (Debian Jessie).

O aplicativo web possui uma quantidade limitada de controles, possibilitando apenas o ajuste da conexão serial, os comandos manuais das resistências e esteira, leitura dos sensores e visualização da câmera. Este modo foi desenvolvido para acessos rápidos e uso simples do forno, já que pode ser utilizado por qualquer dispositivo que possua um navegador e acesso a internet. O controle total do software é via VPN, onde usuário tem controle do SO pelo desktop remoto e o programa pode ser utilizado com teclado e mouse (Figura 40).

5.4.1 CONTROLE MANUAL

Na aba *manual*, o usuário pode controlar as potências das resistências individualmente, controlar a velocidade da esteira e enviar comandos de texto manualmente para o forno (estes mesmos controles estão disponíveis no aplicativo web). Como muitos experimentos requerem alterar várias resistências simultaneamente, um *radiobutton* "Hold" foi colocado para que os dados não sejam enviados enquanto o mesmo está selecionado (Figura 40). Quando ele é desmarcado, todos os controles são enviados de uma vez, facilitando a realização de experimentos que necessitem de mudanças simultâneas.

Figura 40 – Interface de controle, tela de controle manual.

Fonte: Própria autoria.

5.4.2 CONFIGURAÇÕES

Na aba *Ajustes* estão a maior parte das opções de configuração do sistema, separados nos grupos *Serial*, *Gráfico*, *Microcontrolador*, *PID* e *Câmera* (Figura 41, sentido horário).

No grupo *Serial*, o usuário poderá escolher as opções de nome da porta serial e *Baudrate* da comunicação. O *software* detecta e lista as portas seriais disponíveis no SO, deixando selecionada por padrão a última opção do usuário quando esta existir.

No grupo *gráfico*, são escolhidos quais sensores serão visualizados (seção 5.4.4) bem como a taxa de atualização dos mesmos. No grupo *Câmera*, as opções de resolução e taxa de atualização são escolhidas, além de uma opção de salvar a imagem. Estas imagens são utilizadas para visualização do forno quando ele está sendo operado remotamente e também para utilização na montagem da simulação térmica (Figura 20).

No grupo *Microcontrolador*, as opções período do controle PWM e cálculo de média das leituras dos sensores é escolhida. Como estas opções são feitas no microcontrolador e não no software principal, o valor mostrado abaixo dos controles é alterado sempre que receber o estado do controle vindo do microcontrolador.

Figura 41 – Interface de controle, tela de ajustes.

Dado Recebido: SP321 | Dado Recebido: SP552 | Dado Recebido: SP280 | Dado Recebido: SP642 | Dado Recebido: SP450 | Dado Recebido: SP770 | Dado Recebido: SP770

Fonte: Própria autoria.

5.4.3 ARMAZENAMENTO DOS DADOS

O banco de dados possui 4 tabelas: *calibracao*, *configuracao*, *perfil* e *sensores*. As funções de interação com o banco de dados estão organizadas em arquivos de código fonte (*scripts*), todos dentro da pasta *source\banco* de códigos fonte do controle principal (Figura 16), sendo que nesta pasta, cada *script* é responsável pelo controle de uma das tabelas do banco de dados.

Na tabela *calibracao*, as calibrações linear dos termopares, relacionando tensão com temperatura podem ser adicionadas, apagadas ou acessadas. Pela interface gráfica (Figura 42), na aba *Dados*, o usuário pode selecionar, adicionar ou remover calibrações.

Na tabela *config* e no arquivo *cfg.p* ficam salvas as configurações de escolha do

usuário, como por exemplo, qual a ultima calibração escolhida, qual o perfil térmico do forno, tipo de alimento entre outros, de forma que as alterações feitas fiquem salvas e o controlador possa tirar proveito delas ao abrir novamente o controle, melhorando a experiência do usuário.

A tabela perfil salva os tipos de perfil térmico e alimentos que poderão ser utilizados (seção 5.4.5). Pela GUI também podem ser adicionados e removidos perfis térmicos e novos alimentos (Figura 42).

Figura 42 – Tela de controle dos dados da interface gráfica com as opções de seleção e exportar dados, seleção de experimentos e calibração dos sensores.

The screenshot displays a software interface with multiple tabs: Manual, Automatico, Grafico, Camera, Dados, Ajustes, and Layout. The 'Dados' tab is active, showing a form for data management. On the left, there are buttons for 'Gerar Arquivo', 'Enviar e-mail', 'Pendrive', and 'Zerar Banco'. Below these are checkboxes for file formats: '.txt' (selected) and '.csv (excel)'. The 'Experimento' section includes a 'Novo Experimento' button, a dropdown for 'Exp Atual' (currently 'Sem Nome'), and date selection fields for 'Atual' (16/12/2016) and 'perioc' (21/12/2016). There is also a 'Local do Arquivo' button. The 'Ajustes' section shows a linear regression model $T(d) = A + B * d$ with six sensor data pairs (S1-S6) and their corresponding A and B coefficients. A dropdown menu shows 'Celcius_Setembro2016'. At the bottom of this section are 'Salvar' and 'deletar' buttons. On the right, the 'Conexão' section has a 'Desconectar' button. The 'Sensores' section shows a status indicator (Auto) and a table of sensor readings: Esteira (275.5), Teto (309.1, 334.2), and lateral (311.5, 277.7, 334.2). Below this is a 'Resistencias' section with six horizontal bar charts (R1-R6) showing percentages: R1 (27%), R2 (71%), R3 (45%), R4 (53%), R5 (41%), and R6 (100%). A large red 'Emergência' button is at the bottom right. The status bar at the very bottom shows 'Dado Recebido: S0001056306280563068006280682 | update-grafico | Dado Recebido: S0001056206260562068006260681 |'.

Fonte: Própria autoria.

A tabela sensores é a responsável por guardar todos os dados de temperatura, a hora e o *status* do forno sempre que uma nova informação é recebida da unidade escrava. Caso um experimento esteja em andamento e o usuário tenha dado um nome para ele, este também é salvo no banco. Na aba *Dados*, o usuário tem a opção de criar

ou resgatar experimentos pelo grupo Experimento (Figura 42), podendo selecionar o experimento por nome ou por período. Os dados que alimentam os gráficos (Seção 5.4.4) também dependem desta seleção.

O usuário poderá acessar as informações da tabela sensores escolhendo o nome do experimento ou período. As informações são salvas em arquivos, com as opções .txt ou .csv para uso no Excel em uma pasta a sua escolha, tendo por padrão a pasta *dadosExperimento* (Figura 16). O arquivo salvo pode ser enviado por e-mail por meio da GUI, ou então salvo em um pendrive (figura 42). Também existe a possibilidade de apagar os dados do banco de dados (Neste caso um *backup* é feito e os dados apagados).

5.4.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

Na aba *Grafico* é possível visualizar os gráficos dos sensores de temperatura de um experimento anterior selecionado ou do atual em andamento. Para o experimento em andamento, o gráfico é atualizado a cada n segundos automaticamente, com este valor sendo escolhido pelo usuário (Seção 5.4.2), sendo 5 segundos o valor padrão. A taxa mínima de atualização que pode ser escolhida é de 1 segundo, que foi escolhido como um valor adequado para não sobrecarregar o processador com o desenho gráfico enquanto outras tarefas estão ocorrendo simultaneamente no programa.

Outra opção de visualização na aba *Grafico* é a simulação do forno, sendo mostrado um gráfico de cores na parte inferior a uma superposição com a imagem da câmera na parte superior. Os valores mínimos e máximo para a escala de cores pode ser alterado, iniciando por padrão com os valores máximo e mínimo da temperatura simulada. Para não sobrecarregar o sistema, existe uma opção de número de leituras de temperatura para que a simulação seja mostrada, que por padrão é 5, mostrando a imagem apenas uma em cada 5 vezes que um dado é recebido.

Figura 43 – Interface de controle, tela com display gráfico das temperaturas nos sensores.

Fonte: Própria autoria.

Figura 44 – Interface de controle, tela com visualização da simulação do perfil térmico do forno e sobreposição na imagem do mesmo.

Fonte: Própria autoria.

5.4.5 CONTROLE AUTOMÁTICO

5.4.5.1 Potência do forno x tempo

No modo automático por perfil de potência, o forno funciona baseado em um perfil independente de potência em função do tempo. O usuário pode adicionar, remover ou escolher entre os perfis existentes, que é mostrado no gráfico ao lado da escolha (Figura 45).

Figura 45 – Interface de controle, tela do controle automático com perfil tempo x potência.

Fonte: Própria autoria.

5.4.5.2 Temperatura no forno X tempo

O controle pelo perfil de temperatura por tempo segue o mesmo modelo de interface do perfil por potência, no entanto é escolhida a temperatura do ar e da esteira

em função do tempo (Figura 46). Como a temperatura no ar próxima ao alimento não é conhecida, é utilizado um método numérico (seção 4.4.1) para estimar este valor. Com estes valores, o controle PID é acionado (seção 4.3.1).

Figura 46 – Interface de controle, tela do controle automático com perfil tempo x temperatura.

Fonte: Própria autoria.

5.4.5.3 Temperatura no alimento

Para o controle pela transferência de calor, é realizado uma simulação numérica para estimar a temperatura no alimento. O controle PID é utilizado para se estabilizar a temperatura num valor desejado na superfície do alimento e o fornecimento é terminando quando a temperatura interna chegar ao valor escolhido.

6 CONCLUSÕES

O algoritmo de simulação do perfil térmico do forno em uma dimensão se mostrou condizente com as medidas experimentais e o tempo de execução do algoritmo no SBC utilizando a ferramenta *f2py* foi uma ordem de grandeza abaixo tempo requerido pelo controle PID, não comprometendo a performance do *software* de controle e possibilitando a simulação em tempo real. Os resultados da simulação da temperatura no alimento também concordaram com o *software* Comsol, e o tempo de execução do algoritmo no SBC (Raspberry pi 3) permite realizar o controle térmico do alimento em tempo real.

O controlador PID foi capaz de levar e manter a temperatura ao valor desejado, funcionando em conjunto com a simulação e comunicando com a unidade escrava para manter os perfis de temperatura no alimento selecionados pelo usuário do sistema e com isso realizar um processo de forneamento com o perfil térmico desejado pelo controlador do forno.

Com estes resultados concluiu-se que é possível utilizar computação de baixo custo (Raspberry pi e Arduino) para realizar o controle e automação de um forno em escala piloto para processamento de alimentos utilizando simulação em tempo real, possibilitando o acesso e controle de forma remota ou local.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle possui dois *softwares* que foram disponibilizados sobre licença livre MIT com o intuito de que o *software* ou parte dele seja utilizado, alterado e/ou modificado por outros pesquisadores e desenvolvedores. A biblioteca criada para o controle escravo está disponibilizada no repositório oficial de bibliotecas do Arduino e possui flexibilidades de uso como escolha do número de atuadores, quantidade e posição dos sensores e escolha do período PWM, para que possa ser adaptada a outros tipos de forno ou controladores de temperatura de processo lento. Espera-se que este software possa ser útil em futuros experimentos realizados neste tipo de forno bem como em outros tipos de controladores, possibilitando o uso através da abstração da biblioteca.

O *software* mestre, escrito em Python2.7, também foi organizado em classes e funções separadas por suas especificidades de forma que partes específicas, como por exemplo leitura serial, tratamento de dados, rotina numérica, entre outros, possam ser reutilizados em outros projetos do mesmo grupo de pesquisa ou de terceiros.

Na escolha da SBC, além das características de hardware da placa, o tamanho da comunidade e suporte ao sistema oferecido pela companhia que fabrica a SBC é tão importante quanto suas especificações. Tais fatores também tiveram importância na escolha do Raspberry pi, visto que foram testadas outras placas que possuíam hardware similar porém não tinham o suporte e estabilidade da plataforma oferecida pela comunidade do Raspberry pi.

Com a conclusão deste trabalho abre-se a oportunidade para futuras pesquisas. A temperatura simulada no forno foi comparada com valores experimentais em função da profundidade, porém experimentos com sensores que acompanham o alimento podem validar o modelo de aquecimento do alimento, que outros autores citados neste trabalho usaram mas sem o controle em tempo real.

Outros modelos de aquecimento e propagação de calor no forno em duas e três dimensões e com a adição de convecção (forçada ou natural) podem ser realizados e comparados com o modelo 1d deste trabalho, porém o aumento da complexidade do modelo exige um processador com maior poder computacional que o SBC deste sistema.

O sistema desenvolvido pode ser testado em fornos de maior dimensão em aplicações industriais, sendo sugerido a implementação deste em linhas de produção de alimento com sistema de esteira que ainda não possuam um controle automatizado. Espera-se que este trabalho possa ser útil para empresas de processamento de alimentos, principalmente pequenas e médias, que busquem por melhorias nos seus processos de forneamento.

REFERÊNCIAS

- ABIA. A Força do Setor de Alimentos. *Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos*, v. 1, n. 1, p. 1–3, 2013. Disponível em: <<http://abia.org.br/vst/AForcadoSetordeAlimentos.pdf>>. Citado na página 21.
- ARAÚJO, A. et al. Integrating arduino-based educational mobile robots in ros. In: IEEE. *Autonomous Robot Systems (Robotica)*, 2013 13th International Conference on. [S.l.], 2013. p. 1–6. Citado na página 47.
- AROGBA, S. S. Effect of temperature on the moisture sorption isotherm of a biscuit containing processed mango (*mangifera indica*) kernel flour. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 48, n. 2, p. 121–125, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- ATZINGEN, G. V. von. *controleForno*. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2016. Disponível em: <<https://github.com/Atzingen/controleForno>>. Citado 3 vezes nas páginas 62, 67 e 105.
- ATZINGEN, G. V. von. *controleForno-interface*. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, 2016. Disponível em: <<https://github.com/Atzingen/controleForno-interface>>. Citado na página 62.
- BAIK, O. et al. Modeling the thermal properties of a cup cake during baking. *Journal of Food Science*, Wiley Online Library, v. 64, n. 2, p. 295–299, 1999. Citado na página 83.
- BARRETT, S. F. Arduino microcontroller processing for everyone! *Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems*, Morgan & Claypool Publishers, v. 8, n. 4, p. 1–513, 2013. Citado na página 47.
- BENNETT, S. *A history of control engineering, 1800-1930*. [S.l.]: IET, 1986. ISBN 978-0-86341-047-5. Citado na página 29.
- BERDAHL, E.; LLIMONA, Q. Tangible embedded linux. In: ACM. *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. [S.l.], 2013. p. 407–410. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 52.
- BOULET, M. et al. Cfd modeling of heat transfer and flow field in a bakery pilot oven. *Journal of food engineering*, Elsevier, v. 97, n. 3, p. 393–402, 2010. Citado na página 35.
- BUECHLEY, L. et al. The lilypad arduino: using computational textiles to investigate engagement, aesthetics, and diversity in computer science education. In: ACM. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. [S.l.], 2008. p. 423–432. Citado na página 48.

CAMPINAS, N. de Estudos e Pesquisas em Alimentação. Universidade Estadual de. *Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO)*. [S.l.]: Unicamp Campinas, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 83 e 87.

COMSOL, A. Comsol multiphysics user's guide. *Version: September*, v. 10, p. 333, 2005. Citado na página 84.

CORPORATION, A. energy. *Ovens, Prepared for Southern California Edison Technology Assessment*. [S.l.]: Foodservice Equipment, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

COVINGTON, M. J.; CARSKADDEN, R. Threat implications of the internet of things. In: IEEE. *Cyber Conflict (CyCon), 2013 5th International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 1–12. Citado na página 52.

DESBOROUGH, L.; MILLER, R.; NORDH, P. Regulatory control survey. *Honeywell, unpublished*, 2000. Citado na página 28.

D'AUSILIO, A. Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior research methods*, Springer, v. 44, n. 2, p. 305–313, 2012. Citado na página 48.

F2PY. *Provide connection between Python and Fortran languages*. F2py, 2007. Disponível em: <<https://sysbio.ioc.ee/projects/f2py2e/>>. Citado na página 73.

FGV. *Quais setores estão sendo beneficiados e quais são os que mais estão sofrendo com a crise?* Fundação Getúlio Vargas, 2016. Disponível em: <<http://ejfgv.com/2016/06/02/setores-estao-beneficiados-sao-estao-sofrendo-crise/>>. Citado na página 21.

FIESP. *Balança comerciais do agronegócio*. Fundação Getúlio Vargas, 2016. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/balanca-comercial/>>. Citado na página 21.

FISHER TODD BELL, J. N. D. Commercial Cooking Appliance Technology Assessment. *Commercial Cooking Appliance Technology Assessment*, v. 1, n. 5011.02.26, p. 1–29, 2002. Disponível em: <http://www.fishnick.com/equipment/techassessment/Appliance_Tech_Assessment.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

FULLER, S. H.; MILLETT, E. C. o. S. G. i. C. P. N. R. C. L. I. *The Future of Computing Performance: Game Over or Next Level ?* The National Academies Press, 2011. ISBN 9780309159517. Disponível em: <http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12980>. Citado na página 44.

GULATI, T.; DATTA, A. K. Enabling computer-aided food process engineering: Property estimation equations for transport phenomena-based models. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 116, n. 2, p. 483–504, 2013. Citado na página 34.

HAGHIGHI, M.; CLIFF, D. Sensomax: An agent-based middleware for decentralized dynamic data-gathering in wireless sensor networks. In: IEEE. *Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2013 International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 107–114. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

HALEY, T. A.; MULVANEY, S. J. Advanced process control techniques for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 103–110, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

HAWKE, I. *Numerical Methods*. Creative Commons attribution license,, 2014. ISBN CC-BY 4.0. Disponível em: <http://openedx.seas.gwu.edu/courses/GW/MAE6286/2014_fall/wiki/GW.MAE6286.2014_fall/>. Citado na página 44.

HAYAKAWA, K.; HWANG, P. Apparent thermophysical constants for thermal and mass exchanges of cookies undergoing commercial baking processes. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie= Food science+ technology*, 1981. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 83.

HEEKS, R.; ROBINSON, A. Ultra-low-cost computing and developing countries. *Communications of the ACM*, ACM, v. 56, n. 8, p. 22–24, 2013. Citado na página 49.

HOEHN, R.; SBENATY, S. M. Designing, building, and testing a microcontroller-based system for industrial applications. In: *Proceedings of the 2005 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 45.

IBGE. *Produção Física da Indústria, por Classe e Gênero*. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio, 2013. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1337260114.pdf>. Citado na página 21.

ILLÉS BALÁZS, B. I. Numerical study of the gas flow velocity space in convection reflow oven. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 70, p. 185–191, 2014. Citado na página 35.

ILYUKHIN, S. V.; HALEY, T. A.; SINGH, R. K. A survey of automation practices in the food industry. *Food Control*, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 285–296, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 45.

INSIDER, B. *Here's how the Internet of Things will explode by 2020*. Tech Insider, 2016. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/iot-ecosystem-internet-of-things-forecasts-and-business-opportunities-2016-2>>. Citado na página 53.

JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L. Future trends in process automation. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 211–220, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

KAISER, V. Modeling and simulation of a multi-zone band oven. *Food Technology*, INST FOOD TECHNOLOGISTS SUITE 300 221 N LASALLE ST, CHICAGO, IL 60601-1291, v. 28, n. 12, p. 50, 1974. Citado na página 36.

KNOSPE, C. PID Control. *Control System Magazine*, v. 1, n. 33, p. 30–41, 2006. Citado na página 28.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. *Principios de transferencia de calor*. [S.l.]: Cengage Learning Editores, 2012. Citado na página 82.

KULACKI, F.; KENNEDY, S. Measurement of the thermo-physical properties of common cookie dough. *Journal of Food Science*, Wiley Online Library, v. 43, n. 2, p. 380–384, 1978. Citado na página 83.

LAU, O.-W.; WONG, S.-K. Contamination in food from packaging material. *Journal of Chromatography A*, Elsevier, v. 882, n. 1, p. 255–270, 2000. Citado na página 34.

LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, Elsevier, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015. Citado na página 53.

LOSTIE, M. et al. Study of sponge cake batter baking process. part i: Experimental data. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 51, n. 2, p. 131–137, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

MACK, C. The multiple lives of moore's law. *IEEE Spectrum*, IEEE, v. 52, n. 4, p. 31–31, 2015. Citado na página 44.

MARTIN, L. The promise of the maker movement for education. *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, Purdue University Press, v. 5, n. 1, p. 4, 2015. Citado na página 47.

MAZIDI, M. A. et al. Embedded systems. *New Delhi, Personal Education*, 2009. Citado na página 46.

MCCLURE, P. et al. Modelling the growth, survival and death of microorganisms in foods: the uk food micromodel approach. *International journal of food microbiology*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 265–275, 1994. Citado na página 34.

MCROBERTS, M. *Arduino básico*. [S.l.]: Novatec Editora, 2011. Citado na página 49.

MILECKI, A. 45 years of mechatronics—history and future. In: *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 127–136. Citado na página 45.

MINORSKY, N. Directional stability of automatically steered bodies. *J. Amer. Soc. Naval Eng.*, v. 1, n. 34, p. 280–309, 1922. Citado na página 28.

NICOLAS, V. et al. Modelling heat and mass transfer in deformable porous media: Application to bread baking. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 130, p. 23–35, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. Citado na página 28.

OPENCV. *open source computer vision and machine learning software library*. <http://opencv.org/>, 2016. Disponível em: <<http://opencv.org/>>. Citado na página 79.

- ÖZILGEN, M.; HEIL, J. Mathematical modeling of transient heat and mass transport in a baking biscuit. *Journal of food processing and preservation*, Wiley Online Library, v. 18, n. 2, p. 133–148, 1994. Citado na página 36.
- PEREIRA, L. A. M. *Desenvolvimento de uma linha experimental de escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo ZIG-BEE*. 1–117 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 57, 59 e 61.
- POWELL, A. Democratizing production through open source knowledge: from open software to open hardware. *Media, Culture & Society*, Sage Publications, v. 34, n. 6, p. 691–708, 2012. Citado na página 46.
- QUEIROZ, S. Obstáculos ao investimento em P&D de empresas estrangeiras no Brasil. *Revista USP*, v. 1, n. 89, p. 244–255, 2011. Citado na página 21.
- REAS, C.; FRY, B. *Processing: a programming handbook for visual designers and artists*. [S.l.]: Mit Press, 2007. v. 6812. Citado na página 48.
- RUIZ, A. U.; BRITTO, J. N. de P.; SOUZA, K. S. G. de. Qualificando o caráter regressivo da especialização industrial do Brasil. *Revista Econômica*, v. 1, n. 1, p. 244–255, 2014. Citado na página 21.
- SABLANI, S. et al. Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. *LWT-Food Science and Technology*, Elsevier, v. 31, n. 3, p. 201–209, 1998. Citado na página 36.
- SAGUY, I. S. et al. Challenges facing food engineering. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 119, n. 2, p. 332–342, 2013. Citado na página 23.
- SAKIN, M.; KAYMAK-ERTEKIN, F.; ILICALI, C. Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking. *Journal of food engineering*, Elsevier, v. 83, n. 3, p. 463–474, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 83.
- SCIPY. *Python-based ecosystem of open-source software for mathematics, science, and engineering*. [scipy.org](https://www.scipy.org/), 2017. Disponível em: <<https://www.scipy.org/>>. Citado 2 vezes nas páginas 72 e 98.
- SELMAN, J. D. Process monitoring and control on-line in the food industry. *Food control*, v. 1, n. 04, p. 36–39, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 32.
- SIMPSON A. TEIXEIRA, S. A. R. Advances with intelligent on-line report control and automation in thermal processing of canned foods. *Food Control*, v. 1, n. 18, p. 821–833, 2006. Citado na página 27.
- TEIKARI, P. et al. An inexpensive arduino-based led stimulator system for vision research. *Journal of neuroscience methods*, Elsevier, v. 211, n. 2, p. 227–236, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 50, 52 e 53.

TEMEL SEMIH YAGLI, S. G. S. *Discrete Time Controls Systems Recitation Report*. Middle East Technical University, 2013. Disponível em: <http://www.eee.metu.edu.tr/~ee402/2013/EE402RecitationReport_4.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 32, 72 e 98.

TRYSTRAM, F. C. G. Food processing control - Reality and problems. *Food Research International*, v. 1, n. 27, p. 173–185, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

VRIES, U. d.; SLUIMER, P.; BLOKSMA, A. A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking. *STU-Information (Sweden)*, STU, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

YOUNG, D. M. A bound for the optimum relaxation factor for the successive overrelaxation method. *Numerische Mathematik*, Springer, v. 16, n. 5, p. 408–413, 1971. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 77.

ZANONI, B.; PIERUCCI, S.; PERI, C. Study of the bread baking process—ii. mathematical modelling. *Journal of Food Engineering*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 321–336, 1994. Citado na página 35.

A APÊNDICE

A.1 DIAGRAMA PLACA DE CONTROLE

A.2 CONTROLE PID

A.2.1 CONTROLADOR

```

1 # -*- coding: latin-1 -*-
2 #import banco.bd_config as bd_config
3 from __future__ import division
4 import matplotlib.pyplot as pylab
5 import numpy as np
6 from scipy.integrate import odeint
7
8 '''
9 Classe de controle PID Discreto
10 Baseado no programa desenvolvido por http://code.activestate.com/recipes/577231-discrete-pid-controller/
11 sobre a licença MIT: http://opensource.org/licenses/MIT
12 '''
13
14 class PID:
15     '''
16     Controle PID Discreto
17     Este objeto deve ser instanciado com os valores de Kp, Ki e Kd (padrão =
18     2, 0.5 e 1) e com o setPoint
19     setPoint -> Valor desejado para o controle
20     Limite máximo e mínimo para o integrador = 100 e -100 respectivamente
21     Integrador e Derivador iniciam com valor 0
22     '''
23     def __init__(self, nome,
24                 P=0.5, I=3, D=0.001,
25                 Integrador=0, Derivador=0, dt=1, setPoint=100,
26                 max_Integrador=100, min_Integrador=-100):
27         # Construtor - Inicia automaticamente quando um objeto da classe PID é
28         # instanciado
29         self.name = nome
30         self.Kp=P
31         self.Ki=I
32         self.Kd=D
33         self.Derivador=Derivador
34         self.Integrador=Integrador
35         self.max_Integrador=max_Integrador
36         self.min_Integrador=min_Integrador
37         self.setPoint=setPoint
38         self.error=0.0
39         self.dt = dt
40
41     def update(self, current_value):
42         '''
43         Recebe um novo dado lido pelo sensor e retorna a resposta
44         do controle PID para o sistema
45         '''
46         # Cálculo do erro: Objetivo - Valor atual
47         novo_erro = self.setPoint - current_value
48         # verifica se passou a linha do Objetivo
49         if novo_erro*self.error < 0:
50             self.resetPID()
51         self.error = novo_erro
52         # Cálculo de K,P e D
53         self.P_value = self.Kp * self.error
54         self.D_value = self.Kd * (self.error - self.Derivador)/self.dt
55         self.Derivador = self.error
56         self.Integrador = self.Integrador + (self.error*self.dt)
57         # Checa se o valor do Integrador não saturou
58         if self.Integrador > self.max_Integrador:
59             self.Integrador = self.max_Integrador

```

```

58     elif self.Integrador < self.min_Integrator:
59         self.Integrador = self.min_Integrator
60
61     self.I_value = self.Integrador * self.Ki
62     # Atualiza o valor da resposta
63     resposta = self.P_value + self.I_value + self.D_value
64     if resposta > 100:
65         resposta = 100
66     elif resposta < 0:
67         resposta = 0
68     return resposta
69
70 def resetPID(self):
71     self.Integrador=0
72     self.Derivador=0
73
74 def set_setPoint(self, setPoint):
75     '''
76     Atualiza o valor do setPoint, caso um novo objetivo seja desejado
77     Zera os valores do Integrador e do Derivador pois é como se o controle
78     estivesse começando novamente.
79     '''
80     self.setPoint = setPoint
81     self.resetPID()

```

A.2.2 MODELO-RESPOSTA

```

1 class simuladorForno:
2     '''
3     Classe que simula a resposta de temperatura no centro do forno
4     utilizando um modelo de edo de segunda ordem baseado no sistema
5     massa mola amortecido.
6     Evolução no tempo utiliza método de runge-kutta 4a ordem
7     '''
8
9     def __init__(self, T_atual, a, b, c, t0=0, dt_medida=5):
10         '''
11         Construtor do objeto
12         '''
13         self.A = a
14         self.B = b
15         self.C = c
16         self.Ta = 28
17         self.T = np.array([T_atual])
18         self.der_T = 0
19         self.t = np.array([t0])
20         self.dt_medida = dt_medida
21
22     def evolui_exp(self, dt, P, desvio, passo=0.01):
23         '''
24         Faz a evolução temporal utilizando o método de Runge Kutta com o módulo
25         odeint
26         e chamando a função edo_1_passo.
27         dt -> tempo de evolucao temporal.
28         P -> Potencia total das resistências.
29         '''
30         for i in range(int(dt/self.dt_medida)):
31             estado_inicial = self.T[-1], self.der_T
32             ti = self.t[-1] # tempo inicial
33             tf = ti + self.dt_medida # tempo final após evolução
34             t_novo = np.arange(ti, tf, passo) # cria um vetor de tempo para a
35             evolucao
36             # funcao que realiza o a ev. temporal (euler)
37             estado = odeint(edo_1_passo, estado_inicial, t_novo, args=(P, self.A,

```

```

36     self.B, self.C, self.Ta))
37     T_novo = np.array(estado[:,[0]])
38     d_T_novo = np.array(estado[:,[1]])
39     self.T = np.append(self.T, T_novo[-1] + np.random.normal(0,desvio))
40     self.der_T = d_T_novo[-1]
41     self.t = np.append(self.t, t_novo[-1])
42     return self.T[-1]
43
44 def evolui(self, dt, P, passo=0.01):
45     '''
46     Faz a evolução temporal utilizando o método de Runge Kutta com o módulo
47     odeint
48     e chamando a função edo_1_passo.
49     dt -> tempo de evolucao temporal.
50     P -> Potencia total das resistências.
51     '''
52     estado_inicial = self.T[-1], self.der_T
53     ti = self.t[-1] # tempo inicial
54     tf = ti + dt # tempo final após evolução
55     t_novo = np.arange(ti, tf, passo) # cria um vetor de tempo para a
56     evolucao
57     # funcao que realiza o a ev. temporal (euler)
58     estado = odeint(edo_1_passo, estado_inicial, t_novo, args=(P, self.A,
59     self.B, self.C, self.Ta))
60     T_novo = np.array(estado[:,[0]])
61     d_T_novo = np.array(estado[:,[1]])
62     self.T = np.append(self.T, T_novo)
63     self.der_T = d_T_novo[-1]
64     self.t = np.append(self.t, t_novo)
65     return self.T[-1]
66
67 def reset(self, temperatura=None):
68     if temperatura:
69         self.T = np.array([temperatura])
70     else:
71         self.T = np.array([self.Ta])
72     self.t = np.array([0])
73
74 def edo_1_passo(estado, t, P, A, B, C, Ta):
75     '''
76     Recebe o estado contém uma tuple (T, d_T) -> temperatura e derivada da
77     temperatura num instante, junto com as constantes da edo, A, B, C e a
78     potencia no instante e retorna.
79     '''
80     T, d_T = estado
81     dd_T = -A*d_T - B*(T-Ta) + P*C
82     return [d_T, dd_T]

```

A.3 DIFERENÇAS FINITAS 1D FORNO - PYTHON

A.3.1 SOR PYTHON2.7

```

1 # -*- coding: latin-1 -*-
2 from __future__ import division
3 import numpy as np
4
5 def calcula_perfil(Ta, T1, T2, T3, R1, R2, R3):
6     '''
7     Função que calcula o perfil termico do forno em uma dimensao
8     utilizando o metodo SOR (sucessive over relaxation).
9

```

```

10 Parameters:
11 -----
12 Ta: float
13     temperatura ambiente (kelvin / Celcius (>0))
14 T1: float
15     temperatura do sensor Lateral esquerdo (kelvin / Celcius (>0))
16 T2: float
17     temperatura do sensor Lateral central/interno (kelvin / Celcius (>0))
18 )
19 T3: float
20     temperatura do sensor Lateral direito (kelvin / Celcius (>0))
21 R1: float
22     Potencia da resistencia R1 (em porcentagem 0-100)
23 R1: float
24     Potencia da resistencia R2 (em porcentagem 0-100)
25 R1: float
26     Potencia da resistencia R3 (em porcentagem 0-100)
27
28 Return:
29 -----
30 T: Numpy Array float[n]      # n = 50
31 '''
32 L = 3          # comprimento em metros (2 mestros + 0.5m cada lado até
33 Ta)
34 n = 50         # numero de elementos finitos
35 n_sor = 1.8104 # Parametro SOR para atualizacao dos calculos
36 n_iteracoes = 30 # Valor da analise de sens. de malha
37
38 # Posições (pontos) com temperatura conhecida (termopar) e
39 # posições de início e fim das resistências.
40 p_n1 = int(2*n/6)      # ponto do sensor 1
41 p_r1_i = int(5*n/18)   # ponto do inicio da resistencia 1
42 p_r1_f = int(7*n/18)   # ponto do fim da resistencia 1
43
44 p_n2 = int(3*n/6)      # ponto do sensor 2
45 p_r2_i = int(8*n/18)   # ponto do inicio da resistencia 2
46 p_r2_f = int(10*n/18)  # ponto do fim da resistencia 2
47
48 p_n3 = int(4*n/6)      # ponto do sensor 3
49 p_r3_i = int(11*n/18)  # ponto do inicio da resistencia 3
50 p_r3_f = int(13*n/18)  # ponto do fim da resistencia 3
51
52 dx = L / (n+1.0)
53 potencia = 90.0*dx     # 1200 wats, 3 potências, 0.4m, /100 (fonte em %)
54 fonte = np.zeros(n+1)
55 fonte[p_r1_i:p_r1_f] = R1
56 fonte[p_r2_i:p_r2_f] = R2
57 fonte[p_r3_i:p_r3_f] = R3
58
59 # Chute inicial da temperatura como constante e igual a
60 # media de todos os sensores + ambiente*2 (esquerda e direita)
61 T = np.ones(n+1)*(2*Ta+T1+T2+T3)/5.0
62 # valores com temperatura conhecida (laterais e os 3 sensores)
63 T[0] = Ta
64 T[p_n1] = T1
65 T[p_n2] = T2
66 T[p_n3] = T3
67 T[-1] = Ta
68
69 # repete o metodo ate a convergencia suficiente (n_iteracoes)
70 for r in range(n_iteracoes):
71     for i in range(1,n):      # Loop por todos os pontos internos
72         if i == p_n1:        # Valor conhecido (sensor)
73             T[i] = T1
74         elif i == p_n2:      # Valor conhecido (sensor)
75             T[i] = T2
76         elif i == p_n3:      # Valor conhecido (sensor)

```

```

75         T[i] = T3
76     else:                                     # Aplica a diferencas finitas
77         Tn = (T[i-1] + T[i+1])/2.0 + (dx**2)*fonte[i]*potencia
78         T[i] = T[i] +n_sor*( Tn - T[i] )
79     return T

```

A.3.2 SOR FORTRAN90

```

1 module perfil
2
3 contains
4
5 subroutine roda_perfil(Ta, T1, T2, T3, R1, R2, R3,T)
6     !Funcao que calcula o perfil termico do forno em uma dimensao
7     ! utilizando o metodo SOR (sucessive over relaxation).
8     !
9     ! Parameters (entrada):
10    ! -----
11    ! Ta: float
12    !     temperatura ambiente (kelvin / Celcius (>0))
13    ! T1: float
14    !     temperatura do sensor Lateral esquerdo (kelvin / Celcius (>0))
15    ! T2: float
16    !     temperatura do sensor Lateral central/interno (kelvin / Celcius
17    (>0))
18    ! T3: float
19    !     temperatura do sensor Lateral direito (kelvin / Celcius (>0))
20    ! R1: float
21    !     Potencia da resistencia R1 (em porcentagem 0-100)
22    ! R2: float
23    !     Potencia da resistencia R2 (em porcentagem 0-100)
24    ! R3: float
25    !     Potencia da resistencia R3 (em porcentagem 0-100)
26    !
27    ! Return (saida):
28    ! -----
29    ! T: Numpy Array float[n]      # n = 50
30    implicit none
31    ! parametros de entrada
32    real, intent(in) :: Ta, T1, T2, T3, R1, R2, R3
33    integer, parameter :: n = 50    ! numero de elementos finitos
34    real, dimension(n), intent(out) :: T ! retorno do modulo
35
36    real :: L, sor, dx, T_media, Tn, potencia
37    integer :: i, j ,k
38    integer :: p_r1_i, p_r1_f, p_r2_i, p_r2_f, p_r3_i, p_r3_f, p_n1, p_n2,
39    p_n3
40    real, dimension(n) :: fonte
41
42    L = 3.0                ! comprimento do forno em metros
43    sor = 1.8104           ! parametro sor
44    p_n1 = INT(2*n/6)      ! ponto do sensor 1
45    p_r1_i = INT(5*n/18)   ! ponto do inicio da resistencia 1
46    p_r1_f = INT(7*n/18)   ! ponto do fim da resistencia 1
47
48    p_n2 = INT(3*n/6)      ! ponto do sensor 2
49    p_r2_i = INT(8*n/18)   ! ponto do inicio da resistencia 2
50    p_r2_f = INT(10*n/18)  ! ponto do fim da resistencia 2
51
52    p_n3 = INT(4*n/6)      ! ponto do sensor 3
53    p_r3_i = INT(11*n/18)  ! ponto do inicio da resistencia 3
54    p_r3_f = INT(13*n/18)  ! ponto do fim da resistencia 3
55
56    dx = L/(n+1)           ! tamanho de cada elemento em metros

```

```

55     potencia = 90.0*dx           ! Potencia - 1200 x 3 x 0.4 / 100
56     T_medio = (2*Ta + T1 + T2 + T3)/5
57
58     ! valores iniciais da temperatura
59     do i=1, n-1
60         T(i) = T_medio
61     enddo
62     T(1) = Ta      ! tempa ambiente nas pontas
63     T(n) = Ta      ! tempa ambiente nas pontas
64
65     ! valores da fonte (resistencia)
66     do i=1, n
67         fonte(i) = 0 ! Incialmente zerando todas as posicoes
68     enddo
69     do i=p_r1_i, p_r1_f ! Valor da resistencia 1 (0 a 100)
70         fonte(i) = R1   ! para as posicoes de p_r1_i a p_r1_f
71     enddo
72     do i=p_r2_i, p_r2_f ! Valor da resistencia 2 (0 a 100)
73         fonte(i) = R2   ! para as posicoes de p_r2_i a p_r2_f
74     enddo
75     do i=p_r3_i, p_r3_f ! Valor da resistencia 3 (0 a 100)
76         fonte(i) = R3   ! para as posicoes de p_r3_i a p_r3_f
77     enddo
78
79     ! Loop principal
80     do j=1, 30                ! 30 iteracoes
81         do i=2, n-1          ! loop por todos os elementos menos bordas (
E e D)
82             if (i == p_n1) then
83                 T(i) = T1
84             else if (i == p_n2) then
85                 T(i) = T2
86             else if (i == p_n3) then
87                 T(i) = T3
88             else              ! Caso nao seja os pontos das resistencias, aplica o
metodo
89                 Tn = (T(i-1) + T(i+1))/2.0 + dx*dx*fonte(i)*potencia
90                 T(i) = T(i) + sor*( Tn - T(i) )
91             end if
92         enddo
93     enddo
94
95 end subroutine roda_perfil
96
97 end module perfil

```

A.3.3 ANÁLISE DE MALHA

```

1  # -*- coding: latin-1 -*-
2  from __future__ import division
3  import numpy as np
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  import matplotlib as mpl
6  import pylab
7  import time
8  #import numba
9  import time
10 #from numba import jit
11 mpl.rc("figure", facecolor="white")
12
13 def calcula_perfil(n,iteracoes):
14     L = 1.8          # comprimento em metros
15     Ta = 293.1       # Temperatura ambiente
16     T1 = 397.3       # Temperatura no sensor 1

```

```

17     T2 = 412.3          # Temperatura no sensor 2
18     T3 = 386.1          # Temperatura no sensor 3
19
20     n_sor = 1.85
21
22     # Pontos com informação do sensor
23     p_n1 = int(n/4)
24     p_n2 = int(2*n/4)
25     p_n3 = int(3*n/4)
26
27     dx = L / (n+1.0)
28     fonte = np.ones(n+1)*300
29     T = np.ones(n+1)*(2*Ta+T1+T2+T3)/5.0
30     T[0] = Ta
31     T[p_n1] = T1
32     T[p_n2] = T2
33     T[p_n3] = T3
34     T[-1] = Ta
35
36     for r in range(iteracoes):
37         for i in range(1,n):
38             if i == p_n1: # - 1:
39                 T[i] = T1
40             elif i == p_n2:
41                 T[i] = T2
42             elif i == p_n3:
43                 T[i] = T3
44             else:
45                 Tn = (T[i-1] + T[i+1])/2.0 + (dx**2)*fonte[i]
46                 T[i] = T[i] + n_sor*( Tn - T[i] )
47     return T
48
49 if __name__ == '__main__':
50     it, dif = [], []
51     T_antes = calcula_perfil(80,2)
52     for i in range(3,100):
53         T = calcula_perfil(80,i)
54         diferenca = np.sum(np.square(T-T_antes))/np.sum(T)
55         print diferenca, i
56         it.append(i)
57         dif.append(diferenca)
58         T_antes = np.copy(T)
59     dif[0], dif[1] = 13, 13
60     dif[15] = 0.01
61     acom = [0]
62     for i in dif:
63         acom.append(i + acom[-1])
64     fig, ax1 = plt.subplots()
65     ax1.plot(it[4:], dif[4:])
66     ax1.set_xlabel(r'número de iterações $i$'.decode('utf-8'), fontsize =
12)
67     ax1.set_ylabel(r'Diferença entre iterações normalizada'.decode('utf-8'),
fontsize = 12)
68     ax2 = ax1.twinx()
69     ax2.set_ylabel(r'Diferença entre iterações acumulada'.decode('utf-8'),
fontsize = 12)
70     ax2.plot(it[4:], acom[4:-1], 'r')
71     ax1.grid(True)
72     #pylab.savefig('teste2.png', format='png', dpi=300)
73     plt.show()

```

A.3.4 GRÁFICO E IMAGEM DO FORNO

```
1 # -*- coding: latin-1 -*-
```



```

2 from __future__ import division
3 import numpy as np
4 import scipy.misc, pylab
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from matplotlib import rcParams, cm
7 import cv2
8
9 def gera_matriz_imagem(T,salvar=True):
10     '''
11     Funcao que gera a "imagem" termica para visualizacao.
12     Conversao para 2D.
13     Retorna uma matriz de dimensões n/5,n com n a dimensão do vetor
14     de entrada T
15     '''
16     n = int(T.shape[0]) # número de elementos do vetor T
17     R = np.empty([int(n/5),n]) # Cria a matriz que será utilizada
18     for i in range(n):
19         R[:,i] = T[i]
20     if salvar:
21         cv2.imwrite('temperatura.jpg',R)
22     return R
23
24 def forno_realidade_aumentada():
25     '''
26     Função que utiliza a imagem do perfil térmico gerado pela função
27     gera_matriz_imagem em uma imagem composta com o forno.
28     '''
29     perfil = cv2.imread('temperatura.jpg')
30     forno = cv2.imread('forno.jpg')
31     col, lin, _ = forno.shape
32     perfil = cv2.resize(perfil,(lin, col))
33     # Pontos para fazer a transformada
34     pts1 = np.float32([[0,0],[0,col],[lin,col],[lin,0]])
35     p1, p2, p3, p4 = [85,120], [380,170], [780,50], [600,40]
36     pts2 = np.float32([p1, p2, p3, p4])
37     # Matriz de transformação
38     M = cv2.getPerspectiveTransform(pts1,pts2)
39     # compões as imagens
40     perfil = cv2.warpPerspective(perfil,M,(lin,col))
41     perfil = cv2.addWeighted(perfil,0.4,forno,0.6,0)
42     cv2.imwrite('resultado.jpg',perfil)

```

A.4 DIFERENÇAS FINITAS CILINDRICA ALIMENTO

A.4.1 PYTHON 2.7

```

1 def evolui_tempo(tf, Ti=False,
2                 dt=0.05, nr = 60, nh = 30,
3                 R = 5.0e-2, H = 1.0e-2,
4                 k = 0.1, rho = 400, Cp = 3000,
5                 h_convect = 5.0, epsion = 0.7,
6                 T_esteira = 420.0, T_paredes = 470.0,
7                 T_ar = 450.0, T_ambiente = 293.0,
8                 gif = False, grafico = True, frame_skip = 20):
9     '''
10     Funcao principal da simulacao.
11     Recebe a temperatura inicial e os parametros necessarios para
12     realizar via metodo direto (foward in time, center in space),
13     as iteracoes necessarias (nt) ate o tempo final
14
15     Parameters:

```

```

16 -----
17 tf: float
18     tempo em segundos em que o sistema ira evoluir T0 = 0.
19     0 numero de iteracoes (time steps) dependera de tf e dt
20     (tf/dt) em segundos
21 Ti: numpy Array (nr,nh) || none
22     Vetor com a temperatura de entrada.
23     Quando esta matriz nao e passada a funcao cria uma matriz
24     com a temperatura ambiente (inicio da evolucao temporal).
25 dt: float
26     time step (em segundos)
27 nr: int
28     numero de elementos discretos na direcao radial
29 nh: int
30     numero de elementos discretos no eixo z (altura)
31 R: float
32     Raio do alimento em metros
33 H: float
34     Altura do alimento em metros
35 k, rho, sigma, h_convect, epsilon: float
36     Constantes Fisicas do alimento
37 T_esteira, T_paredes, T_ar, T_ambiente: float
38     Valores das temperaturas para a simulacao (Kelvin)
39 git, grafico: boolean (DEBUG)
40     Variaveis que quando verdadeiras mostram o grafico e animacao
41     do perfil termico do alimento.
42 frame_skip: int (DEBUG)
43     Apenas utilizada quando grafico=True. Pula frames do grafico para
44     nao carregar o processamento desnecessariamente.
45 -----
46 Return:
47 T -> numpy Array (nr,nh)
48 ',,'
49 pi = np.pi                # 3.14159...
50 sigma = 5.67032e-8         # constante de Stefan Boltzman
51 alpha = k/(rho*Cp)         # constante alpha a partir de k, rho e Cp
52 dr = R/(nr + 1)           # tamanho fisico do elemento em r
53 dh = H/(nh + 1)           # tamanho fisico do elemento em h
54
55 if not Ti: # Caso nao exista a temperatura de entrada, assume inicio da
56     # evolucao temporal com temperatura matriz de temperatura mbiiente
57     # cria a matriz da temperatura inicial - array of float
58     T = np.ones((nh,nr))*T_ambiente # dimensao 2, size nr + 1, nh + 1
59 else:
60     T = Ti
61 # matriz para valores de r em funcao, montadas em uma matriz concatenada
62 # de colunas para operacao vetorizada no loop
63 r_cilindrico = 1/np.tile(r+dr,(nh,1))[1:-1,1:-1]
64 # Numero de vezes que o metodo sera aplicado (fowad in time)
65 nt = int(tf/dt)
66
67 ##### Condicoes de contorno de Dirichilet #####
68 # (fora do loop pois estes valores nao sao afetados).
69 # Temperatura da esteira - Inferior
70 T[0,:] = T_esteira
71
72 for n in range(nt):
73     Tn = T.copy() # Cria uma nova matriz
74     T[1:-1,1:-1] = Tn[1:-1,1:-1] + alpha *( \
75         (dt/dh**2) * (Tn[2:,1:-1] - 2*Tn[1:-1,1:-1] + Tn[:-2,1:-1]) +\
76         (dt/dr**2) * (Tn[1:-1,2:] - 2*Tn[1:-1,1:-1] + Tn[1:-1,:-2]) +\
77         (dt/(dr*r_cilindrico)) * (Tn[2:,1:-1] - Tn[1:-1,1:-1]) )
78     ##### Condicoes de contorno: #####
79     # Direichilet
80     # Mista em todas as outras:
81     # Radiacao + convercao
82     T[:, -1] = T[:, -2] + dt*(epsilon*sigma*( T_paredes**4) - (T[:, -1]**4)

```

```

83         )\
84         T[-1,:] = T[-2,:] + dt*(epsilon*sigma*( (T_paredes**4) - (T[-1,:]**4)
85         )\
86         + h_convec*(T_ar - T[-1,:]))
87         # Condicao de Neuman
88         # simetria em r=0:
89         T[:,0] = T[:,1]
90         #####Fim CC #####
91         if gif:
92             if n % frame_skip == 0:
93                 Tn = np.flipud(T)
94                 Tn = np.concatenate((np.fliplr(Tn),Tp),axis=1)
95                 plt.clf()
96                 pyplot.imshow(Tn,interpolation='nearest',
97                               aspect='auto', cmap=cm.jet)
98                 pyplot.colorbar();
99                 fig.canvas.draw()
100         if grafico:
101             Tp = np.flipud(T)
102             Tf = np.concatenate((np.fliplr(Tp),Tp),axis=1)
103             fig = plt.figure(figsize=(18,6))
104             plt.clf()
105             plt.imshow(Tf,interpolation='nearest',
106                       aspect='auto', cmap=cm.jet)
107             plt.colorbar();
108             fig.canvas.draw()
109         else:
110             return T

```

A.4.2 FORTRAN - F90

```

1  program alimento
2
3      implicit none
4      integer, parameter :: nr = 60
5      integer, parameter :: nh = 30
6      real :: dt, Raio, H, ka, rho, Cp, h_convec, epsilon
7      real :: sigma, alpha, dr, dh
8      integer :: nt, i, j, k, l, m
9      real :: T_esteira, T_paredes, T_ar, T_ambiente
10     REAL, PARAMETER :: pi = 3.1415927
11
12     real, dimension(nr) :: r
13     real, dimension(nh,nr) :: T ! entrada
14     real, dimension(nh,nr) :: Tc
15
16     real :: tf
17
18     tf = 10.0
19
20     dt = 0.05
21     Raio = 0.05
22     H = 0.01
23     ka = 0.1
24     rho = 400.0
25     Cp = 3000.0
26     h_convec = 5.0
27     epsilon = 0.7
28     T_esteira = 420.0
29     T_paredes = 470.0
30     T_ar = 450.0
31     T_ambiente = 293.0
32     sigma = 5.67032e-8

```

```

33  alpha = ka/(rho*Cp)
34  dr = Raio/(nr + 1)
35  dh = H/(nh + 1)
36  nt = int(tf/dt)
37
38  do i = 1, int(nh)
39      do j = 1, int(nr)
40          T(i,j) = T_ambiente
41          Tc(i,j) = T_ambiente
42      enddo
43  enddo
44
45  do i = 1, nr
46      T(1,i) = T_esteira
47      r(i) = i*Raio/nr
48  enddo
49
50  do k = 1, nt
51
52      do i = 1, int(nh)
53          do j = 1, int(nr)
54              Tc(i,j) = T(i,j)
55          enddo
56      enddo
57
58      do i = 2, int(nh) - 1
59          do j = 2, int(nr) - 1
60              T(i,j) = Tc(i,j) + dt*alpha*( &
61                  ( Tc(i,j+1) - 2*Tc(i,j) + T(i,j-1) )/dr**2 + &
62                  ( Tc(i+1,j) - 2*Tc(i,j) + T(i-1,j) )/dh**2 + &
63                  ( Tc(i,j+1) - Tc(i,j-1) )/(dr* r(j)) )
64          enddo
65      enddo
66
67      do i = 1, int(nr)
68          T(nh,i) = T(nh-1,i) + dr*epsilon*sigma*(T_paredes**4 - T(nh,i)
**4)&
69              + dr*h_convect*( T_ar - T(nh,i))
70      enddo
71
72      do i = 1, int(nh)
73          T(i,nr) = T(i,nr-1) + dr*epsilon*sigma*(T_paredes**4 - T(i,nr)
**4)&
74              + dr*h_convect*( T_ar - T(i,nr))
75      enddo
76
77      do i = 1, int(nh)
78          T(i,1) = T(i,2)
79      enddo
80
81  enddo
82
83  write (*,*) T
84
85  end program alimento

```