**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

Luiz Sérgio Nowicki

**Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento
do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental**

Pirassununga
2014

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

Luiz Sérgio Nowicki

**Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento
do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental**

(Versão Corrigida)

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Ciências da Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa

Pirassununga
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Serviço de Biblioteca e Informação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo

N947u Nowicki, Luiz Sérgio
 Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento do perfil de temperatura em um forno tipo túnel experimental / Luiz Sérgio Nowicki. -- Pirassununga, 2014.
 98f.
 Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Básicas.
 Área de Concentração: Ciências da Engenharia de Alimentos.
 Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa.

1. Perfil de temperatura 2. Sensores de temperatura.
3. Sistema de comunicação sem fio. 4. Sensores termopar tipo K.
5. Zonas de aquecimento . I. Título.

A minha família e ao meu orientador que estiveram sempre presentes ao meu lado na compreensão, apoio e incentivo, neste grandioso trabalho.

AGRADECIMENTOS

A essência divina provedora de minha fé.

Ao Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa, pela enorme contribuição a minha formação acadêmica, pela confiança em mim depositada e pela sua amizade.

Ao técnico de laboratório LAFAC, Aldo Ivan Céspedes Arce que ajudou na execução do projeto.

Aos Professores Doutores Adriano Rogério Bruno Tech e Ana Carolina de Sousa Silva da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo que dispensaram seu tempo para minha formação.

Aos meus filhos Iris, Carlos e em especial a minha esposa e companheira, pela tolerância em ceder aos ofícios do estudo neste projeto.

A toda a equipe do LAFAC, em especial a Luciana Vieira Piza que me ajudou e apoiou no desenvolvimento deste projeto.

Aos meus pais Waldemar e Maria que sempre contribuíram com o melhor para o meu desenvolvimento como pessoa e profissional.

As minhas irmãs Vânia e Wanessa, que me ajudou e apoio neste projeto.

Agradeço a toda equipe do Serviço de Biblioteca de Informação da FZEA/USP: Marcelo Dozena, Girlei Lima, Vanessa Rodrigues, Claudio Ramos, Patricia Vick, Bernadete Mehler, Nathália Frasse e Auder Faleiro.

Ao Diego Santiago dos Santos, Engenheiro Eletricista da Divisão de Manutenção e Operações - PUSP-P; ao amigo em especial pela grande contribuição no experimento.

A todos aqueles que, discreta ou anonimamente, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução deste trabalho.

RESUMO

Nowicki, L.S. **Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

Atualmente as indústrias alimentícias brasileiras estão trabalhando para a conservação de energia, principalmente no setor industrial, com o uso de tecnologias mais eficientes voltadas para esta necessidade. Nesse sentido, a reestruturação tecnológica traz o desenvolvimento de novos produtos, reduzindo os gastos com energia e os impactos ambientais associados ao interesse dos consumidores na garantia e qualidade dos alimentos. No que se referem a alimentos assados, muitas indústrias usam forno tipo túnel. Sendo assim, entender o comportamento térmico de tais fornos é crucial para os programas que visam aperfeiçoar o controle dos gastos com energia, tanto quanto avaliar os impactos ambientais associados ao consumo dela e assim garantir a competitividade, cujo principal requisito é a produção de alimentos com qualidade de maneira sustentável. Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo monitorar o perfil de temperatura em um forno tipo túnel de uma mini linha experimental de produção de biscoitos em tempo real, utilizando sensores de temperatura acoplados a um sistema de comunicação sem fio. A metodologia desenvolvida usa um sistema de aquisição de dados, no qual seis sensores termopar tipo K foram distribuídos em três zonas de aquecimento do forno. Estes termopares foram conectados a um dispositivo eletrônico denominado AD595 que fez o condicionamento do sinal e a saída do mesmo, a qual estava conectada a um sistema de transmissão que usa o protocolo Zigbee. Este protocolo Zigbee foi controlado por um software na linguagem Visual Basic versão 6.0. Os resultados obtidos mostraram que tal metodologia permitiu monitorar as temperaturas em tempo real das seis diferentes zonas de aquecimento do forno, permitindo assim obter o perfil ideal para cozimento.

Palavras chave: perfil de temperatura, sensores de temperatura, sistema de comunicação sem fio, sensores termopar tipo K, protocolo ZigBee, zonas de aquecimento.

ABSTRACT

Nowicki, L.S. **Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental.**

Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

Currently Brazilian food industries are working to conserve energy, especially in the industrial sector with the use of more efficient technologies for this need. In this sense, the technological restructuring brings the development of new products, reducing energy costs and environmental impacts associated with consumer interest in quality assurance and food. As they relate to baked goods, many industries use tunnel kiln type. Therefore, to understand the thermal behavior of such furnaces is crucial for programs aimed at improving the control of energy expenditure as much as evaluating the associated environmental impacts her consumption and thus ensure competitiveness whose main requirement is the production of quality food sustainably. Within this context, this study aimed to monitor the temperature profile in an oven of an experimental mini biscuit production line in real time, using temperature sensors coupled to a wireless communication system type tunnel. The methodology developed uses a data acquisition system, in which six K-type thermocouple sensors were divided into three heating zones of the furnace. These thermocouples were connected to an electronic device called AD595 which made the signal conditioning and output the same, which was connected to a transmission system that uses the Zigbee protocol. This Zigbee protocol was controlled by software in visual basic language version 6.0. The results obtained showed that this methodology allowed monitor the temperatures in real time the six different heating zones of the furnace, thus allowing optimal for cooking profile.

Keywords: temperature profile, temperature sensors, wireless communication system, sensors k type thermocouple, ZigBee protocol, heating zones.

***“Pense em Deus quando acordar, peça pra ele te proteger. Pense nele o tempo
todo e você vai vencer!”***

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno cerâmico para assar pães	18
Figura 2: Exemplo de forno de convecção forçada de médio porte.....	19
Figura 3: Esquema de um forno túnel (Caddet, 1993).	21
Figura 4: Controle da temperatura na câmara de cozimento em forno tipo túnel.....	22
Figura 5: Campo de temperatura sobre a esteira	23
Figura 6: Fluxo de radiação absorvido pela esteira	24
Figura 7: Gráfico de variação da F.E.M.(mV) e a temperatura (°C).....	28
Figura 8: Vista do forno tipo túnel da mini linha experimental	37
Figura 9: Disposição das resistências no forno	38
Figura 10: Painel elétrico do forno.....	39
Figura 11: Vista parcial do painel elétrico.....	40
Figura 12: Layout das zonas de aquecimento do forno	41
Figura 13: vista lateral com as respectivas zonas de aquecimento do forno	42
Figura 14: Placa de controle dos componentes para o acionamento dos contadores do forno	43
Figura 15: Layout das zonas de aquecimento do forno	44
Figura 16: Diagrama funcional de blocos	46
Figura 17: Placa de controle do sistema de gerenciamento eletrônico do forno	46
Figura 18: Layout do da tela do Software de Controle do forno	47
Figura 19: cabo flexível “K” padrão ANSI (red. & yellow).....	49
Figura 20: Vista lateral do forno com os seis sensores termopares	50
Figura 21: Termopar tipo k e os tubos termo retrátil sobre a bancada.....	51
Figura 22: Instrumentos eletrônicos utilizados para calibrar a temperatura dos sensores termopar.....	52
Figura 23: Conjunto de sensores termopar e a ponta de prova do termômetro digital Minipa	52

Figura 24: Recipiente térmico com os termopares e a ponta de prova do termômetro digital	53
Figura 25: Instrumentos eletrônicos usados na calibração dos sensores termopar.	54
Figura 26: Vista lateral do forno com os termopares na zona 3 e os cabos.....	56
Figura 27: Sensores Termopar na zona 1(A)Sensores termopar na zona 2(B).....	56
Figura 28: Sensor termopar instalado no topo do forno.....	57
Figura 29: Sensor termopar instalado no lastro do forno.....	57
Figura 30: Tela de comando do software de controle da mini linha experimental.....	58
Figura 31: Esquema de distribuição das zonas de aquecimento do forno.....	59
Figura 32: Layout da placa de controle eletrônico do forno.....	61
Figura 33: Placa de controle eletrônico com os amplificadores AD595.....	62
Figura 34: Curvas de calibração dos sensores.	65
Figura 35: Gráfico comparativo entre os gráficos de calibração 1 e 2 com o sensor termopar 1 (um)	66
Figura 36: Painel elétrico com a antiga distribuição de energia para os contadores de 63 A	67
Figura 37: Painel de controle na nova configuração de distribuição de CA.....	68
Figura 38: Esquema de distribuição dos módulos U-BEE na mini linha experimental na produção de alimentos crocantes.....	69
Figura 39: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 1	70
Figura 40: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 2.	70
Figura 41: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 3.....	71
Figura 42: Gráficos com artefatos e ruídos durante a medição de temperatura nas zonas de aquecimento.....	72
Figura 43: Gráfico do comportamento térmico com as 3 zonas de aquecimento do forno	74
Figura 44: Perfil da temperatura nas zonas do forno com todas as resistências acionadas.	75
Figura 45: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 1	76
Figura 46: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 2	76
Figura 47: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 3.	77

Figura 48: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 4.	77
Figura 49: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 5.	78
Figura 50: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 6.	78
Figura 51: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistências 1, 2, 3 e 6.....	79
Figura 52: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 1,2,4 e 5.	80
Figura 53: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistências 3,4,5 e 6	80
Figura 54: Visualização do perfil de resfriamento do forno	81
Figura 55: Ajuste dos pontos de temperatura obtido do sensor à solução do modelo de primeira ordem	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de sensores Termopar convencional.....	27
Tabela 2: Normas internacionais de Designação.....	29
Tabela 3: As principais tecnologias de redes sem fio utilizadas para automação	32
Tabela 4: Especificações técnicas do módulo U-BEE.....	34
Tabela 5: Divisão do sistema elétrico nas zonas de aquecimento.....	42
Tabela 6: Adequação na distribuição do sistema elétrico nas zonas de aquecimento	43
Tabela 7: Temperatura para Calibração dos termopares tipo K ou N no ponto fixo	48
Tabela 8: Calibração dos sensores termopar (padrão)	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Americano de Normas).
ASME	American Society of Mechanical Engineers.(Norma Americana).
BS	British Standard (Norma Inglesa).
DIN	Deutsches Institut für Normung (Norma Alemã).
IEC	Comissão Internacional Eletrotécnica.
IPTS	Escala Prática Internacional de Temperatura.
ISA	The International Society of Automation.
ISA-SP100	International Society of Automation – Standard Protocol 100
JIS	Japanese Industrial Standards (Norma Japonesa).
LAFAC	Laboratório de Física Aplicada e Computacional.
NBR	Norma Brasileira de Referência.
NIST	National Institute of Standards and Technology
PAN	Personal Area Network (área pessoal de rede)
QSM	Quantidade sendo medida.
WSN	Wireless Sensor Network (rede de sensores sem fio)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperes (unidade de medida de corrente elétrica)
CA	Corrente Alternada
CJC	Compensação de junta fria
°C	Celsius (escala de temperatura utilizada em medições)
F	Fahrenheit (escala de temperatura utilizada em medições)
FEM	Força Eletro Motriz
K	Kelvin (escala de temperatura utilizada em medições)
R	Rankine (escala de temperatura utilizada em medições)
TTL	Transient Transistor Logic (lógica transitória do transistor)

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Forno tipo túnel	18
2.2 Instrumentação eletrônica industrial.....	25
2.3 Termopares.....	26
2.4 Redes de comunicação sem fio	29
2.5 Módulo U-BEE	33
3 OBJETIVO	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1 Montagem elétrica do forno e as zonas de aquecimento.....	37
4.2 Condicionamento do sinal dos termopares usando AD595	44
4.2.1 Amplificadores AD595	45
4.2.2 Calibração dos sensores termopar	47
4.3 Experimentos de aquecimento.....	55
4.4 Uso dos instrumentos eletrônicos (AD595).....	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 Resultados da calibração dos sensores termopar	64
5.2 Adequação na rede elétrica	66
5.3 Usos dos dispositivos eletrônicos (AD595) e a rede de comunicação	69
5.4 Experimentos com aquecimento.....	73

5.5 Modelo matemático.....	81
6 CONCLUSÃO	84
7 REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de alimentos é composta por empresas tradicionais e seculares, essa composição industrial reflete na necessidade de uma crescente evolução nos equipamentos das fábricas. A Instalação de equipamentos novos e modernos garantirá uma geração mais atualizada na produção de alimentos e os produtos brasileiros serão mais respeitados e reconhecidos com um alto padrão de qualidade. Dentro deste contexto, o forno tipo túnel é um dos equipamentos mais utilizados, por exemplo, em linhas de produção de biscoito.

O Forno elétrico tipo túnel é contínuo e os modelos industriais chegam a medir aproximadamente 18 m de comprimento. Na mini linha experimental utilizada no presente projeto de pesquisa o forno possui 2 m de comprimento, portanto, será mais fácil controlar e desenvolver um perfil ideal de temperatura dentro deste forno.

Neste tipo de forno, quando utilizado para a fabricação de biscoito, o alimento no seu percurso é submetido a diferentes temperaturas, ou seja, o forno possui zonas de aquecimento com diferentes temperaturas. Neste caso, a velocidade da esteira é constante, e os níveis de temperatura ao longo do forno são ajustados seguindo as necessidades de cozimento recomendado para cada receita. Normalmente requer um nível de temperatura intermediário para o cozimento na parte interna da massa, esta região alcança a temperatura mais elevada, para que o alimento seja tostado externamente proporcionando a consistência e cor adequadas. O elemento de aquecimento tradicionalmente utilizado são as resistências elétricas, por permitirem um controle preciso do nível de potência em cada zona de aquecimento do túnel.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo medir o perfil de temperatura nas zonas de aquecimento em um forno tipo túnel que é parte de uma mini linha experimental para a produção de biscoitos. Estes resultados irão permitir trabalhos futuros de modelagem matemática do forno e permitirá também avaliar a eficiência deste tipo de forno experimental no que diz respeito ao entendimento das zonas de aquecimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fornos tipo túnel

O homem sempre precisou do fogo para se proteger dos animais, do frio, para cozinhar, entre outros. E para manter o calor do fogo aceso por mais tempo, os povos começaram a construir uma proteção física e durável para se manter aquecidos. Eles usavam a argila extraída do fundo dos rios e fabricavam alguns objetos cerâmicos, visando proteger o fogo para que o mesmo não fosse apagado. A partir deste período, o homem começou a fazer mais alimentos com o uso do fogo, aproveitando este aquecimento deu-se o início a fabricação de fornos com tijolos de argila.

Segundo Bellingieri (2003) os primeiros fornos utilizados na industrialização do Brasil ocorreram no final do século XIX, com a instalação da olaria dos Falchi, para produzir telhas. Tempos depois mudaram de ramo e começaram a produzir chocolates. Neste período, as grandes cidades cresciam rapidamente e houve uma grande demanda por produtos cerâmicos, como tijolos, telhas, manilhas, pisos, entre outros.

Segundo Carzino (2006) o primeiro forno tipo túnel, construído em 1904, usava como combustível o carvão. Posteriormente, em 1913, o sistema de aquecimento deste modelo de forno foi alterado, tornando-o mais flexível no controle da temperatura, favorecendo na produção de pães, bolos e massas. Um forno para a produção de pães com o aquecimento por meio de carvão é mostrado na Figura 1.

Figura 1: Forno cerâmico para assar pães

Para a indústria alimentícia brasileira esta flexibilidade foi o início da implantação de sistemas de controle e automação na produção de alimentos. Desta forma, aumentou-se as pesquisas neste setor, buscando atender a demanda da indústria por tecnologia capaz de aumentar a produção mantendo a qualidade dos alimentos assados.

Além disso, a sociedade cada vez mais exige das indústrias o apreço pelo meio ambiente e esta questão inexoravelmente passa pela maneira como a indústria consome energia. Para Dadam e Nicolau (2006) as indústrias vêm enfrentando novos desafios em desenvolver equipamentos como fornos, secadores e assadeiras para serem mais econômicos e não provocar danos ao meio ambiente.

Os fornos tipo túnel representam uma grande categoria neste tipo de equipamento, proporcionando uma flexibilidade incomparável para ajustar as variáveis do processo. Existe uma considerável quantidade e diversidade de fornos sendo utilizados para o processamento de diversos tipos de alimentos (MANLEY, 1983). Existem ainda, alguns modelos mais compactos, com baixa manutenção, baixo custo e mais fáceis de trabalhar, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Exemplo de forno de convecção forçada de médio porte

Várias empresas no setor de produção de alimentos estão se adaptando às questões da produção sustentável. Neste contexto, as indústrias deste setor poderão aproveitar das vantagens que as novas tecnologias oferecem para aumentar e melhorar a produção de forma sustentável e criar novos produtos, mas grande parte dos equipamentos de controle eletrônico usados nesta nova onda

tecnológica possui tecnologia estrangeira (FELLOWS, 2006) e, portanto ainda oneram muito a cadeia produtiva.

Segundo Willianson (2009) este desenvolvimento depende muito da tecnologia que será aplicada na fabricação dos seus produtos, pois os efeitos do desenvolvimento devem fornecer soluções ótimas no que se refere ao aumento da produção sem aumentar os efeitos no ambiente. Ele também verificou que várias indústrias ainda não conseguiram atualizar os seus fornos tipo túnel para atender as novas demandas do mercado e a maioria dos fornos instalados está com capacidades de produção e tecnologia estagnadas por décadas.

Esta adequação dos processos produtivos das indústrias vem com adoção de novas tecnologias e a atualização dos métodos de processamento e equipamentos de alta tecnologia. Os fornos tipo túnel seguem uma concepção empírica. Para Sciamarelli (2004) o processo de evolução ainda é lento, mas é necessária a busca contínua em desenvolver novos equipamentos, mais eficientes e com baixo custo.

A tecnologia na construção de um forno túnel segue uma premissa já existente, que começou há anos com a indústria cerâmica e se expandiu para o setor de alimentos e outras indústrias de diferentes setores. Para que os alimentos sejam cozidos em grande escala comercial, os fornos túneis devem possuir uma tecnologia de controle e automação, com melhor isolamento térmico, menor consumo de energia e o domínio das variáveis do processo de fabricação.

Segundo Augusto, Santana e Cristianini (2010), devido a busca contínua pela melhor qualidade nutricional nos alimentos, menores gastos energéticos de sua produção e um controle térmico sobre o produto, criou-se a necessidade do entendimento completo dos processos envolvidos nesta produção e o controle das variáveis envolvidas.

A evolução na construção de novos fornos trouxe também o desenvolvimento de novos sistemas eletrônicos capazes de controlar melhor uma produção de alimentos por meio de softwares específicos.

Sakin, Ertekin e Ilicali (2009) verificaram que a transferência de calor e o tempo de cozedura podem influenciar muito na qualidade da cerâmica. Este processo de cozimento é muito semelhante ao utilizado nas indústrias de alimentos. O esquema de um forno tipo túnel utilizado na indústria cerâmica, ilustrado na Figura 3, demonstra como é o processo de cozimento nas zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento.

Figura 3: Esquema de um forno túnel (Caddet, 1993).

Fonte: (Dadam e Nicolau, 2006).

A evolução na construção de novos fornos tipo túnel trouxe também o desenvolvimento de novos sistemas eletrônicos capazes de controlar melhor uma produção de alimentos através de softwares específicos. Nesta evolução surgiram grandes fábricas de biscoitos, algumas têm a sua linha de produção em linha reta ou em forma de “U”, isto dependerá do local e como será projetada a linha de produção (DADAM e NICOLAU, 2006).

Segundo Carzino (2006) em uma linha de produção utilizando forno tipo túnel o alimento é transportado por uma esteira para o interior do forno. Em seguida ele passa pela zona de aquecimento, posteriormente é cozido, e o processo é concluído após passar pela área de resfriamento.

Para manter o desempenho e um padrão no cozimento dos alimentos, é necessário manter a temperatura adequada para cada zona de aquecimento no forno.

Sakin, Kaymak-Ertekin e Ilicali (2009) verificaram que a eficiência energética no processo de cozimento é um fator determinante para calcular a transferência de calor usado nos fornos. Nos processos denominados de assamento ou forneamento o produto sofrerá ação do calor, adquirindo características sensoriais adequadas ao consumo.

No processo de cozimento é essencial determinar os coeficientes da transferência de calor, como temperatura do ar, zonas de aquecimento, velocidade do ar e suas propriedades físicas (Singh et al, 1984, Sato et al, 1987, Zanoni et al, 1994, Pan et al, 2000, e Nitin Karwe, 2001, Pan e Singh, 2002, Carson et al, 2006, Demirkol et al, 2006 Sakin e Turkkan, 2006 e Sakin et al, 2007a).

Dentro deste contexto, o controle de temperatura usado em indústrias de panificação visa garantir uma boa eficiência no consumo de energia e a qualidade do produto final (Savoye et al. , 1992 , Sablani et al . de 1998 , Lostie et al . de 2002 , e Baik Marcotte , 2002 , Sakin , 2005 , Sakin et al . , 2007a e Sakin et al . , 2007b). Uma escala de temperatura no interior de um forno tipo túnel para o cozimento de biscoitos é mostrada Figura 4.

Figura 4: Controle da temperatura na câmara de cozimento em forno tipo túnel

Nas indústrias de alimentos existe a necessidade de um mecanismo automático para assegurar o controle e a produção de alimentos, bem como todas as variáveis envolvidas no processo (BOYER E EKE, 1998). O controle da energia no cozimento depende do tamanho das zonas de aquecimento do forno, da velocidade da esteira, da temperatura do ar quente e umidade, que garantirão qualidade do produto e eficiência de processamento (BAIK et al, 1999).

A Figura 5 traz um exemplo com um conjunto de resistências, formando um campo de temperatura distribuídos sobre uma esteira de um forno túnel, simulando uma área de aquecimento e os valores correspondentes a temperatura.

Figura 5: Campo de temperatura sobre a esteira

Rosu (2003) destacou em suas pesquisas que é de fundamental importância a medição de temperatura para garantir o perfil de aquecimento adequado de produtos assados. Sablani, Marcotte, Baik & Castaigne (1998) em suas pesquisas sobre a modelagem de calor e a transferência de massa ocorrida durante o cozimento, verificaram a necessidade de dados coletados de forma experimental, visando melhorar o projeto de controle dos fornos, para depois comparar com outros projetos em andamento.

Para medirmos as variáveis que compõem o processo de cozimento de um produto em suas zonas de aquecimento, é importante observar que para cada tipo de forno, existe um modo de funcionamento correspondente ao seu processo de fabricação e consumo de energia. Como por exemplo, o sistema do forno poderá ser do tipo túnel ou estático e o sistema de aquecimento poderá ser elétrico, a vapor, gás ou derivado de petróleo (YIN e WALKER, 1995).

Para Kilborn, Preston e Kubota (1990) o uso de resistência elétrica como fonte de aquecimento é muito comum em fornos tipo túnel para assar biscoitos. A maioria dos fornos tipo túnel que usam resistência elétrica, tem a facilidade de controlar algumas variáveis do processo, verificar a influência dos gradientes e possibilitar o desenvolvimento de novas pesquisas de produtos.

A Figura 6 mostra a influência do fluxo da radiação absorvida pela esteira de um forno. Sommier (2004) destaca a importância do controle da temperatura no

forno e verificação em tempo hábil e significativo o perfil de aquecimento de cada zona, visando processar o produto de forma adequada, garantindo qualidade e segurança ao consumidor.

Figura 6: Fluxo de radiação absorvido pela esteira

O estudo do monitoramento da temperatura tem levado em consideração os fornos estáticos, já que estes são muito utilizados em padarias ou empresas de pequeno porte, devido ao seu tamanho e a sua funcionalidade (BAIK, MARCOTTE, e CASTAIGNE, 2000; BAIK, MARCOTTE e CASTAIGNE, 2000; BROYART, TRYSTRAM, & DUQUENOY, 1998; BROYART & TRYSTRAM, 2002; THERDTAI, ZHOU, & ADAMCZAK, 2002; THERDTHAI E ZHOU, 2003).

Quando considera-se a demanda para processamento de alimentos em escala industrial, os fornos tipo túnel representam uma grande oportunidade neste setor (MANLEY, 1983). Este tipo de forno pode processar uma grande quantidade de alimentos sendo todo o controle de temperatura monitorado por sistemas, softwares e instrumentos eletrônicos, que ajustarão os perfis adequados para cada zona de aquecimento (BAIK et al, 1999).

A partir de testes feitos em fornos de cozimento contínuo, McFarlane (2005) relatou que o conceito de injeção de calor durante o processo de cozimento, deverá ser proporcional ao aumento de temperatura nas zonas de aquecimento, ao

dimensionamento do forno implementado e ao controle balanceado de temperatura sobre a massa. Neste teste observou o aumento de temperatura por meio da evaporação da água.

2.2 Instrumentação eletrônica industrial

A instrumentação eletrônica é a ciência que associa o conhecimento teórico e prático aplicado aos instrumentos de medição (FIALHO, 2002). É possível medir de forma contínua, ou discreta, o comportamento das variáveis nos processos industriais. Para Araújo (2006) em todo o processo industrial é necessário manter e controlar algumas variáveis, como por exemplo: temperatura, vazão, nível, pressão, entre outras variáveis. Este controle permite um aumento na produção e qualidade do produto.

Na produção de alimentos há diversas variáveis que influenciam no controle de qualidade dos produtos. Ruocco, Almeida e Lopes (2006) destacaram em suas pesquisas de monitoramento da temperatura de preparações quentes e frias em serviço técnico de nutrição e dietética, o uso de sensores termopar tipo K (Chromel-Alumel) e um amplificador AD595 no controle da temperatura em alimentos.

Lasso et al. (2003) em sua pesquisa sobre sistema de controle de temperatura para câmara de armazenamento frescos em meio líquido, utilizaram o Pt-100 e um sistema computacional, para controlar as temperaturas mais baixas nos alimentos.

Para os alimentos quentes, Filho, Silva e Araújo (2007) desenvolveram um sistema microcontrolado para controle da temperatura utilizando um monitoramento eletrônico de temperatura, um sensor de temperatura LM35DZ conectado a um micro controlador PIC6F877A e um controlador PI, que ligava uma resistência elétrica, mantendo os alimentos aquecidos.

Baik et al. (1999) pesquisaram os coeficientes de transferência de calor em bolos assados em um forno tipo túnel industrial, por meio de um medidor do ponto de umidade (Hycal CT-841, Honeywell Ltd., North York, NA) instalado no interior da câmara de cozedura do forno industrial. Esta relação da temperatura e umidade era

calculada por um software de umidade (Humicalc ® Versão 1.21w, Thunder Scientific Co., Albuquerque, NM).

Sakin, Kaymak - Ertekin e Ilicali (2009) utilizando sensores termopar tipo J (Ferro - Constantan), em que os dados eram coletados com Hanna HI 98804 (K, J, T - Type Thermocouple Printing and Logging Thermometers), verificaram os coeficientes na transferência de calor por convecção e radiação na superfície dos fornos tipo túnel.

Nayak, Kumar e Mishra (2012) utilizaram um controlador digital (DIGITAL PID CONTROLLER MASIBUS 5030), um sensor termopar tipo S (Platina Rh 10% Platina), um rele de contato (SIEMENS 4 NO/ 4NC) e um ventilador (pequeno) para calibrar e controlar os sensores termopar em fornos usando um controlador digital.

2.3 Termopares

Segundo Moreira (2002) os termopares são os sensores de temperatura mais utilizados em fornos tipo túnel, pois não precisam de fonte de alimentação dedicada, tem uma boa confiabilidade e simplicidade operacional. Além de ter baixo custo operacional, são duráveis, podem atuar em temperaturas elevadas e tem grande potencial termoelétrico.

Segundo Furukawa (2012) o termopar é um transdutor formado por uma junção de dois metais diferentes, através de uma solda ou torcendo as pontas desses materiais. Os seus conceitos básicos foram descobertos em 1821 por Thomas Johann Seebeck, que verificou que um metal gera uma tensão quando submetido a um gradiente de temperatura e se unirmos dois metais diferentes, eles gerarão tensões diferentes e a diferença gerada poderá ser medida, e o gradiente de temperatura será proporcional. Mas se unir dois metais iguais, a tensão gerada por um dos metais irá cancelar a outra tensão (TERMOPARES, 2013).

Examinando o princípio de *Seebeck*, fica claro que os termopares somente medem diferenças de temperatura, exigindo uma temperatura de referência conhecida para poderem fornecer leituras absolutas. A área de junção entre os dois metais é muito pequena, permitindo que a temperatura seja medida numa área muito pequena. Por terem uma massa muito pequena, podem responder muito rapidamente a variações de temperatura. Seu pequeno tamanho também significa

uma pequena capacidade térmica e, portanto, uma resposta rápida às variações de temperatura.

Os termopares são usados geralmente com circuitos de potenciômetros como condicionadores de sinais. Dependendo dos materiais utilizados como fios dos termopares, a faixa coberta poderá variar dentro de cerca de – 200 a 1700 °C (BOSTON, 2005).

A Tabela 1 indica os tipos de sensores termopar mais utilizado no mercado.

Tabela 1: Tipos de sensores Termopar convencional

<i>Tipo</i>	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Referência</i>	<i>Bitola AWG</i>	<i>Intervalo em °C</i>
T	Cobre	Constantan	TP – 16	16 (1,29 mm)	+ 300 a 1700
J	Ferro	Constantan	JN – 08	08 (3,26 mm)	- 200 a 750
J	Ferro	Constantan	JN – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 750
E	Chromel	Constantan	EN – 08	08 (3,26 mm)	- 200 a 900
E	Chromel	Constantan	EM – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 900
K	Chromel	Alumel	KN – 08	08 (3, 26 mm)	– 200 a 1250
S	Platina Rh 10%	Platina	SP – 24	24 (0,50 mm)	0 a 1450
S	Platina Rh 10%	Platina	SP – 27	27 (0,35 mm)	0 a 1450
R	Platina Rh 13%	Platina	RN – 24	24 (0,50 mm)	0 a 1450
R	Platina Rh 13%	Platina	RN – 27	27 (0,35 mm)	0 a 1450
B	Platina Rh 30%	Platina Rh 6%	BN – 24	24 (0,50 mm)	+ 300 a 1700
N*	Nicrosil	Nisil	NP – 08	08 (3,26 mm)	- 200 a 1350
N*	Nicrosil	Nisil	NP – 14	14 (1,63 mm)	- 200 a 1350

Para Nayak (2012), em aplicações industriais em um forno túnel é imprescindível estabelecer os valores corretos da temperatura e ajustar o seu processo, para evitar possíveis falhas ou problemas ao sistema. Os instrumentos de temperatura como pirômetros de radiação, termômetros analógicos ou digitais e termopares poderão ser utilizados para a calibração da temperatura. A medição irá ajustar os parâmetros iniciais do sistema, predeterminando os valores correspondentes para o bom funcionamento do sistema.

A Figura 7 ilustra o gráfico dos tipos de termopares mais utilizados no mercado, com a relação entre a F.E.M. (Força Eletromotriz) (mV) e a Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). A F.E.M. (mV) está no eixo "Y" e a Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) está no eixo "X", indicando a faixa de trabalho de cada termopar.

Figura 7: Gráfico de variação da F.E.M.(mV) e a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

A maioria dos países industrializados utilizam os mesmos padrões de composição e números de "tipo" listados na Figura 7. Designações e codificação de cores variam de acordo com o padrão nacional. Cores do revestimento são usadas para diferenciar os tipos de termopares.

Para acompanhar o desenvolvimento tecnológico, adotaram-se normas técnicas para manter e padronizar uma série de itens, como os sensores termopar. Criou-se uma série de normas e padronizações, cada uma atendendo uma dada região e países.

Como um dos participantes, o Brasil por meio da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) está diretamente interessado no desdobramento deste assunto e vem adotando tais especificações como Normas Técnicas Brasileiras.

A Tabela 2 resume as Normas Internacionais de Designação atualmente mais importantes em uso:

Tabela 2: Normas internacionais de Designação

<i>Normas</i>	<i>Origem</i>	<i>T/C STANDARD</i>
ISA	AMERICANA	ANSI MC96-1-82
DIN	ALEMÃ	DIN 43710
JIS	JAPONESA	JIS C1602
BS	INGLESA	BS4937
UNI	ITALIANA	NF C42-321
NFE	FRANCESA	CTI - UNI 7938
IEC	INTERNACIONAL	584-1: 1977
ANSI	AMERICANA	ANSI MC96-1-82

Fonte: TERMOPARES (2014)

2.4 Redes de comunicação sem fio

O crescimento na produção da indústria de alimentos nos últimos tempos tem permitido a aquisição de novas tecnologias para atender demanda do mercado (OLIVEIRA et al., 2009).

Segundo Cassiolato (2006) a integração entre os elementos que compõem uma linha de produção deve ser muito bem planejada para evitar riscos em uma parada. O desenvolvimento de uma tecnologia capaz de administrar um sistema de produção, através de uma rede de comunicação de dados em larga escala, que controle sensores, circuitos de processamento e atuadores, em tempo real é muito importante.

Para Ginatto (2013) para que a monitoração de uma rede de dados possa ser bem sucedida e cumprir os objetivos e metas pré-determinadas para a indústria de produção de alimentos o projeto deverá passar por um controle nas mudanças de

escopo, analisando os riscos, o treinamento e a comunicação entre os envolvidos, a administração dos produtos, software e serviços.

As redes sem fio tem sido determinantes no desenvolvimento e na monitoração de uma linha de produção, quando apresenta alguns desafios como área de difícil acesso, custo operacional, ambientes tóxicos, temperaturas adversas, mobilidade dos equipamentos ou monitorar fenômenos da natureza (CASSIOLATO, 2006).

Com este avanço nas redes de comunicação em uma linha de produção, visando uma redução de custo e a facilidade de operação, a rede de comunicação sem fio tem atingido bons resultados. Os sistemas sem fio removem barreiras nas soluções, oferecendo acesso a informações que antes não eram alcançadas. Essa interação em uma linha de produção vem aumentando a velocidade de comunicação e a confiabilidade nos processos industriais (LUGLI et al., 2012).

Loureiro, et al. (2009) experimentaram o emprego de novos materiais e tecnologias na comunicação de dados e obtiveram um bom resultado no processamento de sinais com o uso dos sistemas eletromecânicos (MEMS – Micro Eletro - Mechanical Systems). Este sistema tem estimulado o desenvolvimento de uma comunicação entre sensores sem fio conhecidos como sensores “inteligentes”. O termo “sensor inteligente” se refere a um chip que pode controlar vários sensores ao mesmo tempo, e que podem atuar nas áreas ligadas nos processos físicos, químicos, biológicos, dentre outros.

Para Yohan (2012) as redes sem fio surgiram inicialmente como complemento as redes cabeadas, possibilitando um maior alcance por meio das chamadas Wireless Local Area Networks (WLANs). A concepção do sistema eletrônico para o mercado de automação, Carvalho et al.(2012) tem como base as seguintes exigências:

- a) Redução de custos para os sistemas industriais;
- b) Facilidade de manutenção e instalação;
- c) Desenvolver novas aplicações na linha de produção;
- d) Adquirir parcerias para suprimentos e novas tecnologias;
- e) Possibilidade para atualizar o sistema de automação.

Kotviski (2009) verificou que as redes Ad Hoc não precisam de um ponto de acesso como roteador ou qualquer outro dispositivo para encaminhar a comunicação

entre eles. Neste tipo de rede, os computadores podem se comunicar diretamente entre si permitindo maior flexibilidade. Em algumas redes Ad Hoc, os hosts poderão ter uma interface externa permitindo uma ligação com a internet. Esta rede apresenta baixo custo operacional, fácil instalação, boa flexibilidade e facilidade de conexão com novos dispositivos. Ela tem grande atuação em equipe de manutenção industrial, em equipes de operações especiais, entre outros.

A rede RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) é uma rede muito emergente com muitas aplicações de conectividade. Bu, Shengrong e Naghdy (2005) verificaram que esta rede pode ser constituída por uma grande quantidade de dispositivos formando os nós sensores. Estes nós permitem a troca de informações distribuindo entre todos os nós que estão nesta rede até atingir o destino final. A implantação ou instalação desta rede ocorrerá de maneira aleatória na área destinada a ela. Os nós sensores são geralmente espalhados por uma área de difícil acesso e com grandes dimensões, permitindo que a configuração para esta rede seja dinâmica.

Segundo Ramanathan et al. (2006), Nachman et al. (2005), Krishnamurthy et al. (2005), Delicato et al. (2004), Howard et al. (2002), Liu et al. (2002), Mainwaring et al. (2002), Akyildiz et al. (2002), Cerpa et al. (2001), Estrin et al. (1999), esta rede RSSF poderá atuar no monitoramento de sistemas de segurança, automação predial e industrial, exploração de petróleo, manutenção preventiva de máquinas, robótica, meteorológicas, entre outros.

No meio industrial podemos utilizar vários protocolos de redes sem fio, com finalidades distintas, levando em consideração: a frequência de operação, distância dos equipamentos, taxa de transmissão, número de pontos na rede e a segurança dos dados (CARVALHO et al., 2012).

No final da década de 1990, formou-se um consórcio internacional de especialistas em engenharia, o IEEE, onde começaram a desenvolver padrões para as redes sem fio para as indústrias, promovendo a interação entre as redes de comunicação. Com a tecnologia Wi – Fi, criou-se alguns protocolos que operam em faixas de frequência de 2,4 GHz ou 5 GHz, e transmitindo a velocidades superiores ou iguais a 11Mbps, permitindo aplicar em ambientes industriais, e na área comercial, onde será necessário obter a licença da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) (LUGLI e SOBRINHO, 2012).

Lugli e Sobrinho (2012) verificaram que as redes sem fio têm muitas aplicações no setor comercial e industrial, mas mesmo seguido o padrão IEEE elas

podem ser mais lentas comparando-se com as redes cabeadas. Devido a algumas interferências dos equipamentos, localização dos dispositivos, a proteção dos dados, entre outros.

A Tabela 3 indica as principais tecnologias de rede sem fio mais utilizadas para a automação

Tabela 3: As principais tecnologias de redes sem fio utilizadas para automação

<i>Norma IEEE</i>	<i>802.15.1</i>	<i>802.11b</i>	<i>802.15.4</i>	<i>802.15.4</i>	<i>802.15.1</i>
<i>Nome de mercado</i>	Bluetooth	Wi – Fi	ZigBee	Wireless Hart	WISA
<i>Frequência de operação</i>	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
<i>Aplicação principal</i>	Eliminar a fiação atual	Ethernet industrial	Controle e monitoração	Medições de processos e controle	Interface, sensores e atuadores
<i>Taxa de comunicação</i>	1000 - 3000 Kbps	11000 Kbps	20 – 250 Kbps	11000 Kbps	1000 Kbps
<i>Distância alcançada em linha reta (m)</i>	30 (classe 2) 100 + (classe1)	100 + (com antenas)	30 – 70, 100 (c/ Amplificador externo)	100, até 2000 (com repetidor)	5 m (ambiente industrial, com 10 m)
<i>Número de dispositivos</i>	7	32	2 * 64	250	120
<i>Autonomia de baterias</i>	1 a 7	0,5 a 5	100 a 1000 ou mais	3,5 anos c/ taxa de transferência de 30 min	3 a 4 anos
<i>Consumo na transmissão</i>	45 mA (classe 2) < 150 mA (classe 1)	300 Ma	30 mA	150 – 300 mA	100 mA
<i>Tecnologia de esp. Espectral</i>	FHSS	DSSS	DSSS	FHSS/DSSS	FHSS/ DSSS
<i>Vantagens relativas</i>	Custo e flexibilidade	Velocidade e flexibilidade	Potência e custo	Flexibilidade, potência e velocidade	Velocidade e custo
<i>Conveniência para controle e supervisão</i>	Baixa (boa média,mas com conexão inicial lenta)	Baixa (taxa alta, mas com conexão inicial lenta)	Baixa (bom compromisso entre taxa e custo de conexão)	Alto (bom compromisso entre taxa e custo de conexão)	Alto (boa taxa e custo de conexão)

Fonte: LUGLI e SOBRINHO (2012)

Mainwaring *et al* (2002) fizeram um monitoramento do habitat de uma redes de sensores sem fio (RSSF), verificando se eles eram capazes de fornecer as

medições e informações corretas e mais detalhadas, do que usando os instrumentos de medição mais tradicionais. Eles aplicaram um algoritmo para monitorar a vida útil das baterias, a eficiência no envio das informações, o tempo de resposta, as alterações no ambiente de teste e o desempenho da própria rede.

Silva (2006) destaca que a rede RSSF é uma tecnologia nova e emergente, mas com boa conectividade e muitas aplicações industriais de petróleo e gás. É uma tecnologia de informações que pode monitorar equipamentos de instrumentação de maneira muito simples, comparando com outras tecnologias de rede sem fio. Mas o seu desafio ainda está relacionado à segurança da informação, com o limite físico nos contatos dos sensores, a memória, dispositivos de transmissão, bateria e processamento, são componentes que possuem certas limitações.

Arthas (2012) em sua pesquisa relatou que para medir os instrumentos que estão instalados em locais de difícil acesso, era necessário instalar uma rede sem fio, por ser mais econômica e fácil de administrar. A rede é dividida em nós sensores sendo muito importantes para os equipamentos de medição. Eles são dispositivos para aplicação em todos os ambientes em que há interesse em controlar processos, medir a energia consumida, entre outras atividades.

Silva (2006) comentou que os nós sensores em condições em que o suprimento de energia não for suficiente para o nó, ele poderá parar a transmissão de dados, perdendo o sinal da rede. A rede irá perder sensivelmente sem este nó e isto deverá ser levado em consideração para o bom desempenho da rede e o seu acesso deverá ser mais rápido e fácil, evitando paradas no sistema.

2.5 Módulo U-BEE

O módulo U-BEE é uma das soluções para trabalhar com rede sem fio, atualmente com produção nacional reduzindo os custos iniciais com a instalação deste módulo. Por ser muito versátil, este módulo apresenta baixo consumo de energia, tem um alto rendimento na maioria das aplicações e atende as normas IEEE 802.15.4 e na banda de frequência ISM 2,4GHz (FRACTUM, 2013).

O módulo requer mínimo consumo para operação e oferece comunicação e troca de dados entre dispositivos de forma segura. A interface é feita com o host através das portas serial assíncrona ou a interface USB (RS – 232 ou RS - 485). Por padrão este módulo trabalha no modo modem, neste caso os dados serão

recebidos e será transmitido em RF. O empacotamento dos dados será armazenado no buffer DI e se a transmissão dos dados começar a ficar mais lento, ele poderá armazenar as informações até atingir o tempo limite, depois o Módulo refaz o empacotamento desses dados e enviará ao seu destino para não ocorrer um overflow. O módulo U-BEE foi desenvolvido para trabalhar em diversos campos de aplicação como: hospitais, indústrias alimentícias, indústria farmacêutica, restaurantes, entre outras (FRACTUM, 2013).

Abaixo a Tabela 4 resume as especificações técnicas deste módulo:

Tabela 4: Especificações técnicas do módulo U-BEE

Desempenho	
Indoor/ Centros Urbanos -	50m (antena Wipe)
Visada Direta -	150m (antena Wipe)
Potencia máxima de saída de transmissão –	1.25MW (+1 dBm)
Taxa de Dados RF –	250 Kbps
Taxa de Dados Seriais (Configurável por Software) -	2400-115200 bps
Sensibilidade Receptor -	-95 dBm
Especificações Técnicas	
Tensão de Operação –	2.4-3.6V (3.3V típico)
Consumo de corrente (típico):	Modo TX – 33mA Modo RX – 28mA
Especificações Gerais	
Frequência de Operação –	ISM 2.4GHz
Dimensões –	36.06mm x 24,38mm
Faixa de temperatura: -	40 °C a +85 °C (Industrial)
Opções de Antena:	Monopolo (Wipe), Planar (Mini) SMA Reverso (PRO) para conexão de antena externa
Especificações de Rede (Networking)	
Topologias de Rede –	Ponto a ponto, Ponto - multiponto, Peer-to-peer, Mesh.
Canal de Operação Configurável por Software –	16 Canais sequenciais.
Opções de endereçamento –	Rede, Canal e Endereços.

Fonte: Fractum Automotive – RF – Microwave.

Este módulo pode ser acoplado aos sensores para medições de temperatura e umidade. Possui alcance aproximado de 70 metros com o auxílio de roteadores e permite uma rede com 10 roteadores e 90 sensores; possui drives para Windows XP/ 7/ 8 e Linux; tem um regulador integrado de 3.3 V e poderá ser acoplado aos pinos de um hardware externo (FRACTUM, 2013).

Os sensores UBEE operam com protocolo ZigBee e também está no grupo de sistemas de curto alcance onde se enquadra o Bluetooth (IEEE 802.15.1), em que o monitoramento de sensores não exigem altas taxas de transferência de dados. Quando este módulo trabalha com o protocolo Zigbee, ele pode operar em frequências distintas como 868 MHz (20 Kbps), 915 MHz (40 Kbps) e 2,4 GHz (250 Kbps), com drives menores quando comparados aos que utilizam Bluetooth.

Nota-se que existe um crescente aumento no número de investigações científicas e desenvolvimento tecnológico visando entender o comportamento de variáveis do processo que envolve a produção de alimentos assados bem como aumentar a qualidade tanto do controle de fabricação quanto da qualidade do alimento final. Neste cenário, para as indústrias que usam forno tipo túnel, fica claro que a problemática de entender o comportamento térmico de tais fornos é crucial para agregar tecnologia e aumentar o controle sobre as variáveis que envolvem o processo de fabricação de alimentos assados em fornos tipo túnel.

3 OBJETIVO

Este projeto tem como objetivo desenvolver uma metodologia para levantamento e visualização espaço-temporal do perfil de temperatura nas zonas de aquecimento de um forno tipo túnel instalado em uma mini linha experimental na produção de alimentos assados, transmitindo os dados por meio de uma rede de comunicação sem fio com o protocolo ZigBee.

Para este fim, os seguintes objetivos específicos serão executados:

- a) Condicionamentos do sinal dos termopares usando AD595;
- b) Calibração dos sensores termopar;
- c) Medida dos perfis de temperaturas nas zonas de aquecimento;
- d) Avaliação do perfil térmico nas zonas de aquecimento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Montagem elétrica do forno e as zonas de aquecimento

Para a realização deste trabalho foi disponibilizado uma mini linha experimental de produção de alimentos crocantes, nas dependências da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos na Universidade de São Paulo no Laboratório de Física Aplicada e Computacional, em Pirassununga/ SP.

A Figura 8 ilustra a mini linha experimental na produção de alimentos crocantes.

Figura 8: Vista do forno tipo túnel da mini linha experimental

Esta mini linha experimental possui um forno tipo túnel com três zonas de aquecimento, esteira, misturador, rolo de prensa, farinógrafo e laminador. Foi utilizado para a pesquisa apenas o forno tipo túnel, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9: Disposição das resistências no forno

O forno possui em sua estrutura 3 m de comprimento por 0,5 m de largura, medindo internamente na largura 0,4 m, altura de 0,4 m e 2,0 m de comprimento. O isolamento térmico é composto por lã de rocha e tijolos refratários.

O forno possui um painel elétrico em que estão instalados todos os componentes elétricos e eletrônicos. Ele foi instalado em uma das extremidades no

forno, para facilitar o acesso aos comandos deste painel. A Figura 10 ilustra a localização do painel elétrico.

Figura 10: Painel elétrico do forno

No painel elétrico foi instalado um disjuntor trifásico de 100 A, fornecendo a energia para o sistema de controle através de cabos de 10 mm², de cobre, isolados e flexíveis, e sua tolerância técnica é de 750 V a 70 °C; este cabo possui proteção para não propagar o fogo (PEREIRA, 2012). Em seguida outro contator trifásico de 80 A foi instalado para a distribuição ao sistema de aquecimento, inversor de frequência, placa de circuito impresso da central de controle, e o sistema de alimentação da massa para a fabricação de biscoitos, por meio de outros 06 (seis) contadores elétricos de 63 A.

Estes contadores são responsáveis por energizar as resistências das zonas de aquecimento (Figura 11), com cabos de cobre flexível de 4 mm².

Figura 11: Vista parcial do painel elétrico

Segundo Pereira (2012), este forno tem capacidade de atingir temperaturas acima de 200 °C. O número de resistências instaladas são 16, sendo 8 na parte superior e 8 na parte inferior, elas tem o formato de “W”, com a potência estimada em cada uma de 1200 watts.

Seguindo a determinação e os procedimentos da norma técnica NBR 5410 (instalações Elétricas de baixa tensão), segue as seguintes recomendações:

➤ **Para os cálculos dos cabos para a ligação das Resistências R1 e R6:**

$$P = 8 \times 1200 \text{ W}; P = 9600 \text{ W}; i = 9600 \text{ W} / 220 \text{ V} = 43,63^a$$

E o cabo indicado é: 10mm².

➤ **Para o cálculo dos setores com três resistências:**

$$P = 3 \times 1200 \text{ W}; P = 3600 \text{ W}; i = 3600 \text{ W} / 220 \text{ V} = 16,36^a$$

E o cabo indicado é: $2,5\text{mm}^2$.

➤ **Para o cálculo dos setores com duas resistências:**

$$P = 2 \times 1200 \text{ W}; P = 2400 \text{ W}; i = 2400 \text{ W} / 220 \text{ V} = 10,90^{\text{a}}.$$

E o cabo indicado: $2,5\text{mm}^2$.

A

Figura 12 ilustra layout divisão das resistências em 3 zonas de aquecimento, sendo as zonas de pré - aquecimento, aquecimento e resfriamento.

Figura 12: Layout das zonas de aquecimento do forno

A zona 1 (um) é o pré-aquecimento com aquecimento no topo e outra no lastro, na zona 2 (dois) é o aquecimento com aquecimento no topo e no lastro e na zona 3 (três) é o resfriamento com aquecimento no topo e no lastro.

Para a realização deste trabalho era necessário verificar como estava distribuído às resistências que compõem cada zona de aquecimento. A Tabela 5 demonstra a divisão inicial da montagem do sistema elétrico.

Tabela 5: Divisão do sistema elétrico nas zonas de aquecimento

Nº da zona	Setor	resistência nº	Topo/ Lastro	Qde de resistências
1	pré-aquecimento	1	topo	3
1	pré-aquecimento	6	lastro	2
2	aquecimento	2	topo	3
2	aquecimento	5	lastro	2
3	resfriamento	3	topo	3
3	resfriamento	4	lastro	3

Na Figura 13 indica onde as resistências foram ligadas utilizando um barramento de cobre, condutores e isolantes seguindo os padrões estabelecidos pela ABNT NBR 5410 (instalações Elétricas de baixa tensão) (PEREIRA, 2012).

Figura 13: vista lateral com as respectivas zonas de aquecimento do forno

O controle do acionamento das resistências é feito por uma placa de circuito impresso, monitorado pelo software visual basic 6.0, que é responsável pelo controle do forno. Ele envia um sinal elétrico para os tiristores BT16A e optoacopladores

MOC3210, que por sua vez poderão ligar ou desligar os 6 contatores. Quando os contatores estiverem ligados eles posteriormente ligarão as resistências R1, R2, R3, R4, R5 e R6.

A Figura 14 ilustra a placa de circuito impresso com os tiristores e os optoaclopladores MOC3210 para ligar e desligar as resistências no forno.

Figura 14: Placa de controle dos componentes para o acionamento dos contatores do forno

Para corrigir a distribuição das resistências elétricas nas zonas de aquecimento, foi necessário adequar para uma nova estrutura. A Tabela 6 demonstra a nova divisão para a montagem do sistema elétrico, equalizando as resistências que estão localizadas no topo e no lastro do forno.

Tabela 6: Adequação na distribuição do sistema elétrico nas zonas de aquecimento

Nº da zona	Setor	resistência nº	Topo/ Lastro	Qde de resistências
1	pré-aquecimento	1	topo	3
1	pré-aquecimento	2	lastro	2
2	aquecimento	6	topo	3
2	aquecimento	3	lastro	3
3	resfriamento	5	topo	3

3	resfriamento	4	lastro	2
---	--------------	---	--------	---

A Figura 15 indica como as zonas de aquecimento ficaram após a adequação.

Entrada do forno

Saída do forno

4.2 Condicionamento do sinal dos termopares usando AD595

O monitoramento do perfil de temperatura nas zonas de aquecimento neste forno tipo túnel, foi feito por 6 sensores termopar tipo K (Chromel-Alumel) e enviado os valores em milivolts (mV) para serem convertido em temperatura (°C). Mas para que a medição de temperatura seja convertida para o sistema computacional, é necessário que este sinal elétrico passe por um instrumento eletrônico para fazer esta converção de sinal (ANDRÉ, MACEDO e TENÓRIO, 2010). Este instrumento eletrônico que converte o sinal elétrico dos termopares para o sistema computacional é um amplificador monolítico, modelo AD595.

Segundo Dionísio (2006) o condicionamento do sinal dos sensores termopar é enviado em milivolts (mV) para o amplificador, ele compensa a junção fria quando é utilizado os termopares tipo K (Chromel - Alumel), e converte o sinal elétrico em temperatura.

4.2.1 Amplificadores AD595

O AD595 é um amplificador monolítico completo, porque ele pode trabalhar como amplificador, como sensor de temperatura ou um controlador de temperatura com referência fria no sinal do termopar, principalmente o tipo K (Chromel - AlumeI) (ANALOG DEVICES, 2012).

O amplificador AD595 faz uma referência entre o ponto de gelo ou inicial, com um amplificador pré - calibrado para produzir um nível de referência. Ele pode ser um compensador de temperatura ambiente e também compensar a não linearidade do termopar, por meio da conversão de tensão para temperatura como um transdutor em graus Celsius (DIONISIO, 2006).

Para Ribeiro (2011) o AD595 é um amplificador que vem pré-calibrado do fabricante, ele tem como referência um sinal de 10 milivolts (mV) por graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ou seja, a cada grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) está medindo 10 milivolts (mV) na saída, que é uma tensão bem mais elevada do que aquela fornecida diretamente pelo termopar.

A tensão de saída do amplificador será de aproximadamente 0 V quando o termopar for submetido a uma temperatura de 0°C e de aproximadamente 12V quando o termopar estiver a temperatura de 1200°C .

A Figura 16 ilustra o diagrama funcional de blocos do AD595, como este amplificador monolítico é um instrumento completo, indicando os pontos de entrada, os pontos de compensação e as portas lógicas.

Figura 16: Diagrama funcional de blocos

O AD595 está instalado na placa de circuito impresso na parte central do painel elétrico, onde receberá todas as tensões enviadas pelos termopares. Como o amplificador está diretamente ligado ao termopar, ele converte o sinal vindo dos sensores (mV) para uma saída proporcional à temperatura medida no forno.

Ele foi utilizado neste projeto para amplificar a tensão de compensação dos 6 termopares, convertendo, assim, para um software de controle do forno. A Figura 17 ilustra a placa de circuito impresso com os AD595, o módulo UBEE, o PIC e a saída dos cabos dos sensores termopar.

Figura 17: Placa de controle do sistema de gerenciamento eletrônico do forno

A temperatura que foi medida no forno será indicada na tela de controle do sistema computacional, conforme a Figura 18. Nesta tela serão indicados todos os valores das temperaturas medidos pelos sensores termopar, facilitando o controle do perfil de temperatura em cada zona de aquecimento.

Figura 18: Layout do da tela do Software de Controle do forno

4.2.2 Calibração dos sensores termopar

O termopar é um sensor de temperatura muito utilizado em laboratórios de pesquisa e nas indústrias. A calibração deles é feita por uma comparação padrão ou ponto fixo de acordo com o tipo usado (modelo) e a faixa de temperatura que se pretende verificar (JIMENEZ E PIZA, 2013).

O padrão de referência para a calibração pode ser um conceito de medição utilizada para aferir um sistema ou instrumentos de medição, verificando uma grandeza e os possíveis erros.

Segundo Fidélis (2006) o padrão de referência pode ser os principais conceitos e testes pesquisados em institutos ou laboratórios especializados como o Inmetro no Brasil, PTB na Alemanha, o NIST nos Estados Unidos entre outros. O Instituto Internacional NIST (National Institute of Standards Technology) (2006) tem como referência para a calibração dos termopares o comprimento dos cabos e a

tabela de ponto fixo sugerido pela ITS-90 (Escala Internacional de Temperatura de 1990).

O comprimento dos cabos utilizados para calibração dos termopares pelo Instituto NIST, devem ser:

- a) Para os termopares dos tipos R, S, N, J, K, T, E: 70 cm.
- b) Para o termopar tipo B: 80 cm.
- c) Para o termopar tipo W: 100 cm.

A Tabela 7 indica a escala de comparação de temperatura para calibração dos termopares tipo K ou N nos pontos de gelo ou fixo sugerido pela ITS – 90 utilizada pelo instituto NIST (2006).

Tabela 7: Temperatura para Calibração dos termopares tipo K ou N no ponto fixo

Temperatura ° C	$U (k = 2)$, mV	Temperatura ° C	$U (k = 2)$, mV
-200	0,4	300	0,3
-100	0,2	400	0,4
0	0,02	419,527	0,4
100	0,1	500	0,5
200	0,2		

Fonte: NIST (2006)

O método padrão utilizado pelo instituto NIST (2006) ou outro instituto não seria indicado por possuir características próprias. O padrão de referência neste caso deve ter um padrão específico para ser utilizado somente neste forno, onde as dimensões dos cabos, sensores termopar e o forno possuem tamanhos diferentes para serem calibrados para uma escala específica.

Este forno possui 3 (três) zonas de aquecimento, com 2 (dois) sensores termopar tipo K (Chromel – Alumel) em cada zona de aquecimento. Eles enviarão os valores da medição de temperatura para os amplificadores monolíticos AD595.

Segundo a ANALOG DEVICES (2012) o amplificador monolítico AD595 esta pré-calibrado para o termopar tipo K.

A calibração dos sensores termopar tipo K para este forno foi feito através de um método padrão de referência, ou seja, um método padrão para verificar por meio de instrumentos de precisão e confiáveis os valores medidos por este sistema padrão para os sensores termopar tipo K (Chromel – Alumel).

Outro fator importante na calibração é o tamanho e o tipo do cabo usado para enviar o sinal do sensor termopar ao AD595, neste experimento o cabo é específico para o sensor termopar, apenas para alguns sensores o tamanho poderá determinar uma variação nos valores medidos de temperatura.

A Figura 19 contém o modelo do cabo indicado para sensor termopar tipo K: “cabo flexível tipo “K”; 2 x 24; AWG PVC x PVC ; norma - ANSI (red. & yellow).

Figura 19: cabo flexível “K” padrão ANSI (red. & yellow)

Para fazer esta calibração no LAFAC, foram retirados os 6 sensores termopar, os cabos flexíveis dos termopares e a placa de circuito impresso com os amplificadores AD595, conforme a Figura 20.

Figura 20: Vista lateral do forno com os seis sensores termopares

Ao retirar os sensores termopar das zonas de aquecimento do forno e examiná-los, verificou-se a necessidade de substituir a isolação dos mesmos. A opção foi colocar a isolação com tubos termo retrátil, devido a sua versatilidade, baixo custo e tolerância a temperatura de aproximadamente 180 °C.

Os tubos termo retráteis foram instalados com 3 unidades em cada termopar visando garantir mais segurança para fazer a calibração e posteriormente a medição em aquecimento.

A Figura 21 destaca o sensor termopar tipo K e os tubos termo retrátil de cor branca e laranja para serem instalados.

Figura 21: Termopar tipo k e os tubos termo retrátil sobre a bancada

Para calibrar os sensores termopar tipo K, foi necessário utilizar os seguintes instrumentos eletrônicos do LAFAC:

- 01- Recipiente térmico do laboratório LAFAC;
- 02- Suporte a placa de circuito impresso;
- 01- Multímetro digital de mesa Minipa, modelo: MDM – 8045A;
- 01- Termômetro digital Minipa, modelo: MTH – 1362 (Thermo Hygrometer);
- 01- Extensão de cabos para ligar o filtro de linha com várias tomadas;
- 02- Pontas de prova para o multímetro Minipa (MDM – 8045^a);
- 01- Ponta de prova do termômetro Minipa (MTH – 1362), tipo K;
- 01- Filtro de linha CA para ligar a placa de circuito impresso e o multímetro;
- 06- cabos flexíveis dos sensores termopar tipo K, norma ANSI.
- 01- Notebook DELL; modelo: Inspiron N5110; Memória RAM: 4,0GB;
Processador: Intel® Core™ i5 – CPU - 2.30GHz. Sistema Operacional 64 Bits.

A Figura 22 mostra os instrumentos eletrônicos colocados sobre a bancada para iniciar a calibração dos termopares.

Figura 22: Instrumentos eletrônicos utilizados para calibrar a temperatura dos sensores termopar

Os 6 termopares estavam bem isolados e nesse momento foram posicionados e ajustados junto com a ponta prova do termômetro digital Minipa (MTH – 1362). Os termopares e a ponta de prova do termômetro Minipa (MTH – 1362) são do tipo K (Chromel e Alumel). Para calibrar estes instrumentos, há a necessidade deles estarem no mesmo ponto de referência para fazer a medição da temperatura, conforme a Figura 23.

Figura 23: Conjunto de sensores termopar e a ponta de prova do termômetro digital Minipa

No início da calibração, foi verificado novamente o posicionamento do conjunto dos termopares e a ponta de prova do termômetro digital dentro do recipiente térmico, e foi adicionado água fria com a temperatura inicial de 0 °C (zero grau) no interior do recipiente térmico.

A Figura 24 indica os sensores termopar e a ponta de prova do termômetro digital Minipa no interior do recipiente térmico.

Figura 24: Recipiente térmico com os termopares e a ponta de prova do termômetro digital

O método usado para obter o padrão de referência ou o padrão de trabalho na calibração destes sensores termopar, foi monitorar a variação da Temperatura (°C) com a variação da Tensão (mV) dos sensores termopares. No recipiente térmico, inicialmente a água utilizada estava com a temperatura de 0 °C (zero grau), e com esta variação de tempo (min), ela foi alterando a temperatura (°C) e consequentemente a tensão (mV) gerada nos termopares.

A partir deste instante era verificado os valores da *temperatura* (°C) no termômetro digital, e o valor da *tensão* (mV) na tela do software que monitorava o forno. Esta calibração foi feita 5 vezes. A calibração com o software foi realizada 4 vezes e a última foi com uso do multímetro digital, medindo nas pontas de teste do circuito impresso, e nos conectores de entrada dos cabos dos sensores termopar. A temperatura era medida com o Termômetro digital.

Este monitoramento foi verificado a cada 2 minutos, e se estendeu até que a temperatura da água atingisse a temperatura ambiente, sem que se alterasse por mais de 5 minutos sequenciais.

A Figura 25 indica o valor da temperatura (°C) e umidade no interior do recipiente térmico, medidos com o termômetro digital Minipa, em um instante da calibração dos sensores.

Figura 25: Instrumentos eletrônicos usados na calibração dos sensores termopar.

O AD595 é um amplificador pré - programado pelo fabricante para receber os valores das medições feitas pelos termopares, amplificando estas medições de temperatura. Os valores das medições poderão apresentar um erro de desvio na saída do mesmo, o que pode ocasionar o deslocamento de 11 milivolts (mV) para este amplificador e a saída será a equação:

$$\text{AD595 output} = (\text{Tensão tipo K} + 11\mu\text{V}) * 247,3 \quad (\text{unidade= mV}).$$

ou

$$\text{Tensão tipo K} = (\text{AD595 output} / 247,3) - 11\mu\text{V} \quad (\text{unidade= mV}).$$

Onde:

AD595 output = é o valor da saída da tensão no AD595.

Tensão tipo K = valor da saída da tensão no termopar tipo K.

$11 \mu\text{V}$ = valor constante de deslocamento para o termopar tipo K.

$247,3 \mu\text{V}$ = valor da constante para calcular o ganho no termopar tipo k.

A metodologia permitiu fazer a calibração dos 6 sensores termopar, utilizando a equação fornecida pelo fabricante do amplificador monolítico AD595 e a calibração padrão, com o monitoramento da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e a tensão (mV), em que os resultados dessa medição permitiu verificar melhor o comportamento dos termopares.

4.3 Experimentos de aquecimento

Ao término da calibração dos sensores termopar para obter as equações de linearidade, iniciou-se a recolocação dos 6 sensores termopar, os cabos dos termopares e a placa de circuito eletrônico nos seus lugares. Antes de começar a medição de temperatura dos sensores termopar nas zonas de aquecimento, foi preciso verificar o isolamento de todos os instrumentos novamente para evitar possíveis falhas ou erros de medição.

A opção por utilizar os tubos termo retrátil foi devido ao espaço físico ser muito pequeno e quando eles foram retirados dos seus lugares, não foi possível usar o mesmo isolante. As Figura 26 e 27, mostram os locais dos sensores e seus cabos nos seus lugares de medição no forno.

Figura 26: Vista lateral do forno com os termopares na zona 3 e os cabos

Figura 27: Sensores Termopar na zona 1(A) Sensores termopar na zona 2(B)

A Figura 28 mostra o sensor termopar nº 5 (topo) instalado no interior da câmara de aquecimento do forno, abaixo das resistências elétricas e acima da esteira transportadora.

Figura 28: Sensor termopar instalado no topo do forno

A Figura 29 ilustra o sensor termopar nº 3 (lastro) instalado no interior da câmara de aquecimento do forno, acima das resistências elétricas e abaixo da esteira transportadora.

Figura 29: Sensor termopar instalado no lastro do forno

Após a montagem dos instrumentos eletrônicos utilizados na calibração dos sensores termopar, começou os testes com as zonas de aquecimento do forno e o procedimento inicial foi ligar o forno e verificar se a alimentação da energia elétrica estava funcionando bem.

Toda a comunicação e os comandos de operação da mini linha são feitos pelo software de controle desenvolvido em linguagem Visual Basic 6.0. Os comandos são feitos através de uma rede de comunicação sem fio, que conectada aos nós sensores com os módulos U-BEE, utilizando o protocolo de comunicação ZigBee (PEREIRA, 2012).

Quando ligado o software de controle do forno, à tela de comando da mini linha, indica a leitura das temperaturas, o controle da esteira e o comando de ligar ou desligar as resistências, bem como as funções de comandos do misturador, velocidade da esteira e outros comandos que foram utilizados na mini linha de produção. A Figura 30 mostra a tela de comando do software na linguagem Visual Basic 6.0.

Módulo de controle - UBEE

Nenhum nó identificado

Nó selecionado: **10**

Estado: Conectado

Modo: TR

Enviar Msg. Teste

Porta: Com 10

Conectar Nó

Identificar Nós

Con. serial

Coordenador: [Conectado]

Misturador - (Nó 5)

Ctle. Auto.

Res.: 300

Misturador ON

Misturador OFF

Coleta corrente

Gravar

Gráfico >>>

DV(x) - DV(x-180)

Jan.: 180

Esteira2 - (Nó 11)

Esteira ON

Esteira OFF

Desce Misturador

Sobe Misturador

Desce Pistão

Sobe Pistão

Vel. faca de corte: 5

Controle do Forno - (Nó 10)

Resistências

Liga Horário

Liga A. Horário

PARA

Esteira

Temperatura

Gravar

0,3742	0,3645	0,3548
0,3484	0,3323	0,3484

Coleta

C:\Users\LAFAÇ\Desktop\Teste_Temp_Forno_V2

Temp.

Corr.

Figura 30: Tela de comando do software de controle da mini linha experimental

Segundo Pereira (2012) os comandos de operação no controle da mini linha também incluem alguns dispositivos eletrônicos responsáveis por:

- O controle do inversor de frequência do modelo CFW-08 (WEG, 2011), para a movimentação da esteira;
- Controlar a unidade de processamento e o módulo de rádio frequência UBEE.
- Um misturador Braesi, modelo AELI-715, para 8 Kg de massa pronta.
- Extrusora de corte e separação do biscoito.
- Esteira separadora para biscoito.
- Coletar as temperaturas com os 6 sensores termopar tipo K.
- Acionamento de 6 contadores para ligar as resistências no forno.

Nesse momento todos os instrumentos eletrônicos estavam instalados nos seus lugares e iniciou-se a medição de temperatura para verificar o comportamento térmico em cada zona de aquecimento começou por estabelecer a conexão e a comunicação do software de controle com o forno. Com a comunicação estabelecida todo o monitoramento da temperatura foi feito por sensores termopar, na

Figura 31 ilustra o esquema de distribuição de temperatura nas zonas de pré – aquecimento, aquecimento e resfriamento do forno, ou seja, neste esquema indica a distribuição correta de temperatura nas 3 zonas de aquecimento, sendo 3 na parte superior (topo) e 3 na parte inferior do forno.

Figura 31: Esquema de distribuição das zonas de aquecimento do forno

O processo de aquecimento no topo da zona 1 (um) foi monitorado pelo sensor termopar nº 1 (um), que verificou o perfil de temperatura nesta área de aquecimento. Durante este processo na medição de temperatura feito com o sensor termopar nº 1 (um), o tempo de aquecimento foi de 30 (trinta) a 40 (quarenta) minutos, em seguida foi necessário fazer o resfriamento e o tempo foi de aproximadamente de 60 (sessenta) minutos.

Este procedimento de verificação do perfil de temperatura foi realizado com as outras zonas de aquecimento instaladas neste forno tipo túnel, de forma individual. Em seguida realizou-se o teste com o monitoramento térmico com todas as resistências ligadas.

Com as medições das temperaturas feitas pelos sensores termopar, os perfis de temperatura nas zonas de aquecimento, serão modelados de acordo com a equação (1) abaixo:

$$\frac{dT(t)}{dt} = k(A(t) - T(t)) \quad (1)$$

Onde:

dT = derivada da temperatura no corpo.

dt = é a derivada do tempo.

K = é a constante do sistema.

$A(t)$ = é a área da superfície a ser transferida.

$T(t)$ = é a temperatura desse corpo no tempo t .

$A(t) = X_0\mu(t)$ corresponde ao gradiente térmico, onde a temperatura da resistência é maior que a temperatura do forno.

4.4 Uso dos instrumentos eletrônicos (AD595)

Os sensores termopar coletam a medição de temperatura nas zonas de aquecimento e envia para o amplificador monolítico *AD595* é responsável por amplificar o sinal que veio dos termopares em milivolts (mV).

Estes dados foram enviados para o microcontrolador PIC 16F877, que recebe os dados do *AD595* e encaminha a informação por meio do módulo de rádio frequência U-BEE. O módulo U-BEE processará a informação com o protocolo

ZigBee até outro módulo U-BEE que encaminhará ao software de controle da mini linha. A Figura 32 ilustra o layout da placa de controle eletrônico do forno.

Figura 32: Layout da placa de controle eletrônico do forno

O sistema de controle do forno foi um software desenvolvido na linguagem Visual Basic 6.0 e a comunicação do software de controle com o forno foi feito com o módulo U-BEE. O módulo U-BEE é um módulo transceptor RF (FRACTUM, 2011). A função deste módulo é coordenar, enviar e receber todas as informações dos sensores de medição e distribuir nesta rede de comunicação sem fio para outro módulo, com o protocolo ZigBee.

Todos os comandos do forno foram feitos pelo software, ao ser iniciado pelo computador é mostrado uma tela de comando, em que poderá ajustar qualquer parâmetro como ligar ou desligar uma resistência, a velocidade da esteira, coletar as temperaturas de todas as áreas de aquecimento entre outros. Mas quando foi realizado o monitoramento das medições de temperatura nas zonas de

aquecimento, foi necessário conectar o software e através dos módulos U-BEE estabelecer o controle do forno.

Foi informado ao software de controle o número da porta de comunicação sendo “COM 10”. A partir deste instante era verificado o número do nó sensor selecionado, o estado operacional, se estava conectado e o modo de transmissão dos arquivos utilizados pelo módulo U-BEE (PEREIRA, 2012). Quando foi necessário armazenar os dados coletados pelo software, ele pôde ser arquivado no modo texto (*.txt), em uma pasta no computador indicado pelo operador.

O amplificador monolítico AD595 é um instrumento eletrônico essencial para informar a temperatura do forno com os valores predeterminados, para evitar falhas, perdas na produção e tem um custo operacional baixo. A Figura 33 mostra os amplificadores AD595 na placa eletrônica de controle.

Figura 33: Placa de controle eletrônico com os amplificadores AD595

A análise do amplificador monolítico AD595 foi bem eficiente durante todos os testes feitos na calibração e no comportamento térmico. A rede de comunicação sem fio feita com os módulos U-BEE com o protocolo ZigBee, apresentaram a leitura dos dados coletados com um índice muito pequeno, ou seja, a leitura feita nos experimentos foi de 1 ponto a cada 1 segundo, e na leitura de um comportamento térmico no aquecimento do topo da zona 2, com a resistência nº 5 (cinco), o sensor

termopar nº 5 (cinco) apresentou um índice acima de 3000 pontos com 3000 segundos e os erros apresentados foram abaixo de 1%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados da calibração dos sensores termopar

Os dados obtidos durante o processo de calibração dos sensores termopares tipo K, foram ajustados contra uma referência de temperatura padrão. Os resultados dessa calibração permitiram gerar as retas de calibração dos sensores conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Calibração dos sensores termopar (padrão)

Sensor Nº	Equação de linearidade	Coeficiente de Correlação (R^2)
01	$y = 93,962 * x + 1,8397$	$R^2 = 0,9993$
02	$y = 92,257 * x + 0,3775$	$R^2 = 0,9993$
03	$y = 92,421 * x + 1,236$	$R^2 = 0,9997$
04	$y = 92,46 * x + 1,2454$	$R^2 = 0,9997$
05	$y = 91,2 * x + 1,8306$	$R^2 = 0,9995$
06	$y = 91,65 * x + 2,0639$	$R^2 = 0,9997$

As equações foram obtidas e usadas para transformar as saídas de tensão do sistema de media em temperatura. A

Figura 34 ilustra os gráficos da calibração obtidos.

Figura 34: Curvas de calibração dos sensores.

Utilizando a equação fornecida pelo fabricante do amplificador monolítico AD595 e os dados da calibração, compararam-se as curvas de calibração experimental com a sugerida pelo fabricante do AD595. A Figura 35 ilustra a diferença obtidas entre os dois procedimentos.

Figura 35: Gráfico comparativo entre os gráficos de calibração 1 e 2 com o sensor termopar 1 (um)

Kim, Gam e Kang (2002) pesquisaram as propriedades térmicas dos sensores termopar de diferentes fabricantes e recomendaram sempre fazer uma calibração padrão para evitar encontrar problemas com as propriedades que compõem os termopares. Esta afirmação está de acordo com os que foi observado durante a calibração dos sensores.

5.2 Adequação na rede elétrica

Quando o teste de aquecimento do forno foi iniciado, verificou-se por meio das medições da alimentação da tensão (V) e da corrente (A) para as resistências uma distribuição incorreta. Sendo necessário fazer uma alteração nesta distribuição.

A Figura 36 mostra as saídas T1, T2 e T3 do contator de 80 (A), para a distribuição aos 6 (seis) contatores de 63 (A) que poderá ligar e desligar as resistências do forno.

Figura 36: Painel elétrico com a antiga distribuição de energia para os contatores de 63 A

A distribuição da energia enviada aos 6 contatores responsáveis para o aquecimento do forno, apresentava a seguinte configuração:

- a) A saída T1: liga uma fase para os contatores de 1 a 4, que alimenta as resistências de 1 a 4.
- b) A saída T2: liga uma fase para o contator 5 que alimenta a resistência 5, como também faz a segunda fase na alimentação das resistências no topo das zonas de aquecimento do forno.
- c) A saída T3: liga uma fase para o contator 6 que alimenta a resistência 6, como também faz a segunda fase na alimentação das resistências no lastro das zonas de aquecimento do forno.

Foi alterada a distribuição da energia enviada aos 6 (seis) contatores de 63 (A), para a seguinte configuração:

- a) A saída T1: através de um pequeno barramento, liga uma fase para os contatores de 1 a 6 que alimenta as resistências de 1 a 6.
- b) A saída T2: será a fase comum para ligar as resistências na parte superior (topo) das zonas de aquecimento 1, 2 e 3;
- c) A saída T3: será a fase comum para ligar as resistências na parte inferior (lastro) das zonas de aquecimento 1, 2 e 3.

A Figura 37 mostra a atualização nas saídas T1, T2 e T3 do contator de 80 (A), para a distribuição aos 6 (seis) contatores de 63 (A), destacando na saída de T1 um pequeno barramento para a alimentação dos contatores de 1 a 6.

Saída T-1 e o mini barramento para contatores 1 a 6.

Figura 37: Painel de controle na nova configuração de distribuição de CA

Com os resultados obtidos na adequação da energia enviada aos 6 (seis) contatores responsáveis para o aquecimento do forno. As zonas de aquecimento estavam funcionando corretamente e não foi observado nenhum problema com a instalação elétrica do forno.

5.3 Usos dos dispositivos eletrônicos (AD595) e a rede de comunicação

A Figura 38 indica os pontos em foram instalados os diversos módulos U-BEE no forno juntamente com os dispositivos AD595.

Figura 38: Esquema de distribuição dos módulos U-BEE na mini linha experimental na produção de alimentos crocantes.

Fonte: PEREIRA (2012).

A Figura 39 mostra os gráficos com os resultados da calibração padrão, medida na zona 1 (um), com os sensores termopar 1 e 2.

Figura 39: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 1

A Figura 40 mostra os gráficos com os resultados da calibração padrão, medida na zona 2 (dois), com os sensores termopar 3 e 6.

Figura 40: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 2.

A Figura 41 mostra os gráficos com os resultados de calibração padrão, medida na zona 3 (três), com os sensores termopar 4 e 5.

Figura 41: Gráficos com a calibração medida nos sensores termopar tipo K na zona 3

Ao iniciar os testes com a medição de temperatura, foi avaliado a eficiência dos módulos U-BEE com todas as resistências ligadas, ou seja, todas as resistências estavam aquecendo ao mesmo tempo. Neste procedimento de ligar todos os componentes do forno e monitorar as 3 (três) zonas de aquecimento, foi possível observar perdas de dados e presença de artefatos medição de temperatura.

A Figura 42 mostra os pontos em que ocorreram erros na medição, mas esses pontos não prejudicaram o processo de monitoramento de temperatura nas 3 (três) zonas de aquecimento.

Figura 42: Gráficos com artefatos e ruídos durante a medição de temperatura nas zonas de aquecimento.

Analisando os gráficos apresentados na Figura 42, é possível verificar alguns pontos que se destacam na medição da temperatura (°C) com o Tempo (min). A leitura da temperatura em aquecimento apresentou erros de leitura, este erro foi ocasionado na transmissão dos dados pela rede sem fio, através dos módulos U-BEE com protocolo ZigBee.

Os erros observados nos gráficos foram artefatos medidos nestas zonas de aquecimento, os números de pontos por segundo coletados nesta medição foram de 1792 pontos por segundo ou 29 minutos e 85 segundos. O número de pontos que apresentaram erros (artefatos) foi aproximadamente 3 (três) pontos. Os erros correram nas 3 (três) zonas de aquecimento com os seus respectivos sensores termopar, portanto o percentual de erros foi de 0,1674 %, medidos em cada termopar, indicando portanto um valor inferior a 1% (um por cento).

Desta maneira a rede de comunicação sem fio, através dos módulos U-BEE apresentou um bom resultado na transmissão dos dados ao software de controle, utilizando a tecnologia ZigBee e demonstrando que o índice de possíveis erros ocorridos nesse monitoramento dos dados foi praticamente zero.

Segundo Buratti (2011) a transmissão instantânea tem uma taxa próxima a proporcionada pela taxa padrão e uma das grandes preocupações com os dispositivos que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 é o consumo de energia. Ele deve estar sempre ativo por curtos intervalos de trabalho e o restante do período ele deverá estar no estado Sleep, em que proporcionará um baixo consumo de energia. Este fato explica a baixa taxa de erro obtida uma vez que esta metodologia foi usada neste trabalho.

Tanto Gislason (2008) como Silva (2011) indicam o uso do protocolo ZigBee porque proporciona grandes vantagens quando comparada com uma rede cabeada, possui baixo custo, baixo consumo de energia e garante a interoperabilidade e os resultados obtidos nesta etapa do trabalho corroboram as afirmações destes autores.

5.4 Experimentos com aquecimento

A medição inicial de temperatura começou com a alimentação de todas as 6 resistências, distribuídas nas 3 zonas de aquecimento do forno. Durante o monitoramento de temperatura, foi observado o perfil de temperatura ao longo do tempo no interior do forno nas três zonas de aquecimento.

A Figura 43 mostra o perfil da temperatura nas três zonas de aquecimento com todas as 6 resistências fornecendo calor.

Figura 43: Gráfico do comportamento térmico com as 3 zonas de aquecimento do forno

Ao analisar o gráfico do monitoramento da temperatura em aquecimento, pode-se considerar que as resistências iniciaram o processo de aquecimento no mesmo instante. O processo de aquecimento foi monitorado até que todos os sensores estabilizaram, ou a derivada aproximou de zero, o que pelo gráfico ocorreu em torno de quinze minutos.

Para visualizar o perfil térmico do forno em função do tempo, espaço e temperatura foi criado um modelo de visualização ilustrado na Figura 44. Neste modelo de visualização o gráfico do perfil da temperatura medida nos sensores é posicionado em suas respectivas localização espacial dentro do forno. Este modelo de visualização permite a análise comparativa do comportamento temporal e espacial do perfil das temperaturas nas zonas de onde as resistências estão posicionadas e na figura as zonas com resistências acionadas estão em vermelho.

Figura 44: Perfil da temperatura nas zonas do forno com todas as resistências acionadas.

Em seguida foi medido o perfil das temperaturas ligando as resistências isoladamente ou em pares. Os gráficos de visualização resultante das diferentes combinações de resistências ligadas podem ser analisados nas Figura 45 à Figura 55.

Figura 45: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 1

Figura 46: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 2

Figura 47: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 3.

Figura 48: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 4.

Figura 49: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 5.

Figura 50: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 6.

Figura 51: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistências 1, 2, 3 e 6.

Figura 52: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistência 1,2,4 e 5.

Figura 53: Visualização do perfil da temperatura nas zonas do forno aquecido usando a resistências 3,4,5 e 6

A configuração experimental realizada permitiu também avaliar o perfil de resfriamento do forno. Este perfil de resfriamento pode ser visualizado no gráfico da Figura 54.

Figura 54: Visualização do perfil de resfriamento do forno

5.5 Modelo matemático

Para testar o comportamento da resposta impulsiva do sistema forno-sensor, os dados obtidos do sensor (neste exemplo o sensor 2) foram ajustados com a equação que representa a solução da equação 2. O impulso foi modelado como:

$$A(t) = X_0 u(t) \quad (3)$$

Onde:

$u(t)$ é uma função degrau unitário, X_0 uma constante a ser encontrada e modela o estado de equilíbrio do forno e t é o tempo de evolução do sistema.

Este impulso é baseado na hipótese de que a resistência elétrica do forno tem uma inércia térmica bem menor que a zona física do forno onde a mesma está inserida. Isto significa que a resistência aquece bem mais rápido que o forno e

portanto pode ser considerada como um degrau ou um impulso ponderado por X_0 , ou seja, ponderada pela temperatura de equilíbrio da região do forno aquecida pela resistência. Substituindo a equação (3) na equação (1) tem-se :

$$\frac{dT(t)}{dt} = -kT(t) + X_0ku(t) \quad (4)$$

A solução da equação (4) é dada por:

$$T_f = T_i + X_0(1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

Onde X_0 é a temperatura de equilíbrio entre a resistência e a zona do forno sendo aquecida, k é a frequência natural ou a constante de tempo do sensor.

Os parâmetros X_0 e K foram obtidos ajustando a equação (5) aos dados de temperatura por unidade de tempo obtido do sensor na respectiva zona de aquecimento. O ajuste foi realizado usando-se o método de Levenberg-Marquardt implementado no ambiente Origin[®]. Após o ajuste obteve-se a equação (6).

$$T_f = T_i + 137.61(1 - e^{-0.25t}) \quad (6)$$

Onde:

t é o tempo em segundos; T_i a temperatura inicial e T_f a temperatura final.

Como k é a constante de tempo do sensor, nota-se que o sensor 2 tem uma constante de tempo de 4 segundos. Esta constante de tempo está em acordo com a constante de tempo para termopares tipo k , fornecidos pelo fabricante. Nota-se também que o ajuste encontrou um valor de 137.61 °C para X_0 o que concorda com o experimento realizado. O coeficiente de correlação do ajuste foi de 0,99 que permite afirmar que o modelo de primeira ordem apresentado corresponde com os resultados experimentais obtidos. O ajuste gráfico está ilustrado na Figura 55.

Figura 55: Ajuste dos pontos de temperatura obtido do sensor à solução do modelo de primeira ordem

Desta forma nota-se que o modelo matemático de primeira ordem baseado na lei de esfriamento de Newton explica o perfil de aquecimento observados nos experimentos. Fica claro também que a resistência pode ser considerada como uma fonte de calor impulsiva na região do forno em que a mesma está localizada, ou seja, ao ligar a resistência, a temperatura máxima que a região do forno poderá atingir é a temperatura da resistência no instante em que ela foi ligada, pois a mesma irá atingir uma temperatura de equilíbrio em um tempo muito maior que a região do forno onde a mesma está inserida.

6 CONCLUSÃO

Este projeto demonstrou a eficiência do uso de rede de sensores sem fio no levantamento de perfil de temperatura e possibilitou a visualização espaço-temporal dos perfis de temperatura nas zonas de aquecimento do forno tipo túnel. Os resultados permitem concluir também que, usando rede de sensores sem fio, a metodologia foi capaz de transmitir os dados e armazená-los corretamente em uma base de dados para posterior análise.

Conclui-se também que o condicionamento dos sinais dos termopares usando AD595 permitiu a correta calibração dos sensores termopares. Os dados obtidos dos sensores instalados no forno permitiu concluir que o processo de aquecimento das zonas do forno segue um modelo de primeira ordem para a resposta impulsiva do forno quando em aquecimento. Com todos estes resultados pode-se por fim, concluir que a metodologia apresentada neste trabalho é útil para futuros estudos de modelagem matemática do forno e permitirá também avaliar a eficiência deste tipo de forno experimental no que diz respeito ao entendimento das zonas de aquecimento.

7 REFERÊNCIAS

ABIMA, **Associação Brasileira das indústrias de Massas Alimentícias e Pão & Bolo Industrializados**. Disponível em <<http://www.abima.com.br/index.php>>. Acesso em 05 jan. 2014.

ANDRE, I.; MACEDO, E.; TENÓRIO, K. **Controle de Temperatura de Chocadeira IESAM** (Instituto de Estudos Superiores da Amazônia) - Nazaré - Belém-PA. 2010.

AKYILDIZ, I.F; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y. and CAYIRCI, E. **Wireless sensor networks: A survey**. *Computer Networks*; 38:393–422; March 2002.

ANALOG DEVICES, **Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation**. Disponível em <<http://www.analog.com>> acesso em 18 dez. 2013.

ANALOG DEVICES, **AN-369 APPLICATION NOTE. AD594/ AD595**. Disponível em <<http://www.analog.com>> Acesso em 18 dez.2013.

AUGUSTO, P. E. D., SANTANA, F.F., CRISTIANINI, M. **UTILIZAÇÃO DE MODELAMENTO MATEMÁTICO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE ESTERILIZAÇÃO DE CARNE BOVINA EM CONSERVA (CORNEO BEEF)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.12, n.2, p.179-187, 2010 179. ISSN 1517-8595.

ARAÚJO, M. V. **Sistemas de Medida e instrumentação**. Depto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2006.

ARENY, R.P. ;WEBSTER, J.G.. **Sensors and Signal Conditioning** second ed., Wiley, New York, 2001.

ARTHAS, Kael. **Tutorial Wireless**. 2004. Site da Internet: **Tutorial Redes Wireless**.

Disponível em: <<http://www.babooforum.com.br/forum/index.php?/topic/269602-redes-wireless/>>Acessado em julho de 2012.

BAIK, O. D., MARCOTTE, M., & CASTAIGNE, F. (2000a). **Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens—Part I. Characterization of baking conditions.** Food Research International, 33, 587–598.

BAIK, O. D.; GRABOWSKI, S.; TRIGUI, M.; MARCOTTE, M.; CASTAIGNE, F. **Heat Transfer Coefficients on Cakes Baked in a Tunnel Type Industrial Oven.** JOURNAL OF FOOD SCIENCE—Volume 64, No. 4, 1999.

BAIK, O. D., MARCOTTE, M., & CASTAIGNE, F. (2000b). **Cake baking in tunnel type multi-zone industrial ovens—Part II. Evaluation of quality parameters.** Food Research International, 33, 599–607.

BAKI, L. **MATÉRIAS-PRIMAS E INSUMOS: POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS NOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIA DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS.** Medianeira, 2011.

BELLINGIERI, J. C.. **A indústria cerâmica em São Paulo e a ‘invenção’ do filtro de água: um estudo sobre a Cerâmica Lamparelli – Jaboticabal (1920-1947).** V Congresso Brasileiro de História Econômica, 6ª Conferência Internacional de História de Empresas, Associação Brasileira de Pesquisadores em História Econômica – ABPHE, Caxambu, 2003.

BOYER, M.A., EKE, K. I. Convection Automated Logic Oven Control. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998.

BOLTON, W. Mecatrônica Uma abordagem multidisciplinária. Ed. Bookman, pages 17, 63, 69, 112. 2010.

BOSTON, W. **Engineering Instrumentations and Control.** Pg 13, 17, 27, 141, Ed. Hemus, 2005.

BROYART, B., TRYSTRAM, G., & DUQUENOY, A. (1998). **Predicting colour kinetics during cracker baking**. Journal of Food Engineering, 35, 351–368.

BROYART, B., & TRYSTRAM, G. (2002). **Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits**. Journal of Food Engineering, 51, 47–57.

BU, SHENGRONG & NAGHDY, F. **Service discovery in wireless ad-hoc control networks**. 2nd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing pp. 157–162.

BURATTI, C. et al. **Sensor Networks with IEEE 802.15.4: Systems Distributed Processing, MAC, and Connectivity**. Springer, 269 p. 2011.

CANOAS, C.E.S. – RS, **Leis da Termodinâmica**. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/leis_termodinamica.htm> Acessado em: 03 de fevereiro de 2014.

CARSON, J.K., WILIX, J., NORTH, M.F., 2006. **Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens**. Journal of Food Engineering 72 (3), 293–301.

CARZINO, M.C. **PROJETO E ANÁLISE PARA DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO DE FORNOS PARA COZIMENTO DE PÃES E BISCOITOS**. 2006.

CARVALHO, S. R. de; BORGES, V. L.; MULINA, B.H.O.; OLIVEIRA, R.L. M.de ; FIGUEIRA JR, E. A. E FILHO, J.S.P. **INSTRUMENTAÇÃO TÉRMICA APLICADA AO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL EM FORNOS DE ALVENARIA**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.36, n.4, p.787-796, 2012.

CASSIOLATO, C. **Redes Industriais**. SMAR Equipamentos Industriais Ltda. Diretor de Engenharia de Projetos e Serviços, Marketing e Qualidade. Artigo Técnico, 2006.

CHEN, L.- J.; SUN, T.; LIANG, N.-C. **An Evaluation Study of Mobility Support in ZigBee Networks.** J Sign Process Syst (2010) 59:111–122. 2008 Springer Science + Business Media, LLC. Manufactured in The United States. 2008. Received: 13 April 2008 / Revised: 6 August 2008 / Accepted: 2 September 2008 / Published online: 16 October 2008.

CRUZ, R. E. da, MANTELLI, M. B. H. **Estudo experimental de parâmetros de influência na distribuição de temperatura em câmaras de combustão.** Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006 Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM, Curitiba, Brazil, Dec. 5-8, 2006.

DADAM, A.P.; NICOLAU, V.P. **Análise Térmica Numérica de um Forno para Cerâmica.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006.

Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM, Curitiba, Brazil, Dec. 5=8, 2006.

DANISMAN, K.; DALKIARAN, I.; CELEBI, F.V. **Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. 2006.**

DELMÉE, G.J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, BULGARELLI, V.S.; **INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL.** Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. Ed. Interciência, 2006.

DEMIRKOL, E., ERDOĞ˘DU, F., PALAZOĞ˘LU, T.K., 2006. **Analysis of mass transfer parameters**

(changes in mass flux, diffusion coefficient and mass transfer coefficient) during baking of cookies. Journal of Food Engineering 72 (4), 364–371.

DIONISIO, R.V. **Medição de Temperatura com Termopares do Tipo K Associados ao C.I. AD595. Trabalho de Laboratório nº 3. Engenharia de Automação Controle e Instrumentação 2006/07.**

FAHLOUL, D., TRYSTRAM, G., DUQUENOY, A. **Kinetics of biscuit colour in continuous baking ovens and correlations with heat fluxes.** In: Proceedings of the IUFOST2006/314, Nantes.2006.

FAROUC, Y.; NICOLAZO, C.; SARDA, A.; DETERRE, R. **Temperature measurements in the depth and at the surface of injected thermoplastic parts.**

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos:** princípios e práticas, tradução Florência Cladera Oliveira *et al* 2.: Artmed, 2006..

FIALHO, A.B. **Instrumentação Industrial**, 4ª Ed, São Paulo, ed. Érica,2002.

FIDÉLIS, G. C. **As Características Desejadas para um Padrão de Calibração.** Revista Metrologia e Qualidade. Artigo sobre Confiabilidade Metrológica. 2006.

FILHO,A.P.S.;SILVA, F.A.R.D.; ARAÚJO,R.D.B. **Desenvolvimento de um Sistema Microcontrolado para Controle da Temperatura em Líquidos.** Engenharia de Computação em Revista. 2007.

FLOWERS, D., et. al. **Microchip Stack for the ZigBee protocol.** Relatório técnico AN965, Microchip Technology Inc. 2006.

FRACTUM **Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos LTDA** – disponível em <http: www.fractumrf.com> Acesso em 12 dez. 2013.

FURUKAWA, C. M.; BARROS, R. DE.; **Sensores: Tecnologias e Aplicações.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia Mecatrônica. PMR 2727. Professor: Celso Massatoshi Furukawa

GHANI *et al.*, 2001. GHANI, A. A. G.; FARID, M. M.; CHEN, X. D.; Richards, P. **Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics.** *Journal of Food Engineering*, Oxford, v.41, p.55-64, 1999.

GINATTO, A. **Introdução às redes de sensores sem fio.** Smar Equipamentos Industriais e mestrando em Eletrônica na USP - São Carlos. *Revista Mecatrônica Atual* - Ano 6 - Edição 32 - Fev/Mar/07.

GISLASON, D. et al. **ZigBee Wireless Networking.** London: Newnes, 427 p. 2008.

GUO, W.; HEALY, W.M.; ZHOU, M. **Impacts of 2.4-GHz ISM band interference on IEEE 802.15.4 wireless sensor network reliability in buildings.** *IEEE Tran. Instrum. Meas.* **2012**, 61, 2533–2544.

HALLIDAY, R; RESNICK, R. **Fundamentos da Física.** v. 2 e 3. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991.

HALLSTRO, M. B. (1988). **Heat and mass transfers in baking ovens.** *Cereal Science and Technology.* In N. G. Asp (Ed.), *Cereal science and technology in Sweden* (pp. 137–147). Sweden: Ystad.

HAN, D. M.; LIM, J.H. **Design and implementation of smart home energy management systems based on ZigBee.** *IEEE Trans. Consum. Electron.* **2010**, 56, 1417–1425.

HUO, H.; XU, Y.; BILEN, C.C.; ZHANG, H. **Coexistence Issues of 2.4GHz Sensor Networks with other RF Devices at Home.** In *Proceedings of Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Athens/Glyfada, Greece; 18–23 June 2009; pp. 200–205.

JIMENEZ, M., PIZA, V. Disponível em
 <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1075-sensores-termicos-sensores-termicos-rtd-e-termopares-parte-2?showall=&limitstart=0>> Revista Mecatrônica Atual, Artigos, Sensores térmicos – Sensores térmicos RTD e termopares – Parte 2. Acesso em 21 de ago de 2013.

KILBORN, R. H., PRESTON, K. R., & KUBOTA, H. (1990). **Description and application of an experimental heat sink oven equipped with a loaf height tracker for the measurement of dough expansion during baking.** Cereal Chemistry, 67, 443–447.

KIM, H.T.; COLLINS, E.A. Temperature profiles for polymer melts in tube flow. Part II. I Conduction and shear heating corrections. **Polymer Engineering & Science. Vol. 11. Issue 2, pages 83-92, March 1971. Pub: 25 aug 2004.**

KIM, Y.G., GAM, K.S. and KANG, K.H. **An investigation of the thermoelectric properties of type S thermocouples from different manufacturers.** Korea Research Institute of Standards and Science, Division of Physical Metrology, Temperature–Humidity Group, P.O. Box 102, Yusong, Taejeon 305-606, South Korea. 2002.

KOTVISKI, A. O que são redes Ad Hoc. Disponível em
 <<http://www.tecmundo.com.br/internet/2792-o-que-sao-redes-ad-hoc-.htm>> Acesso em 26 de dez. de 2013.

KUSAMA, Y.; HASHIMOTO, O. and MAKIDA, M. **Analysis of door seal structure of microwave oven with consideration of higher modes by the FDTD method.** Electron. Comm. Jpn. **2002**, doi:10.1002/ecjb.10040.

LASSO, P..R.O.; PESSOA, J.D.C.; CALBO,A.G.; CRUVINEL, P.E. **Sistema de Controle de temperatura para câmara de armazenamento frescos em meio líquido.** Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, 2003 12p.

LEPTEN/ Labtucal, **Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia**, 5.3 Fornos tipo Contínuo (Biscoitos). UFSC. Disponível em < <http://www.lepten.ufsc.br/pesquisa/tucal/linha5/continuo.html> > Acessado em 06 jan. 2014.

LOSTIE, M., PECZALSKI, R., ANDRIEU, J., LAURENT, M., 2002. **Study of sponge cake batter**

baking process. II. Modeling and parameter estimation. Journal of Food Engineering 55 (4), 349–357.

LOUREIRO, A. A.F.; NOGUEIRA, J.M. S.; BEATRYS, L.; RUIZ, L.B.; MINI, R.A.F.; NAKAMURA, E.F.; FIGUEIREDO, C.M.; **Livro: REDE DE SENSORES SEM FIO**; Belo Horizonte, 2009.

LUGLI, A. B., SCARPIONI, G., MARTINS, G. V. da S., CASTRO, L. F. C., CARVALHO, M. F. F. **Redes sem fio em automação industrial**. Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí/ MG. 2012.

LUGLI, A.B. e SOBRINHO, D.G.; **TECNOLOGIAS WIRELESS PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL: WIRELESS_HART, BLUETOOTH, WISA, WI-FI, ZIGBEE E SP-100**. Santa Rita do Sapucaí, 2012.

MANLEY, Duncan J. R. **Tecnologia de la Industria Galletera**, 1983, Editora Acribia S.A.

MAINWARING, A.; POLASTRE, J.; CULLER, D. & ANDERSON, J. (2002), **‘Wireless sensor networks for habitat monitoring’**, Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications pp. 88–97.

MARK, A.; BOYER and KENNETH, EKE, I. **Convection Automated Logic Oven Control**. Mark A. Boyer and Kenneth I. Eke. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, Vol. 34, Nº. 2, MARCH/APRIL 1998.

MAURICIO, José. **As redes com ZigBee**, Disponível em:<http://www.projetoederedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php> Acessado em Maio de 2012.

MICHALSKI, L.; Eckersdorf, K.; KUCHARSKI, J.; MCGHEE. **Temperature Measurement**, second ed., Wiley Interscience, 2001.

SOSA - MORALES, M. E., GUERRERO –CRUZ, G., GONZALES – LOO, H. AND VELEZ – RUIZ, J. **MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER DURING BAKING OF BISCUITS**. Journal of Food Processing and Preservation **28** (2004) 417–432. All Rights Reserved. 2004.

MOREIRA, L. **Medição de Temperatura Usando-se Termopar**. Cerâmica Industrial, 7 (5) Setembro/Outubro, 2002 53.

NAZARI, A. et al. **Modeling of thermal radiation in the internal sections of a Three-phase AC electrical arc furnace by means of a new temperature estimation method for AC arcs**.

Department of Electrical and Computer engineering, Saveh branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran. IJASETR 1(3): p. 60 - 70.2012.

NAYAK, R., KUMAR, A., MISHRA, A. **Furnace Temperature Control & Calibration of Thermocouple Using Digital Temperature Controller**. Bhilai Institute of Technology, Durg (C.G.). ruchinayak@gmail.com Industrial Engineering Letters www.iiste.org. ISSN 2224-6096 (print) ISSN 2225-0581 (online). Vol 2, No.6, 2012.

NAYAK, R.; KUMAR, A. BHILAI, A.M. **Controle e Calibração de termopares Forno Temperatura Usando Controlador de Temperatura Digital**, Industrial Engineering Letters www.iiste.org. Institute of Technology, Durg (C.G.).ISSN 2224-6096 (print) ISSN 2225-0581 (online) Vol 2, No.6, 2012.

NITIN, N., KARWE, M.V., 2001. **Heat transfer coefficient for cookie shaped objects in hot air jet impingement oven.** Journal of Food Process Engineering 24, 51–69.

NIST, **National Institute of Standards and Technology.** Disponível em<
<http://www.nist.gov/>> Acesso em 06 jan.2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno. Eª Ed.** Ed. Pearson,. Pag. 123- 125. 2011.

OLIVEIRA,M.,J. **Contribuições de Nernst e Planck para a Terceira Lei da Termodinâmica.** Seminário de Física e Estatística do Instituto de Física. Universidade de São Paulo. 2007).

OLIVEIRA, L. C. et al **Relatório final do estudo do sistema produtivo Agronegócio,**

integrante da pesquisa “Perspectivas do Investimento no Brasil” Rio de Janeiro. 306 p. UFRJ, 2008-2009.

OPERP, Universite de Nantes, IUT de Nantes 2, avenue Pr Rouxel BP 539 F-44475 Carquefou Cedex, France.

PEREIRA, L.A.M.; **Desenvolvimento de uma linha experimental de escala reduzida para a produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo “ZIG-BEE”,** Pirassununga, 2012.

PAN, Z., SINGH, R.P., RUMSEY, T.R., 2000. **Predictive modelling of contact-heating process for cooking a hamburger patty.** Journal of Food Engineering 46, 9–19.

PAN, Z., SINGH, R.P., 2002. **Heating surface temperature and contact-heat transfer coefficient of clam-shell grill.** Lebensmittel - Wissenschaft und - Technologie 35 (4), 348–354.

RASK, C. (1988). **The heat transfer in a convection oven—influence of some product characteristics.** In N. G. Asp (Ed.), *Cereal science and technology in Sweden* (pp. 148–157). Sweden: Ystad.

RIBEIRO, J.A.B. Medidor de temperatura digital, com termopar tipo k e ci ad595. Disponível em <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1807>. Acessado em 10/01/2014.

ROSU, B.; REYES-TURCU, P.; SIMON-ZANESCU, D. **Thermal Management System for Reflow Oven.** Center of Technological Electronics and Interconnection Techniques (CETTI). Bucharest. Romania. 2003.

RUOCCO, ALMEIDA, E LOPES. **Monitoramento da temperatura de preparações quentes e frias em serviço técnico de nutrição e dietética.** Revista Nutrição em Pauta, São Paulo, ano 14, nº 76, p 43-46, jan/ fev. 2006.

SABLANI, S. S.; MARCOTTE, M.; BAIK, O. D. & CASTAIGNE, F. (1998). **Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process.** *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 31, 201–209.

SAKIN, M.; KAYMAK - ERTEKIN, F. ILICALI, C. **Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens.** Ege University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, 35100 Bornova, Izmir, Turkey.

SAKIN, M., 2005. Modeling of **Cake Baking Process as Simultaneous Heat and Mass Transfer**, PhD Thesis, Ege University, Institute of Natural and Applied Sciences, Branch of Food Engineering, Bornova, Izmir.

SAKIN, M., TURKKAN, M.E., KAYMAK - ERTEKIN, F., 2006. **Determination of surface heat transfer coefficient during baking.** In: *Proceedings of the 9th Food Congress*, Bolu, Turkey, in Turkish.

SAKIN, M., KAYMAK - ERTEKIN, F., ILICALI, C., 2007a. **Modeling the moisture transfer during baking of white cake.** Journal of Food Engineering 80, 822–831.

SAKIN, M., KAYMAK - ERTEKIN, F., ILICALI, C., 2007b. **Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking.** Journal of Food Engineering 83, 463–474.

SANTOS, G. M. dos, BAZZO, E. E NICOLAU, V.P. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha.** COBEM 2001 – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – Uberlândia – MG - artigo TRB330– 10p.

SANT'ANNA, B.; MARTINI, G.; REIS, H.C.;SPINELLI, W. **Conexões com a Física.** ed. Moderna. São Paulo, 2010.

SATO, H., MATSUMURA, T., SHIBUKAWA, S., 1987. **Apparent heat transfer in a forced convection oven and properties of baked food.** Journal of Food Science 52 (1), 185–188.

SAVOYE et al., 1992, SABLANI et al. de 1998, LOSTIE et al. de 2002 , e BAIK MARCOTTE, 2002, SAKIN , 2005 , SAKIN et al . , 2007a e SAKIN et al.,2007 b.

SCIAMARELLI, P. **Tradução do artigo “Del horno de barro ao forno eletrico”.** Revista FEVIPAN – nº 15 – junho de 2004 – p. 58-59.

SINGH, N., AKINS, R.G., ERICKSON, L.E., 1984. **Modelling heat and mass transfer during the oven roasting of meat.** Journal of Food Process Engineering 7, 205–220.

SKJO”IDEBRAND, C. **The possibility of using short wave infra red radiation for baking.** In N. G. Asp (Ed.), Cereal science and technology in Sweden (pp. 158–173). Sweden: Ystad.1998.

SILVA, I.M.D.; **Redes de Sensores sem Fio aplicadas em Ambientes Industriais de Petróleo e Gás.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Engenharia da Computação e Automação. Natal/ RN, dezembro de 2006.

SILVA, L. H. de S. **Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio Utilizando ZigBee Para Aplicações Diversas.** Escola Politécnica de Pernambuco. Universidade de Pernambuco/ PE. 2011.

SOMMIER, A.; CHIRON, H.; COLONNA, P.; VALLE, G., D.; ROULUILLE, J. **An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking.** France. 2004.

TERMOPARES. **THOMAS JOHANN SEEBECK.** Disponível em <http://www.termopares.com.br/teoria_temperatura_thomas_johann_seebeck/> Acesso em 12 de Nov. de 2013.

THERDTAI, N., ZHOU, W., and ADAMCZAK, T. (2001). **Optimisation of the temperature profile in bread baking.** Journal of Food Engineering, 55, 41–48.

THERDTHAI, N., & ZHOU, WB. (2003). **Recent advances in the studies of bread baking process and their impacts on the bread baking**

YASSU, F. Brasil assume liderança mundial. **DBO Rural**, n. 280, p. 30, mar 2004.

YIN, Y., & WALKER, C. E. (1995). **A quality comparison of breads baked by conventional versus nonconventional ovens: A review.** Journal of the Science of Food and Agriculture, 67, 283–291.

YOHAN. **Como surgiu a rede sem fio (wireless)** Disponível em <<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Como-Surgiu-a-Rede-Sem-Fio/251024.html>> acessado em 04 dez.2013. e Reirado em 06 jun. 2012..

WEN, Y.; ZHANG, X. **Radiation Characteristics of Microwave Ovens.** In *Proceedings of 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, China; 21–24 May 2002; pp. 214–217.

WILLIAMSON, M.E.; WILSON, D.I. **Development of an improved heating system for industrial tunnel baking ovens.** Department of Chemical Engineering, University of Cambridge, New Museums Site, Pembroke Street, Cambridge CB2 3RA, UK.

WUA, M.; QILEI; WEIHUACAO; JINHUASHE, C.A. **Integrated soft sensing of coke-oven temperature.** a School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China b Key, Shanghai 200240, China c School of Computer Science, Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan

ZANONI, B., PERI, C., PIERUCCII, S., 1993. **A study of the bread baking process. I: A phenomenological model.** Journal of Food Engineering 19, 389–398.

Zanoni, B., Peri, C., Pierucci, S., 1994. A study of the bread baking process. II: **Mathematical modeling.** Journal of Food Engineering 23, 321–336.

ZIGBEE ALIANCE; Disponível em: < <http://www.zigbee.org> > Acessado em Fevereiro de 2014.

ZUALKERNAN, A.; AL-ALI, A.R.; JABBAAR, M.A.; ZABALAWI, I.; WASFY, A. **InfoPods: Zigbee-Based remote information monitoring devices for Smart-Homes.** IEEE Trans. Consum. Electron. 2009 55, 1221–1226.