UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

LUCIANA VIEIRA PIZA

Efeito do uso combinado das tecnologias de micro-ondas e infravermelho no preparo de alimentos bifásicos em forno tipo túnel

Pirassununga
2016

LUCIANA VIEIRA PIZA

Efeito do uso combinado das tecnologias de micro-ondas e infravermelho no preparo de alimentos bifásicos em forno tipo túnel

(Versão corrigida)

Tese apresentada a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Engenharia de Alimentos.

Área de concentração: Ciência da Engenharia de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa

Pirassununga

2016

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

V695e

Vieira Piza, Luciana
Efeito do uso combinado das tecnologias de micro-ondas e infravermelho no preparo de alimentos bifásicos em forno tipo túnel / Luciana Vieira Piza ; orientador Ernane José Xavier Costa. -- Pirassununga, 2016.
111 f.

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

1. Alimentos assados. 2. Micro-ondas. 3. Infravermelho. 4. Temperatura. 5. Umidade. I. Xavier Costa, Ernane José, orient. II. Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Lucia e Antônio, por muitas vezes abrirem mão dos próprios sonhos em favor dos meus. Não sendo apenas pais, mas meus melhores amigos e companheiros, que mesmo nas horas em que meus ideais pareciam inatingíveis, se mantiveram firmes ao meu lado. Incontáveis foram as vezes em que meu cansaço e preocupação foram compartilhados por vocês, mantendo-me firme diante dos obstáculos, numa união que me incentivava a prosseguir. O momento que vivo agora é fascinante e só existe porque vocês se doaram em silêncio e caminharam lado a lado comigo nessa jornada. Presentearam-me com a riqueza do estudo e fizeram de mim não apenas uma profissional, mas sobretudo, ser humano. A vocês, a emoção me cala ficando a certeza de que hoje ofereço-lhes esta vitória. Sem palavras, abro meu coração num sincero: amo vocês.

Ao meu irmão Gustavo, que mesmo com a distância, se faz presente todos os dias.

A minha vó Maria Vieira e minha madrinha Maria, pelo exemplo sagrado de amor, dedicação, luta e vitória que tenho em minha vida.

A toda equipe do LAFAC pelo companheirismo, apoio e amizade.

A FAPESP e CAPES pelos auxílios financeiros.

Ao meu orientador e amigo Ernane Costa, pelos ensinamentos não só profissionais, mas intelectuais, com extrema sabedoria. O maior exemplo de bondade, caráter e dignidade que a vida colocou no meu caminho. Um exemplo de luta e superação. Que o mundo tenha você como exemplo, a humanidade seria muito melhor.

“ Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

PIZA, L.V. **Efeito do uso combinado das tecnologias de micro-ondas e infravermelho no preparo de alimentos bifásicos em forno tipo túnel.** 2016. 111f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

O uso combinado das tecnologias de micro-ondas e infravermelho, para aquecimento e reaquecimento de produtos prontos, pode ser considerado uma nova e eficiente técnica de preparo de alimentos, já que o processo de cozimento é otimizado e melhor controlado, pois altos fluxos de calor são transferidos para a superfície do alimento, com controle quase que instantâneo da energia fornecida. Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar uma nova forma de reaquecimento de produtos assados, por meio da combinação de micro-ondas e infravermelho em forno tipo túnel. Simulações computacionais e testes preliminares foram realizados em ambientes nos quais pode-se controlar, tanto as emissões da radiação infravermelha quanto a micro-ondas. Os testes foram realizados com salgados assados como forma de evidenciar a eficácia de ação de ambas as tecnologias, levando-se em conta a complexidade das condições de contorno de tais alimentos, uma vez que os mesmos podem ser modelados como possuindo duas fases: uma cujas as propriedades são estabelecidas pela massa e a outra em que as propriedades são provenientes do recheio. Foram realizados estudos preliminares que permitiram verificar o comportamento de cada fase do alimento frente ao reaquecimento pelas duas radiações, o que forneceu os tempos de ação de 15 segundos de micro-ondas (protótipo modelo), mais 30 segundos de infravermelho no forno tipo túnel. Com a metodologia desenvolvida foi possível medir com eficiência a temperatura interna e externa das amostras, bem como a migração de umidade do centro para a superfície, permitindo concluir que a ação de ambas as radiações foi eficiente no reaqueciamento dos alimentos no forno tipo túnel estudado.

Palavras-chave: alimentos assados, micro-ondas, infravermelho, temperatura, umidade

ABSTRACT

PIZA, L.V**. Effect of combined use of microwave and infrared technologies for cooking biphasic foods in tunnel oven**. 2016. 111f. Thesis (Doctorate) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

The combined use of microwave and infrared technologies for heating and reheating of fast-food may be considered a new and efficient technique for food preparation, due the fact that baking process is optimized and controlled, such technology have high heat flows transferring to the food surface instantaneous energy. In this context, the aim of this study was to develop and test a new way of heating baked foods, through a combination of microwave and infrared oven type tunnel. Computer simulation and preliminary tests were carried out in environments in which one can control both the emission of infrared radiation as a microwave. The tests were conducted with baked foods in order to show the effectiveness and action of both technologies, taking into account the complexity of such foods boundary conditions, they can be modelled as having two phases: one whose the properties are set by the dough properties and the other where the properties of components bounded by dough.Preliminary studies was carried out to verify the effect of both radiations in each food phase which provided the action times of 15 seconds of microwave (prototype model) 30 seconds infrared oven tunnel type. With this methodology was ble the measurement of internal and external temperature of the samples, as well as moisture migration from the center to the surface. The results showed that the action of both radiation was effective in rehating biphasic food.

Keywords: baked foods, microwave, infrared, temperature, moisture

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma geral da metodologia 38
Figura 2 - Diagrama esquemático do forno desenvolvido 39
Figura 3 - Diagrama de blocos do nó sensor móvel 41
Figura 4 - Detalhe da blindagem utilizada no termopar 42
Figura 5 - Diagrama de blocos do dispositivo de coleta de temperatura 42
Figura 6 - Esboço geométrico que modela as amostras 43
Figura 7 - Forma cilíndrica de alumínio 45
Figura 8 - Vista superior das amostras 45
Figura 9 - Embalagem de alumínio utilizada para a refrigeração 46
Figura 10 - A - Aparato experimental para capturar imagens; B - Alimento sendo fotografado 46
Figura 11 - Passo a passo da simulação 50
Figura 12 - Etapa de modelagem na simulação 51
Figura 13 - Vista superior do forno, distribuição das zonas de aquecimento e resistências instaladas 53
Figura 14 - Vista frontal do forno 53
Figura 15 - Disposição do experimento para avaliar a potência efetiva das resistências instaladas 54
Figura 16 - Sensor termo higrometro e sensor infravermelho medindo temperatura interna e externa, respectivamente 55
Figura 17 – A: Vista frontal da peça; B: Vista superior da peça; C: Peça pronta com dimensões 57
Figura 18 - Experimento de umidade no centro das amostras 58
Figura 19 - Experimento de umidade na lateral das amostras 58
Figura 20 - Experimento de umidade na superfície das amostras 58
Figura 21 - KIT de infravermelho adaptado ao forno 60
Figura 22 - Vista externa e superior de adaptação do kit infravermelho no qual [1] representa o controle eletromecânico de abertura do forno, responsável pelo controle de umidade no interior do forno 60
Figura 23 - Vista interna - Lâmpada de halogênio e resistência elétrica na região superior da cavidade do forno 60

Figura 24 - Resistência elétrica adaptada abaixo do prato giratório 61
Figura 25 - Vista interna da parte superior da cavidade do forno na qual [1] representa a saída da radiação infravermelha e [2] saída da radiação micro-ondas (sem a mica)..... 61
Figura 26 - Protótipo do dispositivo termo higrômetro 62
Figura 27 - [1] Condicionador dos sensores de temperatura e umidade instalado externamente ao forno na região superior. [2] Câmara de controle de umidade e cavidade de instalação dos sensores 62
Figura 28 - Fluxograma do *firmware* desenvolvido 63
Figura 29 - Imagens do protótipo do dispositivo sensor de temperatura 63
Figura 30 - Termopar adaptado ao centro do micro-ondas..... 64
Figura 31 - Termopar posicionado no centro do salgado durante aquecimento..... 64
Figura 32 - Tela principal do *software* de coleta 65
Figura 33- Vista superior do salgado 66
Figura 34 - Corte transversal dos salgado 66
Figura 35: Exemplos de amostras abaixo da coloração ideal, na coloração ideal e acima da coloração ideal..... 67
Figura 36 - Calorímetro com água aquecida para determinar o equivalente em água e a perda energética 68
Figura 37 – (Água aquecida + massa) no calorímetro 70
Figura 38 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma barra de ferro com infravermelho inferior..... 74
Figura 39 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma placa de alumínio com infravermelho inferior 75
Figura 40 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma placa de alumínio com infravermelho superior 75
Figura 41 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de 300 mL de água por micro-ondas..... 76
Figura 42 - Requecimento com infravermelho, superior e inferior: [A]: 2 segundos de reaquecimento; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento e [D]: 60 segundos de reaquecimento..... 78
Figura 43 - Reaquecimento micro-ondas: [A]: Amostra retirada do refrigerador; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento; [D]: 60 segundos de reaquecimento 79

Figura 44 - Reaquecimento com micro-ondas e infravermelho: [A]: Amostra retirada do refrigerador; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento; [D]: 60 segundos de reaquecimento 81
Figura 45 - Perfil de temperatura no interior do salgado sem circulação de ar quente 84
Figura 46 - Perfil de temperatura no interior do alimento com circulação de ar quente 85
Figura 47 - Temperatura no interior do forno micro-ondas 86
Figura 48 - Umidade no interior do forno micro-ondas 87
Figura 49 - Potência efetiva do infravermelho (forno tipo túnel) 88
Figura 50 - Região de comportamento linear 89
Figura 51 - Aparato experimental para medir umidade 94
Figura 52 - Medida da umidade na superfície dos salgados 94
Figura 53 – A: Probe posicionada no centro do alimento; B: Probe inserida no centro do alimento 95
Figura 54 – Medidas de umidade no centro, superfície e lateral das amostras 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa de salgado padronizada 44
Tabela 2 - Massa de recheio padronizado 44
Tabela 3 - Descrição dos testes de combinação para reaquecimento das amostras 52
Tabela 4 - Composição centesimal da massa crua e assada: Resultados de análises expresso em massa seca 100 ^{o}C 65
Tabela 5 - Resultados de equivalente em água e perda energética do calorímetro (Erro estimado ±10%)..... 69
Tabela 6 - Propriedades térmicas do salgado (Erro estimado ±10%)..... 72
Tabela 7 - Potências efetivas (Erro estimado ±10%) 76
Tabela 8 - Descrição dos testes de combinação para reaquecimento das amostras (Erro estimado ± 5%)..... 82
Tabela 9 - Potências efetivas (Erro estimado ± 5%) 89
Tabela 10 - Valores de temperaturas encontrados por meio do reaquecimento apenas pela radiação infravermelha (Erro estimado 5%) 91
Tabela 11 - Valores de temperaturas encontrados por meio do reaquecimento por meio da combinação das radiações infravermelha e micro-ondas (Erro estimado ± 5%) 92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AACC American Association of Cereal Chemist

Aw Atividade de água

CFD Fluidodinâmica Computacional

cal Calorias

cm Centímetros

cm^3 Centímetros cúbicos

$CoCl_2$ Cloreto de Cobalto

CO_2 Dióxido de carbono

DSC Calorimetria de varredura diferencial

IV Infravermelho

g Grama

Kg Quilograma

MHz Mega Hertz

MEF Método dos elementos finitos

MDF Método da diferença finita

MO Micro-ondas

m Metro

m^3 Metro cúbico

mL Mililitro

mm Milímetro

RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes

r^2 Coeficiente de correlação

s Segundo

UR Umidade relativa

x Coordenada x

y Coordenada y

z Coordenada z

W Watts

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico
k	Coeficiente de condutividade térmica
∂	Diferencial parcial
ρ	Densidade
%	Porcentagem
®	Registrado
^oC	Graus Celsius
£	Libra

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 Introdução 15

2 Revisão Bibliográfica 18

2.1 Fornos tipo túnel 18

2.2 Micro-ondas 21

2.3 Uso combinado de micro-ondas e infravermelho 25

2.4 Instrumentação eletrônica no monitoramento de alimentos assados 28

2.5 Simulação computacional 32

2.5.1 Programa de simulação computacional Ansys® 35

3 Objetivo 37

4 Materiais e Métodos 38

4.1 Adaptações do forno micro-ondas convencional 39

4.1.1 Descrição do experimento de pré teste 39

4.1.2 Adaptação do infravermelho 39

4.1.3 Adaptação do micro-ondas 40

4.2 Monitoração da temperatura e umidade 40

4.2.1 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do ar da cavidade 40

4.2.2 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do alimento 41

4.2.3 *Software* de aquisição de dados 43

4.3 Preparo das amostras 43

4.4 Cálculo dos parâmetros para a simulação computacional 47

4.4.1 Propriedades físico químicas dos salgados 47

4.4.2 Simulação computacional para reaquecimento das amostras no forno modelo 48

4.4.2.1 Potência efetiva 48

4.4.2.2 Simulação computacional 49

4.4.2.3 Testes do forno e reaquecimento das amostras 51

4.4.3 Simulação computacional para reaquecimento das amostras em forno tipo túnel ... 52
4.4.3.1 Potência efetiva ... 52
4.4.3.2 Testes com alimento: Avaliação de temperatura ... 54
4.4.3.3 Teste com alimento: Avaliação da migração de umidade no interior do alimento ... 56
5 Resultados e Discussão ... 60
5.1 Adaptações do forno micro-ondas convencional ... 60
5.1.1 Adaptação do infravermelho ... 60
5.1.2 Adaptação do micro-ondas ... 61
5.2 Monitoração da temperatura e umidade ... 61
5.2.1 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do ar da cavidade do forno modelo ... 62
5.2.2 Desenvolvimento do sensor para monitoração da temperatura do alimento no forno modelo ... 63
5.2.3 *Software* de aquisição de dados ... 64
5.3 Preparo das amostras ... 65
5.4 Cálculo dos parâmetros para a simulação computacional ... 68
5.4.1 Propriedades físico químicas do salgado ... 68
5.4.2 Simulação computacional para reaquecimento de alimentos no forno modelo ... 74
5.4.2.1 Potência efetiva ... 74
5.4.2.2 Simulação computacional ... 77
5.4.2.3 Teste do forno e reaquecimento das amostras ... 82
5.4.2.3.1 Testes com alimento ... 82
5.4.3.2.2 Teste do forno modelo ... 86
5.4.3 Simulação computacional para reaquecimento das amostras em forno tipo túnel ... 88
5.4.3.1 Potência efetiva ... 88
5.4.3.2 Avaliação de temperatura no alimento ... 90
5.4.3.3 Avaliação da migração de umidade no interior do alimento ... 94
6 Conclusões ... 100
7 Referências ... 101

1 Introdução

Perdas em um sistema de produção, seja ele referente ao processamento de alimentos ou não, são inerentes aos processos produtivos. Não há dúvidas quanto ao fato de que havendo um sistema, nele haverá perdas. Essas perdas podem ser de origem humana ou falhas técnicas e de produção, mas interferem diretamente na performance do sistema analisado (ABREU, 2002).

No que diz respeito à engenharia de alimentos, essas falhas são evidenciadas por dados estatísticos revelados pela "*Food and Agriculture Organization*" e Organização das Nações Unidas. Anualmente são consumidas, no mundo, 375 milhões de toneladas de alimentos processados, sendo 4 milhões de toneladas desperdiçadas, por diversos fatores. Deste total desperdiçado, estima-se que a terça parte (1/3) é perdida somente por falhas no processo de fabricação ou controle (SACKS et al., 2013).

Para suprir essas perdas, a inserção de tecnologia e controle efetivo de linhas de produção nas indústrias de alimentos é essencial. Sabe-se que, enquanto o consumo de alimentos aumenta, o número de inovações tecnológicas para otimizar o processo, fazer medidas e controlar variáveis de interesse no processamento não aumenta na mesma proporção (PEREIRA, 2012). Além disso, questões culturais relativas aos alimentos são cruciais para o seu valor de mercado, portanto as indústrias e seu processamento como um todo, devem satisfazer também esta condição, no que diz respeito ao alimento, a fim de expandir ainda mais as possibilidades mercadológicas. A questão é que a alta tecnologia, associada à análises "*in situ*" de alimentos e a otimização de processos, é pouco estudada e raramente aplicada a indústria de alimentos. Por outro lado, o uso de tecnologia, sensores e *softwares* permitem monitoração de medidas em tempo real, contribuindo para a diminuição de perda tanto operacional quanto energética (PEREIRA et al., 2013).

Levando-se em conta a produção industrial em larga escala, é necessário que as indústrias brasileiras estejam tecnologicamente preparadas para esta demanda excessiva, que aumenta proporcionalmente ao crescimento populacional. Entretanto, grande parte da tecnologia e da instrumentação eletrônica utilizada, requer mão de obra, controle e tecnologia muitas vezes não disponíveis no Brasil, tornando o país cada vez mais dependente da tecnologia importada. Grandes inovações nesta área

poderiam trazer maior faturamento e aproveitamento resultante da diminuição de perdas, causadas por falhas de fabricação ou controle de processo ineficiente (PEREIRA, 2012).

Não são somente falhas no processamento que refletem em danos econômicos aos processos industriais. Após o produto pronto, poucas são as tecnologias inseridas no quesito estocagem, armazenamento e qualidade de produtos prontos, que permitem, por exemplo, reaquecimento de massas e produtos de panificação. Isso ocorre pois, durante o reaquecimento, ocorrem alterações físico químicas no produto, alterando suas características sensoriais, diminuindo a qualidade deste tipo de alimento (FERREIRA, OLIVEIRA e PRETTO, 2001).

Uma alternativa pouco referenciada em pesquisas científicas é o uso da combinação das tecnologias de micro-ondas e infravermelho para reaquecimento de produtos prontos, amplamente empregada em redes de "*Fast Food*". Sabe-se que o aquecimento por micro-ondas tem a habilidade de penetrar e aquecer o interior do alimento (DINCOV, PAROTT e PERICLEOUS, 2004). Este aquecimento proporciona um rápido aumento da temperatura devido à sua capacidade de gerar calor no interior do alimento. No entanto, um problema amplamente conhecido é o acúmulo de umidade na superfície do alimento, devido à evaporação interna e o fluxo de pressão dirigido que levam uma quantidade maior de umidade para a superfície, quantidade esta superior àquela que o ar frio poderia remover. Essa alteração de umidade na superfície resulta na perda de crocância, que assim como qualquer outra alteração sensorial que interfira na qualidade final dos alimentos, resulta na depreciação do produto por parte dos consumidores (DATTA e NI, 2000).

Sendo assim, uma alternativa inovadora para linhas de produções industriais seria a combinação de micro-ondas e infravermelho, já que uma forma de remover o excesso de umidade acumulado pelo aquecimento por meio da radiação micro-ondas é a utilização da lâmpada de halogênio, uma vez que esta é capaz de manter a temperatura e umidade do forno baixas, já que o emissor da radiação promove pouco aquecimento do ar localizado entre ele e o alimento. Desta forma, o processo de assamento é otimizado e melhor controlado, pois altos fluxos de calor são transferidos para a superfície do alimento, com controle quase que instantâneo da energia fornecida (KESKIN, SUMMU e SAHIN, 2003).

No entanto, o processo de reaquecimento é tecnologicamente complexo, por possuir zonas de aquecimento independentes, no qual encontram-se fluxos de calor

divididos em fontes de aquecimento topo e lastro, potências requeridas, comprimento e velocidade de esteira (LITOVCHENKO, 2013). Ademais, quando o modelo físico a ser testado trata-se de alimentos bifásicos, ou seja, com propriedades térmicas não homogêneas, novos parâmetros de controle e variáveis de qualidade são inseridos no processo, tornando-o ainda mais complexo. Para testar o preparo desse tipo de alimento, usando a combinação das tecnologias de micro-ondas e infravermelho, uma simulação computacional é indispensável para encontrar as condições ideiais de reaquecimento e uniformidade dos fluxos de calor.

Procurando abranger tais conceitos, esta tese tem como objetivo a associação inédita destas duas tecnologias, micro-ondas e infravermelho, para uso em forno tipo túnel em escala piloto, para futuro uso em escala industrial e redes de "*Fast Food*", a fim de estudar suas ações combinadas no reaquecimento de alimentos bifásicos, modelo físico proposto, previamente simulados computacionalmente utilizando o método dos elementos finitos, além de estudar os perfis de temperatura e umidade de centro e superfície dessas amostras, a fim de garantir qualidade e eficiência do preparo, enfatizando a necessidade de investigação científica de novas tecnologias de controle, aplicado ao processamento do alimento. Sendo assim, este projeto poderá agregar tecnologia à economia alimentícia, bem como mostrar ao mercado mundial o empenho acadêmico e científico do Brasil, no que se refere a zelar pela qualidade final dos produtos e adaptar tais processos, visando o controle do desperdício de alimentos durante sua fabricação e/ou reaquecimento.

2 Revisão Bibliográfica

A importância das fontes de calor usadas para o assamento dos alimentos, pode ser observada pelos inúmeros artigos científicos publicados na última década. Esses estudos abordam desde questões energéticas, tanto do ponto de vista financeiro e ambiental (Shaughnessy e Newborough (2000) e Paton et al. (2012)), quanto os mecanismos de aquecimento que envolvem infravermelho (fornos tipo túnel), micro-ondas e aquecimento combinado.

Esta revisão bibliográfica contextualiza o uso de forno tipo túnel, radiação micro-ondas e combinação de tecnologias, bem como a simulação computacional e instrumentação eletrônica necessária para o preparo de alimentos bifásicos, demonstrando o pioneirismo da hipótese a ser testada nesta tese, uma vez que o reaquecimento deste tipo de alimento ainda não foi reportado na literatura. Por conseguinte, os trabalhos aqui descritos fundamentam a metodologia que será apresentada.

2.1 Fornos tipo túnel

Os fornos tipo túnel baseados em infravermelho, tanto usando gás quanto resistência elétrica, tem sido usados em simulações e modelagens dinâmicas de processos de assamento de pães, biscoitos e produtos de panificação, visando otimização de processo e características sensoriais atrativas ao consumidor (FAHLOUL et al. (1994); BROYART e TRYSTRAM (2001); SAKIN, KAYMAK-ERTEKIN e ILICALI (2007); KHATIR et al. (2011)).

A investigação científica nesse sentido vem sendo explorada desde os fornos a lenha. Fahloul et al. (1994) desenvolveram modelos matemáticos para avaliar o fluxo de calor indireto em fornos contínuos a lenha. O estudo discute que o uso combinado de sensores permitiram a medição dos fluxos de calor convectivo e radioativo juntos. Diferente da proposta deste trabalho, o modelo matemático pôde predizer a porcentagem de ação de cada um dos fluxos, convectivo e radioativo, em biscoitos à base de cereal, sendo útil também para predizer as conseqüências de alterações realizadas no forno durante o assamento do produto, mas não as consequências da ação das radiações no alimento em si.

O interesse nesse tipo de análise culminou em estudos mais detalhados, envolvendo aspectos desde modelagem do fluxo de calor até a investigação do

fenômeno de transferência de massa ao longo do assamento de biscoitos. Diferente do que será tratado nesta tese, pesquisadores como Kaiser (1974), Standing (1974), Hayakawa e Hwang (1981) e Savoye et al. (1992) trabalharam com modelagem de transferência de massa e calor em biscoitos, cookies e "*cracker*" em fornos contínuo, levando em consideração as trocas ocorrentes entre alimento e atmosfera aquecida, porém sem considerar o gradiente de temperatura e umidade no interior das amostras.

Os fenômenos de fluxo de calor e transferência de massa também foram estudados por Trystram et al. (1991) em processos de secagem de biscoitos. Utilizando um forno a gás de 15 metros com 6 zonas de aquecimento, dimensões superiores aos utilizados neste trabalho, a modelagem foi realizada sem levar em consideração a otimização do preparo, ou seja, o tempo necessário para conclusão do processo, variável considerada na abordagem desta tese.

Dentro do mesmo contexto, Sakin, Kaymak-Ertekin e Ilicali (2007) simularam a transferência simultânea de massa e calor durante assamento de "*cupcakes*" em forno convectivo. Esse processo de assamento foi estudado por métodos numéricos e experimentais. O modelo gerado levou em consideração a importância dos parâmetros termodinâmicos para predição dos perfis de temperatura e umidade, além de permitir a construção de uma ferramenta rápida que, diferente da metodologia de Trystam et al. (1991), possibilitou a previsão do tempo total de assamento de bolos. Contudo, diferente da proposta aqui apresentada, a modelagem foi realizada em apenas 2 dimensões, e avaliou as variáveis de temperatura e umidade apenas na superfície das amostras.

Durante o processo de assamento em forno industrial contínuo, outras técnicas também são abordadas para uso nesse sentido, como modelagem tridimensional por técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD), simulação de perfis de temperatura e padrões de fluxo de ar. Therdthai, Zhou e Adamczak (2004) compararam modelos tradicionais com os tridimensionais, permitindo avaliar as alterações de atributos sensoriais frente as alterações de fluxo de calor em fornos tipo túnel. O modelo pode predizer as alterações dos pães durante o assamento. Diferente da metodologia aqui apresentada, o resultado foi comparado com processos industriais para verificação, não sendo realizada uma modelagem específica, levando em consideração as propriedades térmicas do alimento.

A análise experimental e a modelagem CFD também foram utilizadas por Khatir et al. (2011) no sentido de analisar um forno industrial dividido em três zonas de aquecimento. Com dados experimentais, o modelo para fornos com circulação forçada de ar, foi desenvolvido e validado utilizando modelagem de turbulência RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) e condições de contorno realísticas. O modelo foi útil em questões cruciais relacionadas ao assamento dos alimentos, como uniformidade da temperatura, utilizada na modelagem CFD, e qualidade dos produtos em aplicações práticas. Entretanto, o autor considerou que ainda havia falta de estudos que permitiam esse tipo de modelagem para otimização no tempo de preparo nesse tipo de fabricação.

A importância relacionada à economia de energia na indústria de alimentos fez com que Khatir et al. (2013) estudassem exatamente a modelagem CFD visando eficiência energética. Nesse estudo, um forno foi projetado com coeficiente de transferência de calor ideal de 35 Watts, o que reduziu potencialmente o consumo de energia em 5%, podendo ser aumentado para 10%, uniformizando a variável temperatura, bem como o tamanho do produto a ser aquecido. Esse estudo mostra grandes oportunidades de investigação científica e um campo amplo a ser explorado por pesquisadores.

Em trabalhos mais práticos e envolvendo análises financeiras, Paton et al. (2012) verificaram que o estudo de otimização, associado à análise CFD, resultou em melhoria operacional e energética no assamento de pães em padarias. Em geral, as abordagens sugerem uma redução no tempo de assamento em até 10%, além de uma redução energética para assar cada pão de 2%. O reflexo econômico desta análise para as indústrias do Reino Unido representa uma economia equivalente a mais de £ 0,5 milhões e redução de 5000 toneladas de CO_2 por ano, o que demonstra a extrema relevância desse tipo de avaliação em processos, tanto industriais quanto de cunho acadêmico.

Diante da importância energética, econômica e sensorial, Ploteou, Nicolas e Glouannec (2012) caracterizaram numericamente e experimentalmente o processo de assar pães em batelada, considerando todas as transferências de calor entre alimento e material térmico, e material térmico e ambiente. Assim como os modelos de Therdthai, Zhou e Adamczak (2004) e Broyart e Trystram (2001), o modelo numérico permitiu calcular o fluxo de calor trocado com o produto e as contribuições de convecção e radiação para o aquecimento, além de provar relevância do modelo

ao comparar os dados simulados com os experimentais, porém sem abranger as alterações internas do alimento.

Outra abordagem para otimizar processos e proporcionar qualidade sensorial para produtos de panificação foi desenvolvida por Zareifard, Boissonneault e Marcotte (2009). Nesta pesquisa, assim como na metodologia aqui proposta, o forno de planta piloto programável foi criado e desenvolvido a fim de testar questões específicas como a variação da componente fluxo convectivo, mantendo-se constante o fluxo total de calor inserido no forno. Em comparação com o padrão, a melhor combinação fluxo total e variável convectiva diminuíram em 10% o volume total do biscoito, enquanto melhorou em 30% a textura do produto final. Esse protótipo foi de extrema importância para as indústrias panificadoras, que além de economizar energia, os autores também observaram menor perda de ingredientes, garantindo a qualidade do produto final e evitando processamentos desnecessários de padronização para novos produtos ou adequação dos já existentes.

No mesmo cenário, Carzino (2006) utilizou a linguagem Fortran para simular processos de balanço térmico de assamento, visando automação e garantia de eficiência e qualidade, a fim de encontrar medidas ótimas de projeto e condições satisfatórias de uso. O resultado permitiu dimensionar fornos para produtos específicos de panificação, otimizando montagem, rendimento e diminuindo a emissão de gases poluentes.

Nota-se nesta revisão, que é comum em fornos tipo túnel modelagens envolvendo transferência de calor e massa, no entanto, todas utilizam como modelo alimentos homogêneos, ou seja, apenas uma fase. Ademais, a maioria das simulações não são realizadas em três dimensões.

2.2 Micro-ondas

As ondas eletromagnéticas compreendidas nas faixas de freqüência de 10^3 a 10^4 MHz são denominadas de micro-ondas (ROSINI, NASCENTES e NÓBREGA, 2004). Para essa radiação aquecer os alimentos é necessário que a mesma seja confinada em uma cavidade onde seu campo elétrico oscile 2,45 X 10^9 vezes por segundo, o que corresponde a frequência de ação dos micro-ondas convencionais domésticos. Essa rápida alteração de campo faz com que as moléculas de água sejam sujeitas a um desalinhamento e realinhamento, devido às mudanças na

orientação do campo elétrico. Este movimento de alinhamento e desalinhamento aumenta a energia cinética média das moléculas, o que implica em aumento de temperatura. O calor produzido, por meio desta alta frequência de alteração entre alinhamento e realinhamento, ocasiona o aquecimento do alimento (BARBOZA et al. 2001). Na área da engenharia de alimentos, investigações científicas nesse quesito vêm se intensificando desde as últimas duas décadas.

Sabe-se que essa radiação tem a capacidade de atingir temperaturas relevantes, tanto no aquecimento convencional quanto na pasteurização, que requer no mínimo 80°C em diversos tipos de alimentos já embalados. No entanto é importante averiguar como essa radiação altera os alimentos. Na pasteurização, por exemplo, Burfoot, Griffin e James (1988) testaram três tipos de equipamentos para aquecer espaguete a bolonhesa embalados: um micro-ondas convencional de 2450 MHz e dois protótipos piloto, um de escala tipo túnel contendo quatro magnêtrons de 2450 MHz e outro acoplado a um circulador de água de 896 MHz. Temperaturas uniformes e acima do mínimo sugerido foram encontradas apenas nos alimentos testados no sistema piloto de 896 MHz. No entanto, todos os sistemas testados danificaram as embalagens e os filmes que selavam as embalagens. Nesses casos, pesquisas aprofundadas são necessárias para determinar binômios de temperatura *versus* tempo que satisfaçam as condições mínimas para que, na pasteurização, mantenha-se a integridade da embalagem, e no aquecimento/reaquecimento a qualidade do alimento. Uma primeira abordagem para entender esse binômio é modelar e simular o que ocorre com o alimento e sua embalagem utilizando computadores, conforme metodologia proposta nesta tese.

No início dos anos 90, diversas outras funções industriais das micro-ondas como fusão, fundição, sintetização, secagem e aderência foram modeladas matematicamente por Hill e Marchant (1994). Essa modelagem também foi recentemente aplicada à engenharia de alimentos por Liu et al. (2014a), que investigaram as características de distribuição de temperatura em amostras de purê de batata (A) e purê de batata com adição de 1% de cloreto de sódio (B) durante aquecimento com forno micro-ondas. A presença do composto químico na amostra B alterou significativamente a distribuição de temperatura na amostra, no entanto o modelo computacional elaborado utilizando o método dos elementos finitos, mesma ferramenta utilizada neste trabalho, mostrou-se eficiente para prever essa alteração

de distribuição de temperatura, além de otimizar tempo de preparo e freqüência de amostragem.

Além das tradicionais medidas de transferência de massa e calor, outros parâmetros de avaliação e qualidade foram estudados por Ahmad, Morgan e Okos (2000). O estudo avaliou a força mecânica e porcentagem de quebra das amostras de biscoito após armazenamento, que passaram por processo de secagem convencional (apenas radiação infravermelha) e secagem por infravermelho, seguidas por 30 segundos de micro-ondas a 700W, além de modelar as transferências ocorridas durante o processo. De forma geral, a radiação micro-ondas contribuiu para a redução do índice de quebra e diminuição significativa do teor de umidade das amostras, porém foi responsável pelo aumento da tensão de cisalhamento, característica esta que prejudica a avaliação sensorial por parte dos consumidores.

A posição das amostras no interior da cavidade é de extrema importância e pode ser explicada por experimentos didáticos realizados por Rosini, Nascentes e Nóbrega (2004). Para isso, amostras de marshmellow, água, aspirina e solução aquosa de cloreto de cobalto ($CoCl_2$) foram aquecidas em diversas posições no interior da cavidade. Ficou comprovada a necessidade de posicionar toda amostra no centro do equipamento, já que os testes comprovaram aquecimento ideal, uniformidade de umidade e incidência constante e controlada da radiação, procedimento rigorosamente seguido na metodologia deste trabalho. Isso ocorre pois a incidência da micro-onda não é uniforme, já que parte da onda é absorvida pelas paredes metálicas e parte é refletida por essa parede, ocorrendo interferências que podem ser construtivas, gerando alta intensidade (centro), e outras destrutivas, fazendo com que as demais regiões do forno não sejam uniformemente aquecidas.

Mesmo na posição central com incidência de radiação uniforme, determinados tipos de alimentos como pães e produtos assados, perdem algumas caraterísticas sensoriais após armazenamento congelado ou resfriado. Foi nesse sentido que Mandala (2004) estudou a influência do reaquecimento de pães em micro-ondas, e os comparou com pães frescos contendo goma guar e goma xantana. Mudanças estruturais foram observadas devido a formação de cristais de gelo durante a estocagem a frio do alimento. Os resultados mostraram que o reaquecimento por micro-ondas proporciona encolhimento e consequente redução da porosidade, devido ao acúmulo de umidade na superfície das amostras, além da

diminuição da maciez e crocância, reduzindo a qualidade final do alimento. Nota-se que a utlização da radiação infravermelha, adicionada a metodologia desta tese como forma de auxiliar na redução desses problemas, não foi abordada pelo autor.

Visando melhorar essas características sensoriais e as propriedades dos alimentos preparados no micro-ondas, Al-Muhtaseb et al. (2009) verificaram a influência da faixa de frequência utilizada, temperatura e teor de umidade nas propriedades dielétricas de bolos. Verificou-se nesse trabalho, que o conhecimento das propriedades dielétricas dos alimentos é fundamental para se determinar o nível de interação com o campo eletromagnético, sendo a compreensão de sua magnitude fundamental para entender os padrões de aquecimento por radiação micro-ondas. Já no estudo aqui proposto, as propriedades dielétricas não foram explicitamente abordadas mas, como será discutido adiante, manifestaram-se na forma como o alimento interagiu com a micro-onda, gerando calor.

Embora o uso da radiação micro-ondas seja alvo de críticas do senso comum, por supostamente alterar alguns parâmetros fundamentais dos alimentos, pesquisas recentes revelam que a interação de determinados ingredientes com a radiação micro-ondas, vem contribuindo para melhorar alguns aspectos de qualidade de determinados alimentos. Com o auxílio do monitoramento digital de imagens, Pardo et al. (2011) verificaram a influência da radiação micro-ondas, em potências diferentes, sob os parâmetros de perda de peso, densidade, atividade de água, umidade e luminosidade no preparo de bolos, e os compararam com aqueles preparados apenas com radiação infravermelha. Essa comparação foi realizada apenas por meio de análise sensorial e imagens, não considerando o uso de instrumentação eletrônica e sensores que aumentam a confiabilidade dos dados, diminuindo o erro. Com as ferramentas utilizadas não houve diferença significativa na preferência dos consumidores, que indicaram escalas de aceitação a todos os testes. Adaptações de potência e tempo de exposição à radiação auxiliam no encontro de condições que otimizam o preparo por micro-ondas, já que o tempo associado ao preparo utilizando apenas a radiação infravemelha é maior.

Além de ser utilizada para melhorar a qualidade e preparo dos alimentos, a radiação micro-ondas também vem sendo investigada na área microbiológica visando redução logarítmica de determinados microrganismos. Pitchai et al. (2013) verificaram a eficiência da micro-ondas para reduzir a concentração de *Salmonella* em nuggets de frango. Por meio de modelos matemáticos, foi verificado que o

aquecimento não uniforme do produto não resultou numa redução efetiva dos microrganismos, no entanto o resultado da pesquisa foi eficiente para ser utilizado no desenvolvimento de um modelo de inativação microbiana, permitindo avaliar a segurança microbiológica de certos alimentos processados.

Pesquisas mais recentes abrangem novas investigações científicas no sentido de inovar e atualizar o mercado de alimentos no quesito radiação micro-ondas. Enquanto Liu et al. (2014b) comprovaram a eficiência da radiação micro-ondas a 400 W, para converter resíduos alimentares em formas viáveis e úteis de energia por meio da pirólise, Xanthakis, Bail e Ramaswamy (2014) implantaram um processo inovador de congelamento de lombo suíno utilizando micro-ondas. O processo mostrou-se promissor e eficiente no sentido de minimizar os danos que podem ocorrer no tecido das carnes, mantendo boa textura dos produtos congelados. Todos esses esforços modernizam e renovam as pesquisas nessa área.

Atualmente, essa radiação vem sendo aplicada para: assamento, secagem, pasteurização e preservação de alimentos, além da tradicional função de reaquecer produtos prontos ou congelados. Seu uso ganhou popularidade devido à facilidade de atingir altas temperaturas, menor tempo de preparo, fácil manuseio e baixo custo de manutenção (CHANDRASEKARAN; RAMANATHAN; BASAK, 2013), além de justificar o investimento científico, fazendo com que o assunto seja atrativo para desenvolvimentos e pesquisas futuras. Por conseguinte, além das inovações associadas a esta radiação, nota-se nesta revisão a constante e incisiva busca para suprir as alterações indesejáveis causadas pela radição micro-ondas no reaquecimento de alimentos.

2.3 Uso combinado de micro-ondas e infravermelho

Investigações científicas no sentido de unir ambas as radiações, micro-ondas e infravermelha, começaram a surgir a partir dos anos 2000. A união dessas tecnologias vem sendo empregada para diversas funções e em setores variados, com o intuito de melhorar, desde a qualidade de alguns alimentos por meio do controle de umidade de superfície, até áreas diferenciadas como microbiologia, qualidade de água, climatologia entre outros (ZHANG et al. 2002; BLACKWELL e CHEN, 2006; KOWALSKI e RAJEWSKA, 2009; PACE et al. 2011).

A qualidade da água e seu tratamento de forma eficaz são de extrema importância para os atributos sensoriais e propriedades físico químicas, que asseguram a qualidade e segurança de um alimento. A combinação das radiações micro-ondas e infravermelha foram empregadas por Blackwell e Chen (2006) na determinação dos índices de turbidez e clorofila em amostras de água, melhorando significativamente ambos os parâmetros. Já Pace et al. (2011) testaram os efeitos de um protótipo unindo micro-ondas e circulação forçada de ar em substratos úmidos, que obtiveram perfis mais uniformes de aquecimento. Essa configuração pode ser efetivamente empregada no condicionamento e tratamento de determinados materiais, diversos ramos de atividade e qualidade sensorial de alimentos.

Esses protótipos e combinações que associam micro-ondas, infravermelho e circulação forçada de ar foram averiguados por Datta e Ni (2000) em alimentos. Nesse caso, perfis de temperatura e umidade de superfície de alimentos multifásicos porosos, como carne e massa de "*cookie*", foram analisados em diferentes intensidades de infravermelho e micro-ondas. Essa união acarretou no aumento da velocidade de circulação do ar, consequentemente aumento dos coeficientes de transferência de calor e massa, eliminando o excesso de umidade na superfície dos produtos, melhorando atributos sensoriais fundamentais de aceitação ao consumidor, como a textura. Embora o atributo qualidade tenha sido alcançado, diferente da metodologia aqui proposta, foi considerado equilíbrio térmico entre as fases, o que facilitou a modelagem e aquecimento uniforme das amostras.

Além do efeito direto sobre os aspectos sensoriais, Keskin, Sumnu e Sahin (2003) compararam duas formas tradicionais de preparo de pães: fornos convencionais e equipamentos de micro-ondas comuns com o preparo combinado de micro-ondas e lâmpada de halogênio, em relação ao tempo. A combinação permitiu, além de otimizar o processo, diminuir em 75% o tempo de preparo em um forno convencional. Já os parâmetros avaliados de estabilidade, volume específico e coloração apresentaram valores próximos aos preparados por meio da forma convencional, ou seja, alcançando características desejáveis pelos consumidores.

O mesmo teste foi realizado por Sumnu, Sahin e Sevimli (2004) para o preparo de bolos. Nesse estudo, pôde-se verificar as condições ideais que desenvolvem os melhores atributos sensoriais. Essa condição envolveu um tempo de preparo de 5 minutos utilizando 70% da potência total da lâmpada de halogênio e

50% da potência total das micro-ondas. A redução do tempo, comparado ao assamento convencional, foi a mesma encontrada por Keskin, Sumnu e Sahin (2003): 75%.

Pães e bolos são alvos de muitos estudos quando se trata de formas de aquecimento e reaquecimento utilizando radiações diferentes. Isso ocorre pois suas propriedades sensoriais e físico-químicas são fortemente influenciadas pelo calor. Nesse sentido, Sumnu et al. (2006) estudaram as propriedades físicas de pães sob três formas de aquecimento diferente: micro-ondas mais infravermelho, micro-ondas mais jatos de calor e fluxo de calor apenas. O método que combinou infravermelho e micro-ondas apresentou menores valores de volume específico, porosidade e umidade. Ainda que a eficiência da técnica tenha sido comprovada pelos atributos avaliados, técnicas mais precisas estão disponíveis, por exemplo, para a perda de umidade, aqui avaliada por meio da diferença de peso das amostras, e não por um sistema de medidas, como descrito nesta tese, a fim de garantir melhor sensibilidade dos valores avaliados, bem como seu comportamento quantitativo.

O aprimoramento desses processos também pode envolver modelagens matemáticas preditivas. Seyhun et al. (2008) utilizaram o modelo de diferenças finitas para predizer os perfis de temperatura em purês de batata congelados, durante o aquecimento por micro-ondas e micro-ondas associado ao infravermelho. Como o modelo permitiu um bom ajuste entre os dados modelados e os dados experimentais, esse também pode ser aplicado a outros alimentos, já que elimina a necessidade de testes.

A combinação dessas tecnologias pode ser aplicada para outros fins, que não o aprimoramento ou otimização de processos em si. O uso combinado de micro-ondas e infravermelho também vêm sendo empregado no auxílio ao desenvolvimento de novas formulações de alimentos. Nesse sentido, Demirkesen et al. (2011) desenvolveram um pão sem glúten com adição de farinha de arroz, castanhas, gomas guar e xantana para serem aquecidos na combinação das duas tecnologias. Por meio da metodologia de resposta de superfície, as formulações e condições de aquecimento foram definidas baseadas nos fatos de que, a potência do infravermelho exerce forte influência sob os parâmetros de qualidade desses pães, enquanto que a radiação micro-ondas afeta, de forma significativa, a estabilidade, volume específico e perda de peso do produto. Esses parâmetros podem ser utilizados para outras pesquisas e outros alimentos, já que se definem

dessa forma, a ação de cada tecnologia nos quesitos de importância que determinam a qualidade geral de um alimento.

Tanto modelos físicos quanto resultados experimentais, demonstraram que a micro-ondas contribui significativamente na migração de água do interior para a superfície, e que o infravermelho foi capaz de remover essa umidade superficial. Sendo assim, o emprego da combinação de ambas as tecnologias vem sendo fortemente empregado para secagem, torrefação e desidratação de alimentos e grãos (ALIBAS, 2006; GOWEN et al., 2007; UYSAL, SUMNU e SAHIN, 2008).

Diversos autores empregam a combinação das radiações para esse fim. Kantrong, Tansakul e Mittal (2012) verificaram a influência da secagem na qualidade de cogumelos Shiitake em diferentes combinações de radiação, enquanto Saengrayap, Tansakul e Mittal (2014) verificaram as mesmas influências em pimentas vermelhas. Para ambos os grupos de pesquisadores, a alta incidência de radiação micro-ondas e infravermelha, com baixa pressão absoluta, pode além de acelerar o processo de secagem diminuindo os gastos energéticos do processo, contribuir também para atributos de qualidade como coloração e textura.

Nota-se, com os diversos artigos apresentados nesta revisão, os inúmeros benefícios da ação combinada das tecnologias de micro-ondas e infravermelho. No entanto, nenhum deles estudam o efeito dessa combinação em alimentos com propriedades térmicas diferentes, como nos alimentos bifásicos, juntamente com a análise minuciosa do perfil de temperatura interno e migração de umidade, nas duas fases do alimento.

2.4 Instrumentação eletrônica no monitoramento de alimentos assados

Todos os avanços no aprimoramento do preparo controlado de alimentos assados, são baseados na capacidade de medir, com precisão, as variáveis envolvidas em um processo em escala piloto (PEREIRA, 2013). Sendo assim, essa revisão contextualizará diversas metodologias, sensores e instrumentação utilizadas hoje, tanto nas indústrias quanto em experimentos científicos, mas não necessariamente serão todas abordadas neste trabalho, apenas demonstrando desta forma, a importância da instrumentação eletrônica para o monitoramento e qualidade de qualquer processamento de alimento, focando naquelas que fundamentam a instrumentação eletrônica usada nesta tese.

Nas indústrias de alimentos, especificamente para biscoitos e produtos de panificação, existem alguns atributos cruciais que definem sua qualidade final, como coloração, formato, tamanho, aroma entre outros. Dentre esses, a coloração é de extrema importância e é alvo de intensas pesquisas científicas, já que sua classificação em escala industrial foi, por muito tempo, realizada de forma subjetiva, por meio de comparação visual de um operador (PERROT et al., 1995).

Visando a otimização do processo e qualidade ideal desse tipo de produto, Perrot et al. (1995) testaram a combinação de sensores colorimétricos e métodos de classificação probabilístico e determinístico: *Bayesian* e *Fuzzy*, respectivamente. Por meio de medidas dos parâmetros *L*, *a* e *b,* no qual o parâmetro "L" está relacionado ao branco e preto, o "a" ao verde e vermelho e "b" ao azul e amarelo, os experimentos foram realizados e a classificação do operador foi comparada com os métodos numéricos. Embora o classificador *Fuzzy* mostrou-se o mais adequado a esse tipo de análise, permitindo a substituição da classificação subjetiva com precisão, ainda assim conta-se com a limitação da dependência de um programador, tornando a técnica difícil de ser aplicada no dia a dia industrial.

Tendo em vista o mesmo proprósito, Gunasekaran (1996) destacou o aumento do uso de *hardwares* e *softwares* que acarretaram no avanço significativo da tecnologia computacional, também aplicado ao controle de processo e garantia de qualidade para engenharia de alimentos. Nesse contexto, por exemplo, o processamento digital de imagens pode ser aplicado para avaliar o produto em tempo real, com alto nível de flexibilidade e repetibilidade, sem comprometer a precisão, utilizando processamentos que envolvem captura de imagens, pré-processamento, extração de características de interesse, avaliação de qualidade e classificação final do produto, comprovando a viabilidade comercial desse tipo de tecnologia para as indústrias de alimentos.

O uso de tecnologia associada a esse tipo de controle passa por atualizações constantemente. Pesquisas recentes já utilizam sensores de fibra óptica associados a redes neurais artificiais, visando eliminar a subjetividade da classificação do atributo coloração. Pesquisadores como O' Farrell et al. (2004) e Lewis et al. (2006) implantaram esse mecanismo de análise em fornos industriais, no qual os sensores monitoram a cor dos alimentos em tempo real, examinando a luz refletida na região visível, tanto na superfície quanto no centro do alimento. A classificação realizada por meio de redes neurais treinadas com o algoritmo de erro *Back- Propagation*

obteve sucesso para ambos os autores, mostrando-se eficiente para classificar os alimentos com precisão. Apesar de eficiente e precisa, a tecnologia de fibra óptica ainda é considerada de alta de custo, limitando seu uso em diversas aplicações.

Diante de um mercado tão competitivo e de um momento tão delicado da economia nacional, a precisão e eficácia aliada ao baixo custo é fundamental para a funcionalidade e sobrevivência de pequenas, médias e grandes empresas, tanto de alimentos quanto de qualquer outro campo de atuação. Tendo em vista esses requisitos, e baseado no mesmo princípio de Gunasekaran (1996), Pereira et al. (2016) também utilizaram um *software,* desta vez o ImageJ®, mesma técnica utilizada na metodologia desta tese, para padronizar, baseado na coloração da superfície, o término do assamento de alimentos assados em forno tipo túnel. A classificação mostrou-se extremamente eficiente, de fácil aplicação e avaliação, além de apresentar custos inferiores a muitas outras tecnologias disponíveis no mercado.

Como não só a cor define os padrões de qualidade dos produtos assados, pesquisas também estudam novos sensores baseados nas medidas de odores, ou seja, métodos de caracterização e controle a partir do aroma do alimento, fundamental para seus critérios de qualidade e monitoramento dos processos de assamento e torrefação. Nesta linha de pesquisa, Kohl et al. (2001) estudaram a interação entre aromas típicos de determinados alimentos e a resposta dos sensores de gás semicondutores e sensores micro gravimétricos. Para a torragem de “pães brancos”, por exemplo, o controle mostrou-se eficaz utilizando nariz eletrônico simples, por meio do controle do composto 2-acetil-1-pirolina. No entanto, em ambos os sensores as detecções dependem do estado de oxidação das moléculas, limitando seu uso, já que os sistemas de medidas basedo nesta tecnologia são sujeitos a falhas críticas.

A busca constante de qualidade nesse ramo da indústria envolve também a influência da quantidade de água e vapor disponível no produto e no ar. Tendo em vista esse propósito, Schirmer et al. (2011) utilizaram sensores de umidade, resistentes a alta temperatura, para monitorar em tempo real, o processo de assamento de pães, medindo a quantidade de água no ambiente, a condensação de água da superfície do alimento e a liberação de água do produto. Nesse estudo, o volume final e as propriedades da crosta foram utilizados como parâmetros fundamentais, podendo-se concluir que o aumento da quantidade de vapor

dissipado afeta positivamente diversas propriedades dos pães como volume, espessura da crosta, alteração de coloração, firmeza e crocância. Sendo assim, o sistema utilizado disponibiliza uma oportunidade de controle de processo durante o assamento, reduzindo a umidade até um valor mínimo desejável, fornecendo além de produtos de qualidade, economia de energia. Nota-se que, mesmo resistente a altas temperaturas, as avaliações utilizando o sensor de umidade, foram realizadas apenas no ambiente e na superfície das amotras, mas não no interior delas, conforme abordado nesta tese.

Empregado pela primeira vez na engenharia de alimentos nesta tese, o sensor LinPicco™ AXXX Basic, foi reportado por diversos autores como Hérran et al. (2012), Hérran et al. (2014) e Nurme et al. (2015) como sendo preciso e sensível para pequenas alterações permitindo, deste verificar alterações mínimas de umidade em diversas atmosferas, como avaliar as interferências de pequenas alterações de umidade nas características físico químicas de nanopartículas e nanobastões de óxido de zinco.

O monitoramento em tempo real de processos industriais é fundamental para economia de energia e aperfeiçoamento de processamentos. Esse acompanhamento *online* de atributos de produtos assados também foi realizado por Pereira et al. (2013) como método telemétrico de observação da evolução do comportamento da massa durante seu preparo. Esse comportamento foi monitorado por meio de mudanças no torque do motor, podendo-se comprovar que existe uma grande sensibilidade do sistema frente às variações de formulação, podendo ser utilizado, tanto para controle de qualidade quanto para tomadas de decisões. Além disso, esse mecanismo de tecnologia sem fio pode facilmente ser adaptado a linhas industriais.

Métodos de monitoramento em tempo real inéditos também vêm sendo empregados nos processamentos industriais. Uma das técnicas mais recentes empregadas na engenharia de alimentos são os narizes e línguas eletrônicas, que contribuem para a classificação e análise de um determinado produto. Nesse contexto, Peris e Gilabert (2013) revisaram processos de fermentação de alimentos utilizando essa técnica. Apesar de muito promissora os autores ainda a consideram em estágio inicial devido a preocupações com precisão e validação. Embora tanto os narizes quanto as línguas eletrônicas permitam medições rápidas, de baixo custo e fácil automação, possibilitando controle contínuo e efetivo durante a fermentação,

esses também necessitam de cuidados. Com relação às línguas eletrônicas a contaminação da superfície dos sensores pode instabilizar sua calibração, o que não é observado nos narizes eletrônicos. No entanto, ambos demandam atenção já que exigem tempo para obter equilíbrio entre as fases de gás e líquido, princípios de seu funcionamento, restringindo seu uso em escala industrial.

Diante dos dados e fatos apresentados e discutidos neste tópico, nota-se a inexistência da engenharia sem a precisão da instrumentação eletrônica e sensores. Diante disso e dentro das limitações financeiras desse projeto, a metodologia aqui apresentada, abrange calibrações, sensores e tecnologia de medição em todas as etapas, visando monitorar todas as variáveis pertinentes ao escopo da tese.

2.5 Simulação computacional

A exigência contínua pela melhoria do processamento e qualidade de alimentos, surgiu como um incentivo para que a simulação computacional, tanto em processos térmicos como não térmicos, fosse uma técnica viável de controle prévio de processamento, bem como o desenvolvimento de equipamentos e processos de forma eficiente (MONDACA; GÁLVEZ e MORAGA, 2011). No entanto, o uso desta ferramenta deve ser utilizada em conjunto com técnicas tradicionais como experimentos físicos e soluções analíticas, a fim de agregar conhecimento aos fenômenos de transferência de calor e de massa em alimentos. Desta forma, uma modelagem matemática adequada, combinada com as simulações computacionais, permite predizer fenômenos de transporte, conceber equipamentos mais bem dimensionados e melhor controle dos processos de forma geral (NORTON e SUN; 2006). Sendo assim, esse tópico contextualiza as diversas aplicações da simulação computacional em variados processos associados a engenharia de alimentos.

Dentre os processos térmicos praticados nas indústrias de alimentos, visando conservação e segurança de alimentos, a esterilização é de extrema importância e amplamente empregada e exigida por orgãos regulamentadores. No entanto, a falta de informação relacionada a esterilização com subcongelamento de temperaturas iniciais fez com que Richard, Durance e Sandberg (1991) simulassem computacionalmente esse processo, utilizando o mesmo método dos elementos finitos abordado neste trabalho, para simular a penetração de calor e desagregação de nutrientes nas embalagens de alimentos enlatados. Essa simulação foi de

extrema importância, já que não existe solução analítica da equação de transferência de calor em situações em que, tanto o calor latente quanto o calor sensível são importantes. Várias combinações de temperatura foram testadas e os resultados comprovaram que somente o fator *lag* e o tempo de processamento foram alterados, sem danificar nutrientes e qualidade global, comprovando a necessidade e viabilidade das simulações, a fim de definir binômios de variáveis difíceis de serem avaliadas apenas experimentalmente.

O mesmo tipo de geometria cilíndrica, submetida ao mesmo processo de esterilização, também foi modelada matemáticamente e simulada computacionalmente por Banga et al. (1992) para atum enlatado. O alimento foi coletado, embalado e armazenado a -40 ^{o}C. Três modelos matemáticos foram testados (a) isotrópico homogêneo, (b) homogêneo anisotrópico e (c) anisotrópico e não homogêneo. Foi realizado tratamento térmico necessário e experimentos de difusividade térmica. Os dados coletados alimentaram a simulação computacional a fim de predizer o melhor tratamento. Os resultados mostraram que o modelo anisotrópico e não homogêneo se mostrou mais eficiente que os demais, evitando processamentos desnecessários.

Alimentos embalados a vácuo também são submetidos a esse tipo de simulação. O método da diferença finita foi utilizado por Ghazala et al. (1995) para simular os perfis de temperatura *versus* tempo, para processamento de alimentos derivados de carne e peixe embalados a vácuo. Amostras de carne (pH = 5,0 e aw = 0,98) e peixe (pH = 7 e aw = 0,97) foram testadas em diversas condições de temperatura e tempo. O modelo foi validado a partir da comparação com dados experimentais, sendo utilizado para predizer as respostas de temperatura *versus* tempo, assim como na metodologia de Banga et al. (1992) e nos experimentos propostos neste trabalho, bem como redução microbiológica e tempo de pasteurização.

O congelamento também pode ser considerado uma técnica eficiente de conservação de alimentos, alcançando ótima qualidade do produto final. No entanto, trata-se de um processo difícil de descrever, devido a não linearidade da equação de difusão de calor, com propriedades termofísicas variando com a temperatura. Uma boa predição do tempo de congelamento, bem como a distribuição de temperatura também são fundamentais. Visando resolver essas questões Wang et al. (2006b) utilizaram o método da diferença finita e simularam computacionalmente o

congelamento de alimentos cilíndricos e esféricos. O problema relacionado a mudança de fase da água foi resolvido com uma aproximação do calor específico aparente e a alteração das propriedades físicas, descrito por uma curva quadrática. Os valores simulados foram validados com os dados experimentais, com coeficiente de determinação (r^2) de 0,99, significando que o modelo e a simulação podem ser utilizados para predizer tempo de congelamento em diferentes geometrias, demonstrando a eficiência das simulações, também para processos de congelamento.

Diferente do processo de congelamento, a desidratação acarreta no aumento da estabilidade devido a diminuição da atividade de água, reduzindo o potencial de deterioração durante longos períodos de estocagem a temperatura ambiente. No entanto, a qualidade sensorial e nutricional é inferior ao produto original. Tendo em vista esse desafio e buscando minimizar os danos causados pela desidratação Aversa et al. (2006) utilizaram o método dos elementos finitos para simular amostras retangulares de arroz e cenoura no processo de desidratação. Os resultados da simulação foram comparados com os experimentais, e o modelo proposto permitiu predizer a distribuição de temperatura e umidade no centro das amostras durante o processo de secagem, evitando desta maneira, processamentos desnecessários e desperdício de matéria-prima.

Não somente os processos de conservação, mas também os próprios processos de fabricação, vêm acompanhados por limitações e dificuldades. A predição do conjunto de variáveis nesses casos é fundamental para evitar testes, desperdícios e garantir o processo mais eficiente possível. Dentro desse contexto, Purlis (2010) simulou computacionalmente o processo de assamento de pães levando em consideração os fenômenos de transferência de calor e de massa, bem como o modelo de cinética de gelatinização do amido e escurecimento, a fim de encontrar as condições ideias de processamento. 105 condições de operação foram simuladas utilizando o MEF. Diferente da metodologia proposta nesta tese, o ponto final do processo de assamento foi estabelecido apenas para valores de lumininosidade de superfície, sem avaliar as condições internas do alimento, como umidade e temperatura. A simulação permitiu identificar as melhores condições e variáveis para o assamento dos pães, com a finalidade de obter as características sensoriais atrativas ao consumidor.

O processo de cozimento em carnes também pode ser simulado para predizer e controlar suas mudanças estruturais e físicas. Diferente das tecnologias de fácil acesso e baixo custo como chips, utilizadas nesta tese, Bouhrara et al. (2011) simularam numericamente a distribuição de temperatura durante aquecimento da amostra, para vincular as modificações estruturais e a transferência de água às variações de temperatura, com o auxílio de imagens de ressonância magnética nuclear, tecnologia complexa e de alto custo. A contração miofibrilar e redes de colágeno foi observada a 42 ^{o}C e a água começou a migrar em direção aos espaços interfasciculares a 40 ^{o}C. Sendo assim, essa simulação permitiu monitoração simultânea de deformação local e transferência de água, mudanças estruturais em músculos e fibras, bem como o histórico térmico, garantindo e assegurando eficiência nesse processo de cozimento.

Técnicas mais recentes envolvem por exemplo, esterilização térmica assistida por radiação micro-ondas. Dentro do mesmo contexto estudado nesta tese, Resurreccion Jr. et al. (2013) desenvolveram um modelo para esse tipo de simulação computacional, que incluia determinação da taxa ótima de aquecimento, avaliação da distribuição do campo magnético resultante do padrão de aquecimento dos alimentos e validação experimental do padrão de aquecimento. Essa pesquisa comprovou a distribuição simétrica do campo magnético, não acarretando em nenhum tipo de dano as amostras, além de reduzir a diferença entre ponto frio e ponto quente em 65% e confirmar que a circulação de água na amostra reduz o efeito de aquecimento nas bordas, reduzindo os danos nessas áreas.

Nota-se, nas diversas áreas de aplicações, que a simulação computacional faz-se necessária para auxiliar e garantir processos mais realísticos e eficientes possíveis, visando sempre menor desperdício e otimização.

2.5.1 Programa de simulação computacional Ansys®

Existem 2 formas de fazer simulação computacional: criando um código fonte específico para um problema (Valente et al. 2012) ou usando *softwares* disponíveis no mercado. O *software* Ansys®, utilizado neste trabalho, é um exemplo de sistema operacional comercial disponível para diversas aplicabilidades. Abaixo serão descritas algumas das muitas aplicações deste *software*, apenas com intuito de comprovar a importância e destacar as vantagens desse tipo de análise, como controle prévio de qualquer processamento.

Na área da engenharia de alimentos, esse tipo de simulação vem sendo utilizada principalmente em processos térmicos. Kiziltas, Erdogdu e Palazoglu (2009) destacaram a ausência de estudos completos de simulação computacional para auxiliar e otimizar os processos térmicos de conservas enlatadas. Visando solucionar esse tipo de problema o Ansys® foi utilizado para prever as mudanças de temperatura no interior da lata, bem como resolver equações de continuidade, energia e momento. Experimentos foram conduzidos replicando as condições ideais de pasteurização e os resultados foram confrontados com os da simulação. Os resultados comprovaram a significativa contribuição da simulação computacional, a fim de otimizar o processo industrial de produção de conservas enlatadas de ervilha, milho, cebola entre outras.

A mesma abordagem foi conduzida por Bottani et al. (2013) para solucionar o binômio ideal de temperatura *versus* tempo, a fim de garantir condições ideais de pasteurização para “ravioli” de carne e “oricchiette” sem recheio (massas frescas). O *software* Ansys® foi utilizado para simular o processo de aquecimento dessas massas a fim de encontrar os valores de temperatura em função do tempo, tanto no centro do “ravioli” quanto na superfície do “oricchiette”. Os dados experimentais foram confrontados com os da simulação e os resultados comprovaram a utilidade potencial da simulação para avaliar o desempenho deste processo.

Essa ferramenta também vem sendo utilizada em diversas áreas, a fim de predizer danos ou condições ideais de processamento e teste, em problemas específicos, tais como simulação da resistência do rolamento de pneus (Wang e Ji, 2010), avaliação de matérias-primas, tipo de geometria, capacidade de carga máxima e características mecânicas em geral (Chen, Song e Zhang, 2011), distribuição de campo elétrico em concreto bem como a avaliação dos fatores que influem na força do campo elétrico e potencial elétrico de um material (Jiangmiao, Zhixin e Ying, 2013).

De forma geral, tanto na área da engenharia de alimentos quanto nas demais áreas citadas, a simulação computacional pode e deve ser utilizada como uma ferramenta de otimização e predição, já que traz benefícios diversos desde economia financeira e operacional á energética.

3 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo geral testar a seguinte hipótese:

“A combinação das radiações micro-ondas e infravermelha pode ser usada como uma nova alternativa no reaquecimento de alimentos bifásicos em forno tipo túnel em escala-piloto”

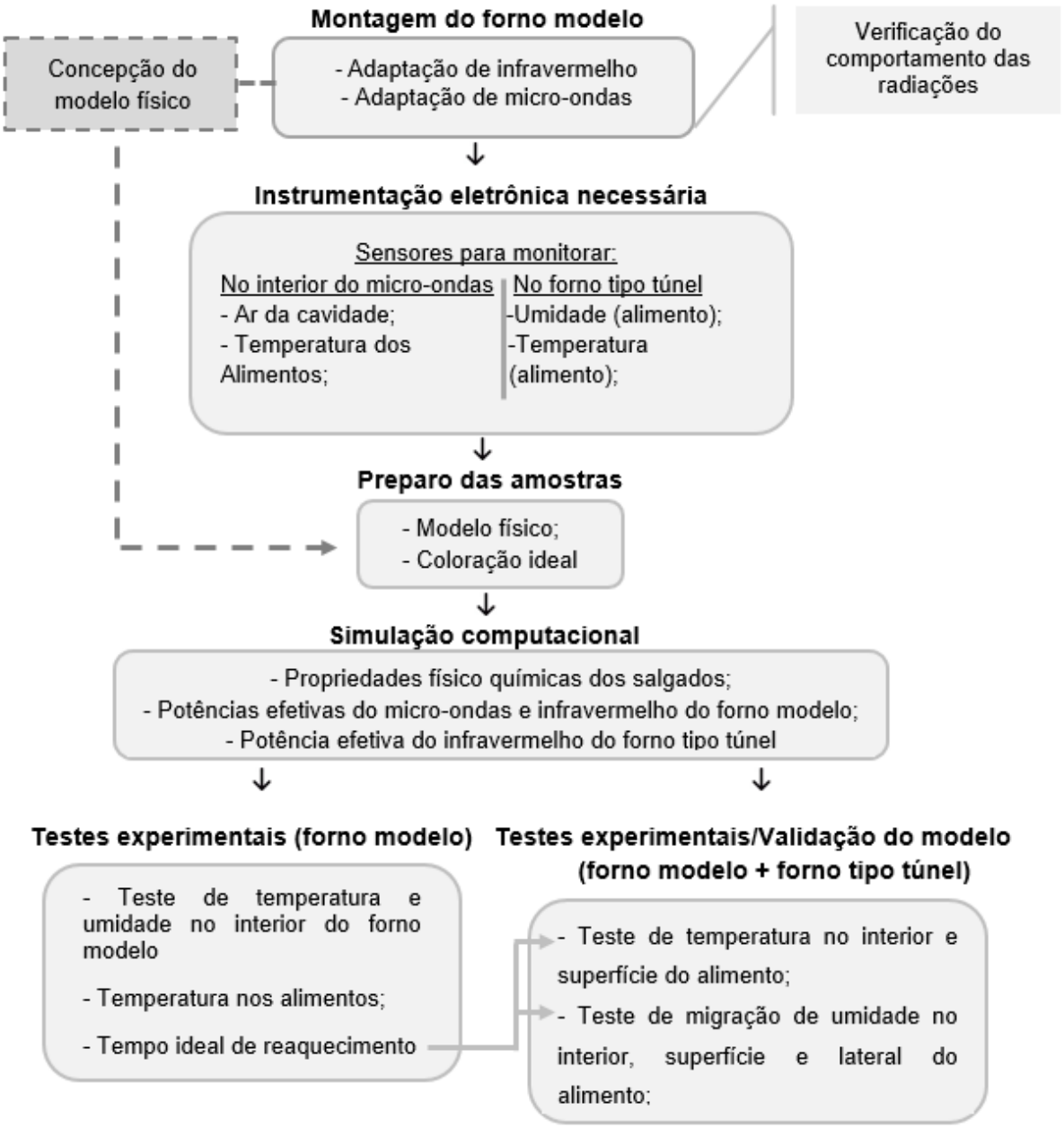
Os objetivos específicos compreenderam:

- *Desenvolver um protótipo em escala piloto composto por um forno micro-ondas convencional com infravermelho e circulação de ar;*
- *Avaliar no protótipo o comportamento das radiações;*
- *Conceber um modelo matemático;*
- *Simular computacionalmente o reaquecimento de alimentos bifásicos;*
- *Desenvolver a instrumentação eletrônica necessária;*
- *Validar o modelo matemático proposto por meio do reaquecimento das amostras: verificar coloração ideal, temperatura interna e externa e migração de umidade nas amostras, submetidos a combinação das radiações.*

4 Materiais e Métodos

Visando facilitar a compreensão dos experimentos, uma visão geral da metodologia realizada neste trabalho, pode ser visualizada no fluxograma identificado como Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma geral da metodologia



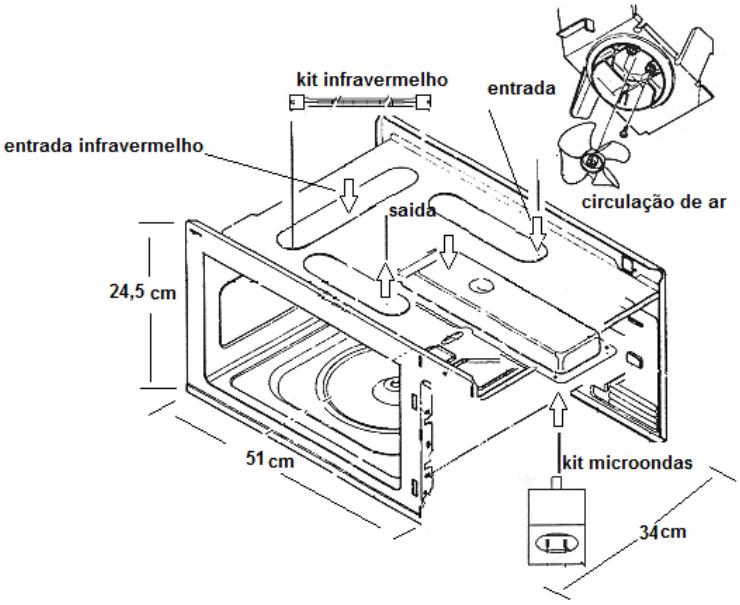
Fonte: Própria autoria

4.1 Adaptações do forno micro-ondas convencional

4.1.1 Descrição do experimento de pré teste

O conceito geral do projeto, utilizado para adaptação física do forno e execução dos testes preliminares do uso combinado de micro-ondas e infravermelho, pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama esquemático do forno desenvolvido



Fonte: Própria autoria

Dessa forma, foram unidas na cavidade três formas de ação térmica, composta pela ação das radiações micro-ondas, infravermelha e circulação forçada de ar quente, formando assim o forno experimental. Para controle de temperatura e umidade da cavidade, sensores termo higrômetro foram instalados na região superior, e para o monitoramento em tempo real do aquecimento do alimento, termopares tipo K foram utilizados.

4.1.2 Adaptação do infravermelho

Uma lâmpada de halogênio de 1500 W foi instalada na região superior da cavidade do forno. O sistema eletrônico de controle da potência do infravermelho foi integrado ao sistema de controle central desenvolvido para o forno.

As aberturas na cavidade do forno foram blindadas para impedir o vazamento de radiação micro-ondas.

Na região inferior do aparato experimental, uma resistência foi instalada exatamente abaixo do prato giratório, para garantir a ação satisfatória da lâmpada de halogênio, tanto na temperatura quanto na remoção de umidade. A radiação foi direcionada diretamente na superfície do alimento na direção vertical, enquanto a resistência elétrica inferior aquecia o prato giratório e auxiliava na eliminação de umidade. Para evitar contato com a radiação micro-ondas, as lâmpadas foram protegidas por uma blindagem dentro da cavidade do forno.

4.1.3 Adaptação do micro-ondas

Sabe-se que as micro-ondas são geradas pelo fenômeno de ressonância que ocorre dentro do magnetron. As ondas geradas são então guiadas até a cavidade do forno que serão ora refletidas ora absorvidas. Em fornos de micro-ondas convencionais, o guia de ondas é disposto de maneira a guiar as ondas pela lateral da cavidade. Neste experimento, o micro-ondas foi projetado de tal forma que permitiu conectar o guia de ondas na cavidade, de modo que a radiação penetre pela região superior da cavidade ao lado da fonte infravermelha.

4.2 Monitoração da temperatura e umidade

A padronização é um dos principais mecanismos para garantir uma boa aceitação dos consumidores em relação aos produtos oferecidos. A extinção da variação nos processos produtivos, somente pode ser promovida com o estabelecimento de rotinas de produção, que permitam a aquisição de informações com a finalidade de aumentar a eficiência na produção, de forma que torne possível o fornecimento de produtos com um padrão de qualidade homogêneo.

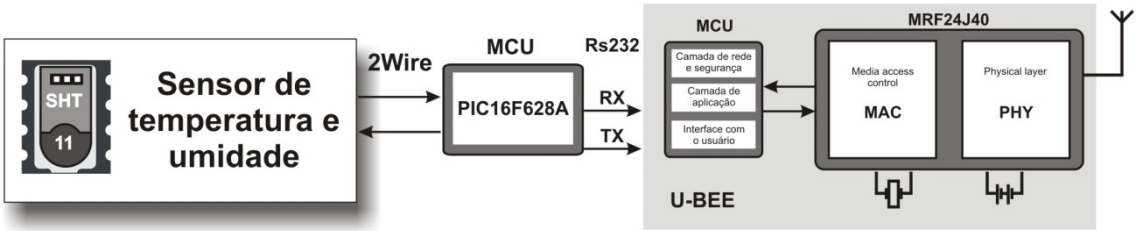
O monitoramento do ambiente interno do forno de aquecimento é fundamental para padronizar algumas características importantes do alimento, como atividade de água, textura e coloração.

4.2.1 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do ar da cavidade

O sensor termo higrômetro *wireless* foi projetado para coletar dados de temperatura e umidade do ar na cavidade, e transmiti-los até um *software* supervisor por meio de uma rede *wireless Zigbee.* O sensor termo higrômetro SHT11 com saída

digital, é conectado por meio de uma interface *2wire* com o microcontrolador PIC modelo 16F628A. Esse microcontrolador possui um programa interno que coordena uma entrada com o computador, por meio de uma interface sem fio, chamada UBEE (FRACTUM, 2013). O UBEE, interligado ao microcontrolador, é responsável pela transmissão dos dados de temperatura e umidade (Figura 3). Todo o circuito é alimentado por uma fonte reguladora de tensão de 3,3V.

Figura 3 - Diagrama de blocos do nó sensor móvel



Fonte: Própria autoria

Para efetuar as medidas de temperatura e umidade no interior do forno, esse dispositivo desenvolvido foi instalado em um ducto de saída de ar forçado.

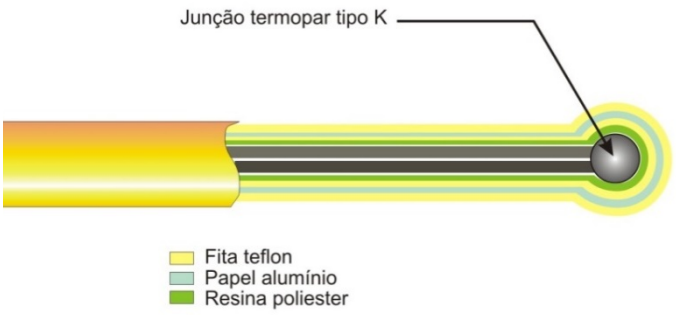
4.2.2 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do alimento

O registro de temperatura interna do alimento, durante o processo de aquecimento, é uma informação útil que permite definir o melhor ciclo de aquecimento, no contexto deste experimento.

No entanto, o registro contínuo da temperatura dentro de um forno micro-ondas apresenta algumas dificuldades técnicas, já que o emprego de sensores de temperatura do tipo termopar, no interior de um forno micro-ondas, resulta em excessivo ruído no sinal coletado, descargas elétricas e até danos ao circuito gerador do campo eletromagnético (CUCCURULLO et. al, 2002).

Utilizando a metodologia descrita por Zinet e Levent (2000), foi construído um dispositivo para medir a temperatura utilizando termopar tipo K, blindados por uma camada de alumínio e isolados eletricamente com resina poliéster e fita teflon. A blindagem utilizada no termopar é mostrada na Figura 4.

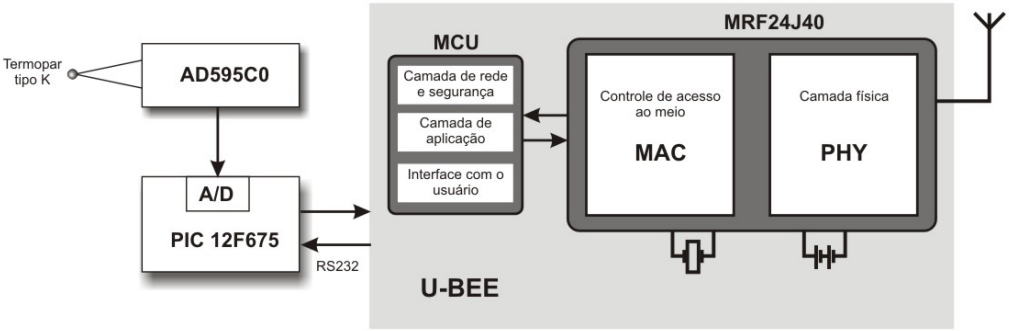
Figura 4 - Detalhe da blindagem utilizada no termopar



Fonte: Própria autoria

O sensor tipo k é conectado a um amplificador de instrumentação, o AD595, que possui uma junção fria de referência para calibração do sensor tipo K, acoplado ao chip. A saída analógica do AD595 é digitalizada pelo conversor analógico/digital do PIC12F675 de 10 bits, que por sua vez, envia os dados para o computador por meio de uma interface UBEE (Figura 5), conforme descrito anteriormente.

Figura 5 - Diagrama de blocos do dispositivo de coleta de temperatura



Fonte: Própria autoria

A alimentação dos circuitos foi feita por meio de uma fonte regulada de 3,3 V.

Para ambos os microcontroladores, tanto para o controle da cavidade quanto para o alimento, foi desenvolvido um *firmware* (programa de computador com instruções executadas diretamente no microcontrolador), a fim de controlar os sensores ligados aos PICs.

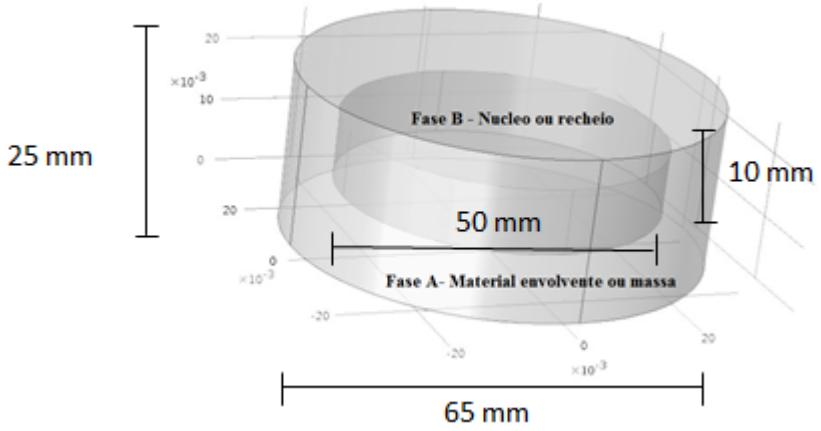
4.2.3 *Software* de aquisição de dados

Para controle e monitoramento dos dados enviados pelos sensores, por meio da rede ZigBee, um *software* foi desenvolvido utilizando o ambiente Visual Studio 2012 e a linguagem Visual Basic.

4.3 Preparo das amostras

O modelo físico utilizado neste trabalho foram os salgados assados e seguiram os padrões de fabricação de Pereira et al. (2016). Essas amostras foram modeladas com 2 fases, cada qual com valores diferentes de propriedades térmicas: uma denominada massa ou envoltório, e a outra denominada núcleo ou recheio, ambas com dimensões padronizadas, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Esboço geométrico que modela as amostras



Fonte: Própria autoria

Os ingredientes da massa foram padronizados conforme Tabela 1.

Essa massa foi submetida a análise para determinação da composição centesimal pelo Laboratório de Nutrição, do Departamento de Zootecnica da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo.

Para o preparo da massa, inicialmente misturaram-se os ingredientes secos: farinha de trigo, sal e açúcar, seguida pela adição da água morna, óleo e por último o fermento. Após a massa pronta, a fabricação dos salgados foi iniciada imediatamente, sem necessidade de tempo de descanso para fermentação.

Tabela 1 - Massa de salgado padronizada

Ingrediente	Quantidade
Farinha de trigo	700 g
Fermento	30 g
Água	375 mL
Óleo	250 mL
Sal	15 g
Açúcar	25 g

Fonte: PEREIRA, L.A.M., PIZA, L.V., VICENTE, M., ARCE, A.I.C., SILVA, A.C.S., TECH, A.R.B., COSTA, E.J.X. Construção de um forno elétrico em escala piloto experimental usando instrumentação de sensores sem fio para a avaliação de alimentos assados. **Food and Bioproducts Processing**, Pirassununga, v.100, parte A, p.214-220, 13 jul 2016.

Cada ingrediente adicionado a massa possui uma função específica. Nesta tese, como o foco principal é temperatura e umidade, destaca-se a importância da água e sua influência tanto durante assamento quanto no reaquecimento desse tipo de amostra. Tendo como funções primordiais assegurar a união das poteínas que dão origem ao glúten, fornecer meio propício ao desenvolvimento da atividade enzimática, controlar temperatura, umidecer o amido e controlar maciez e palatabilidade, a água, substância polar, interage tanto com a radiação infravermelha, quanto sofre forte influêcia da radiação micro-ondas, entrando em ressonância devido a mudanças na orientação do campo elétrico, proporcionando aumento de temperatura.

Já os ingredientes do recheio foram padronizados conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Massa de recheio padronizado

Ingrediente	Quantidade
Carne moída (patinho)	1 kg
Tomate	200 g
Cebola	100 g
Azeitona	5 unidades

Fonte: PEREIRA, L.A.M., PIZA, L.V., VICENTE, M., ARCE, A.I.C., SILVA, A.C.S., TECH, A.R.B., COSTA, E.J.X. Construção de um forno elétrico em escala piloto experimental usando instrumentação de sensores sem fio para a avaliação de alimentos assados. **Food and Bioproducts Processing**, Pirassununga, v.100, parte A, p.214-220, 13 jul 2016.

Para controle do tamanho e peso das amostras, e para confrontar com os dados da simulação computacional, formas cilíndricas de alumínio (Figura 7) com diâmetro interno de 6,5 cm e altura de 2 cm foram utilizadas.

Figura 7 - Forma cilíndrica de alumínio

Fonte: Própria autoria

Após o preparo, 12 amostras eram distribuídas uniformemente sobre uma forma circular (Figura 8) e aquecidas em forno convencional a 220°C por 40 minutos.

Figura 8 - Vista superior das amostras

Fonte: Própria autoria

Já no interior do forno, a cada 10 minutos as amostras eram reposicionadas na bandeja, a fim de se garantir incidência uniforme de radição em todas as amostras.

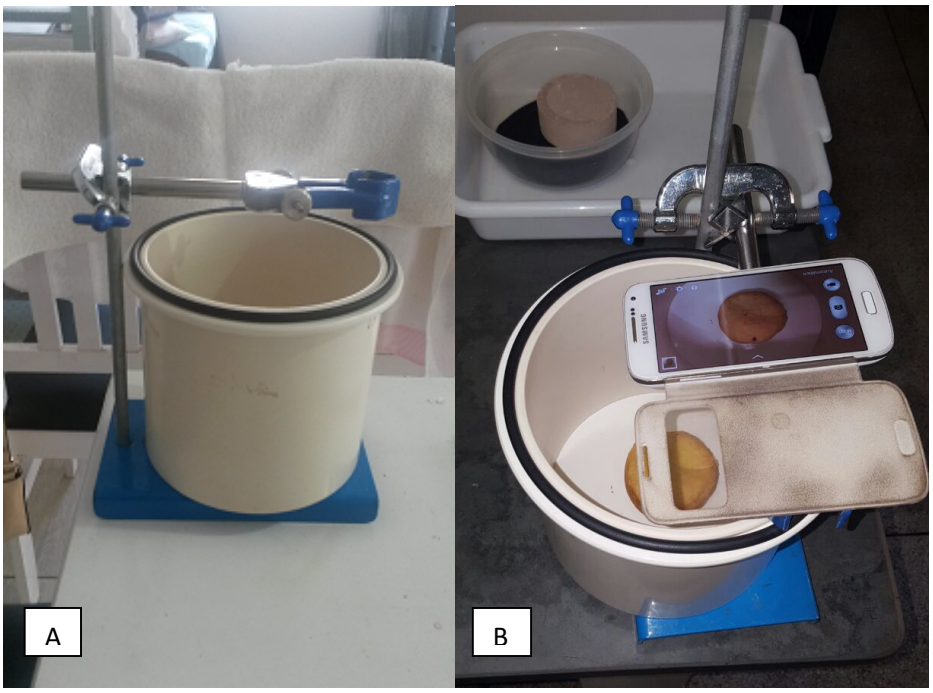
Todos os salgados de teste eram armazenados em bandejas de alumínio (8 unidades por bandeja) (Figura 9) e refrigerados pelo menos durante 24 horas e utilizados com até 72 horas após sua fabricação.

Figura 9 - Embalagem de alumínio utilizada para a refrigeração

Fonte: Própria autoria

Para se determinar o ponto final de preparo das amostras, além do tempo de assamento, foram tomadas imagens da superfície dos salgados e realizado um processamento no *Software ImageJ*®, a fim de obter o histograma, em escala de cinza, de cada uma delas. Esse *software* foi utilizado por se tratar de um *software* livre, de fácil utilização e amplamente empregado na literatura, conforme pesquisas de Valverde, This e Vignolle (2007), Igathinathane, Pordesimo e Batchelor (2008) e Duarte et al. (2015). As imagens foram tiradas utilizando a câmera do celular Samsung S4 mini de 8 Megapixel e resolução de 3264 x 2448 pixel. As amostras eram retiradas do forno e as imagens eram capturadas de forma padronizada, utilizando o aparato experimental necessário, conforme Figura 10, a fim de manter constantes variáveis que interferem na qualidade da imagem tais como iluminação e distância entre câmera e amostra.

Figura 10 - A - Aparato experimental para capturar imagens; B - Alimento sendo fotografado



Fonte: Própria autoria

Definiu-se como ideal, as amostras que atingiram coloração média dentro dos intervalos de variação dos parâmetros definidos pelo histograma padrão.

4.4 Cálculo dos parâmetros para a simulação computacional

A simulação computacional foi realizada no *Software* Ansys®, com o intuito de conhecer o perfil de aquecimento de salgados, utilizando uma combinação de infravermelho e micro-ondas. Essa simulação permite obter a melhor configuração de intensidade de ambas as fontes de energia térmica, visando garantir o aquecimento mais homogêneo possível. Ademais, essa configuração permitirá minimizar o tempo de reaquecimento e gasto energético, além de permitir uma melhor compreenção do comportamento das duas radiações: micro-ondas e infravermelha, no modelo utilizado.

4.4.1 Propriedades físico químicas dos salgados

Para determinar o calor específico (c_p) à pressão constante, tanto da massa (Fase A) quanto do recheio (Fase B), foi utilizado um calorímetro padrão e um termopar. Por se tratar de um calorímetro não ideal, este foi aferido de forma a se determinar seu equivalente em água, ou seja, a quantidade de água que terá o mesmo comportamento térmico de uma massa qualquer de uma outra substância (numericamente é igual a capacidade térmica da substância), e a perda energética para o ambiente.

O equivalente em água foi determinado a partir do princípio de equilíbrio térmico (Equação 1), obtido após troca térmica dentro do calorímetro, de acordo com Equação 3:

$$\boldsymbol{Q_{ganho}} = \boldsymbol{Q_{perdido}} \tag{1}$$

$$\left((\mathbf{w}.\boldsymbol{c_p} + \mathbf{m_{água1}}.\mathbf{c_{p(água)}})\right).(\mathbf{T_3} - \mathbf{T_1}) = \mathbf{m_{água2}}.\mathbf{c_p}.(\mathbf{T_2} - \mathbf{T_3}) \tag{2}$$

$$C.(T_3 - T_1) + m_{água1}.c_p.(T_3 - T_1) = m_{água2}.c_p.(T_2 - T_3) \tag{3}$$

Em que:

Q = Calor

$m_{água1}$ = massa de água do calorímetro

T_1 = Temperatura inicial da água no calorímetro

$m_{água2}$ = massa de água aquecida adicionada ao calorímetro

T_2 = Temperatura da água a ser colocada no calorímetro

T_3 = Temperatura de equilíbrio

w = Equivalente em água do calorímetro (g)

c_p = Calor específico da água

C = Capacidade térmica do calorímetro

Calculado o valor da quantidade do equivalente em água do calorímetro, que compensa a perda energética por se tratar de um recipiente não ideal, os calores específicos, tanto da massa quanto do recheio, foram calculados da seguinte forma: 100 gramas da massa de interesse foi adicionada juntamente com a quantidade de equivalente em água, ambos a temperatura ambiente de 26°C, em um calorímetro contendo 590 mL de água a aproximadamente 86°C. Esperou-se o equilíbrio térmico e a variável de interesse foi obtida pelo mesmo princípio da Equação 1.Todos esses experimentos foram realizados em triplicata.

Já sua perda energética foi obtida por meio do gráfico dos dados de temperatura (°C) *versus*. tempo de estabilização (segundos). Com as informações da formulação, tanto da massa quanto do recheio, a condutividade térmica teórica foi determinada baseando-se na composição centesimal da mistura, nas informações disponíveis na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, na metodologia utilizada por Choi e Okos (1983) e Choi e Okos (1986).

4.4.2 Simulação computacional para reaquecimento das amostras no forno modelo

4.4.2.1 Potência efetiva

Corpos de prova de 315g de ferro e 50g de alumínio foram aquecidos separadamente para determinar a potência real, tanto do infravermelho superior quanto inferior. No caso do micro-ondas, um copo de cerâmica com 300 mL de água foi utilizado. As temperaturas dos corpos de prova e da água eram medidas em intervalos de 5 segundos a fim de se determinar o perfil de aquecimento desses materiais. A partir da inclinação da reta desses perfis, colocados em um gráfico de temperatura *versus* tempo, determinou-se a potência efetiva de cada fonte de calor utilizada, por meio das Equações abaixo:

$$Q = m.c_p.\Delta T = P.t \quad (4)$$

$$\Delta T = \left(\frac{P}{m.c_p}\right).t + c \quad (5)$$

$$\Delta T = a.t + c \ \therefore a = \left(\frac{P}{m.c_p}\right) \quad (6)$$

Em que:

a = inclinação da reta

P = potência efetiva

m = massa do corpo de prova

c_p = calor específico do corpo de prova

c = constante

t = tempo

ΔT = variação de temperatura

4.4.2.2 Simulação computacional

Com os valores das propriedades térmicas das amostras determinadas e a potência efetiva incidente no salgado calculada, foi desenvolvido um algoritmo para simular a propagação do calor no salgado em função do tempo, tanto para o aquecimento com infravermelho como para o aquecimento com micro-ondas.

Aplicando o método dos elementos finitos para resolver a equação de difusão de calor em regime não estacionário (Equação 7), foi possível simular o comportamento térmico do alimento.

$$k.\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right] + \dot{Q} = \rho.c_p.\frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Em que:

T = temperatura

x,y,z = coordenadas do espaço

t = tempo

ρ = densidade

c_p = calor específico

k = constante de condutividade térmica do material

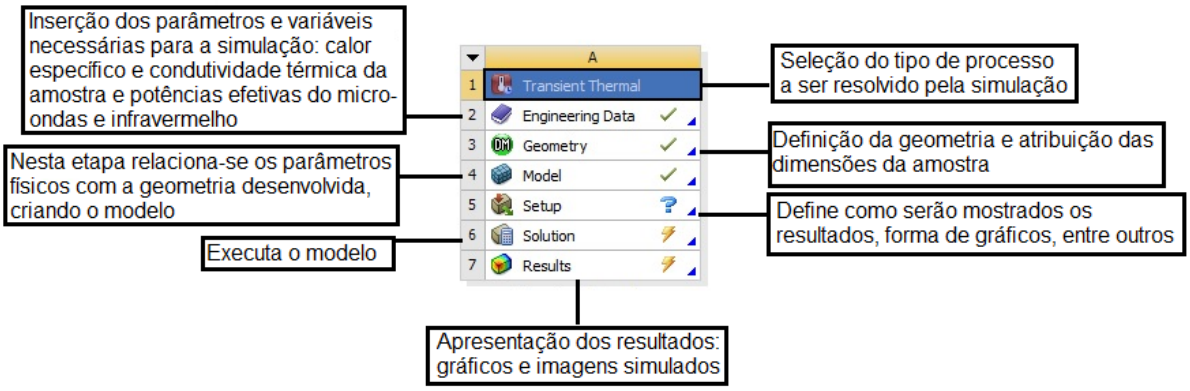
$\dot{Q}$ = taxa de calor (fluxo)

As condições de contorno para o valor inicial foi de T(x,y,z,0) = 12,4 ± 0,4 ^oC para superfície externa (massa) e T(x,y,z,0) = 5,7 ± 0,9 ^oC para o recheio (núcleo), assumindo que o salgado está em equilíbrio térmico com a temperatura refrigerada

antes do reaquecimento, em todos os eixos espaciais. Também foram consideradas as condições de contorno de Neumann na superfície externa da amostra, no caso do infravermelho. Essa condição de contorno implica em taxa de condução de calor fixa na interface. Já para o interior das amostras, a condição de contorno de Neumann e Dirichilet foi considerada no caso de reaquecimento por meio da radiação micro-ondas. Essa condição de contorno considera que a taxa de calor conduzido na interface é proporcional a diferença de temperatura nesta interface. Nas simulações as descontinuidades que existem na interface entre as Fases A e B foram desconsideradas.

A Equação 7 foi resolvida usando o método dos elementos finitos, por meio da inserção das variáveis e parâmetros necessários no *Software* Ansys®, conforme Figura 11. Por meio dessa Figura, é possível visualizar o mecanismo de funcionamento do *software,* e o passo a passo para a simulação.

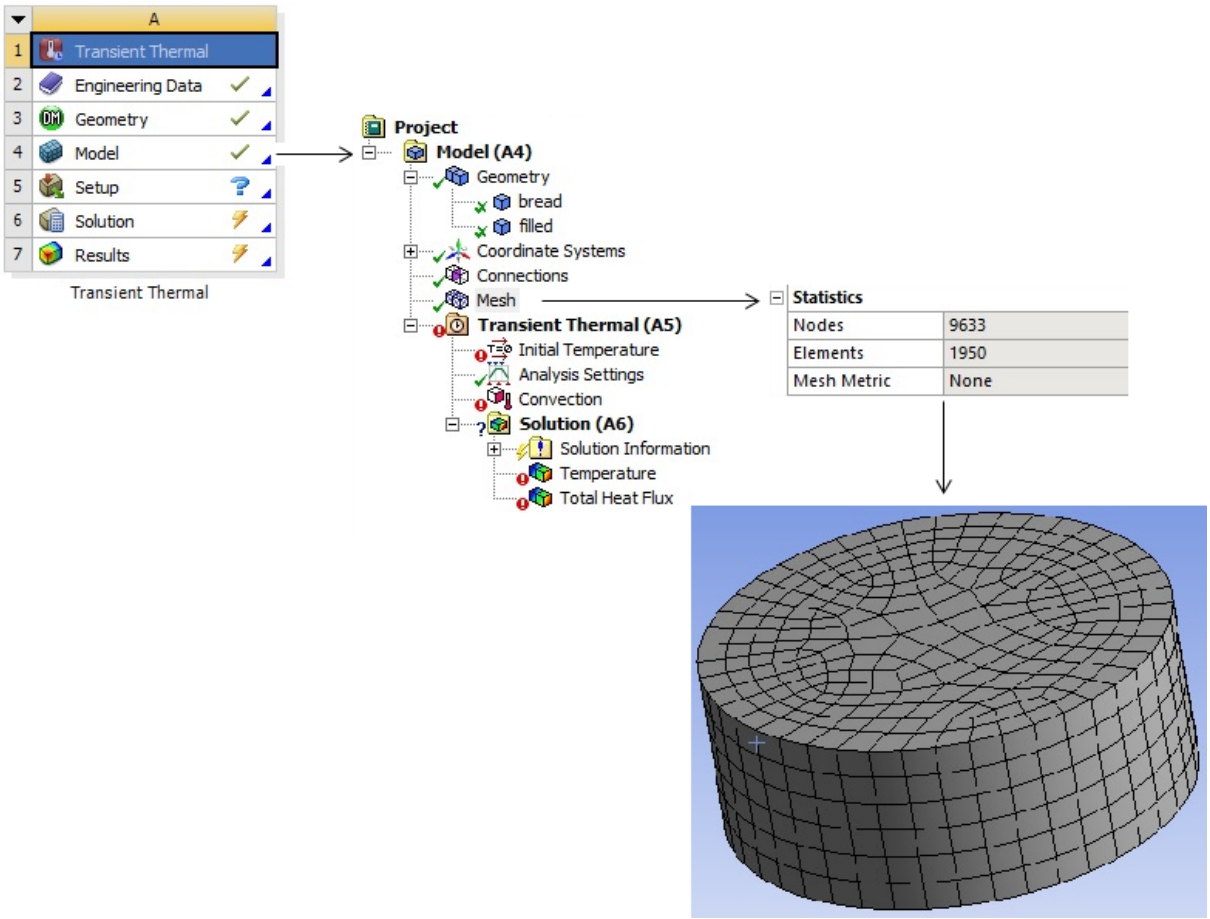
Figura 11 - Passo a passo da simulação



Fonte: Própria autoria

Na etapa de modelagem, na qual relaciona-se os parâmetros físicos com a geometria definida, também são definidas os nós e as malhas. Essas malhas foram definidas automaticamente pelo *software.* Desta forma, pelo método dos elementos finitos, é possível mapear a temperatura de toda a geometria das duas fases das amostras. O detalhamento desta etapa é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Etapa de modelagem na simulação



Fonte: Própria autoria

4.4.2.3 Testes do forno e reaquecimento das amostras

Foram testadas diversas combinações de micro-ondas e infravermelho. Os primeiros testes envolviam pares de combinações alternados, ou seja, ora micro-ondas ora infravermelho, observando-se os resultados da simulação computacional. Sabe-se que a potência de aquecimento do micro-ondas é superior a do infravermelho, portanto a distribuição de tempo entre as radiações foi feita baseando-se no tempo ideal de aquecimento do micro-ondas para modelos similares aos utilizados neste trabalho: 20 segundos. A descrição da combinação de cada teste pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição dos testes de combinação para reaquecimento das amostras

Teste	Descrição
1	20s IV + 12s MO + 20s IV + 8s MO
2	20s IV + 12s MO + 20s IV + 8s MO + circulação forçada de ar
3	12s MO + 20s IV + 8s MO + 20s IV
4	12s MO + 20s IV + 8s MO + 20s IV + circulação forçada de ar
5	15s MO + 45s IV
6	15s MO + 45s IV + circulação forçada de ar

Observações: IV: infravermelho; MO: micro-ondas

Fonte: Própria autoria

Em todos os testes descritos na Tabela 3, também foram tomadas as medidas de temperatura e umidade no interior do equipamento.

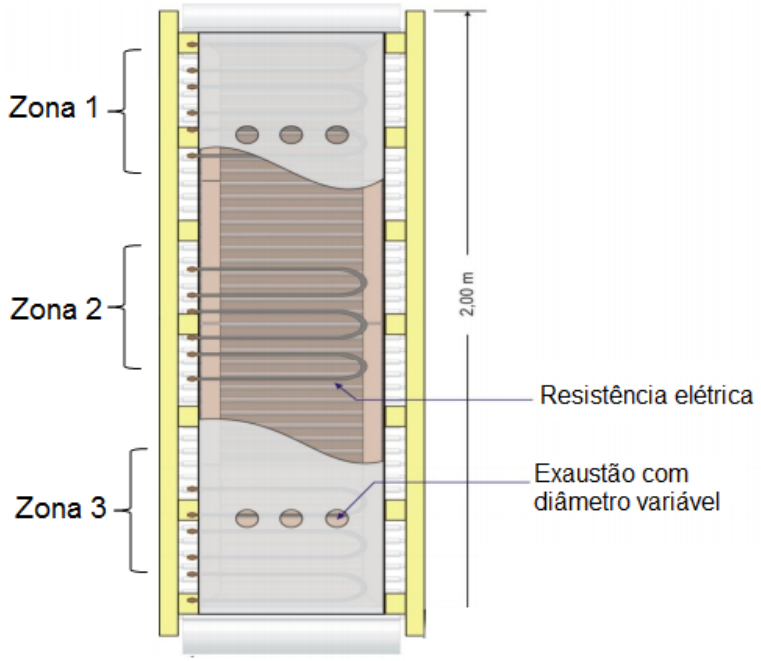
4.4.3 Simulação computacional para reaquecimento das amostras em forno tipo túnel

Após a compreensão da forma de ação de cada uma das tecnologias envolvidas no aquecimento do modelo bifásico utilizado, bem como suas dinâmicas de ação, novos experimentos foram dimensionados, agora no forno tipo túnel em escala piloto, a fim de simular processos mais próximos da realidade das indústrias brasileiras.

4.4.3.1 Potência efetiva

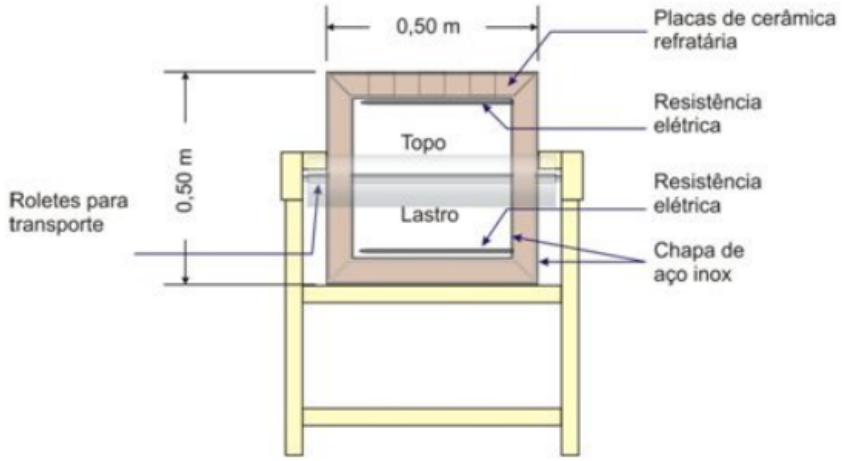
O forno tipo túnel em escala piloto, foi desenvolvido no Laboratório de Física Aplicada e Computacional da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP). Com 2 metros de comprimento e dividido em 3 zonas de aquecimento, conforme ilustrado na Figura 13, possui 3 resistências instaladas no topo e 3 no lastro. Sendo assim, cada zona possui 2 resistências, sendo uma no topo e uma no lastro conforme vista frontal da Figura 14.

Figura 13 - Vista superior do forno, distribuição das zonas de aquecimento e resistências instaladas



Fonte: PEREIRA, L.A.M. **Desenvolvimento de uma linha experimental em escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo "ZIGBEE".** 2012.118f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

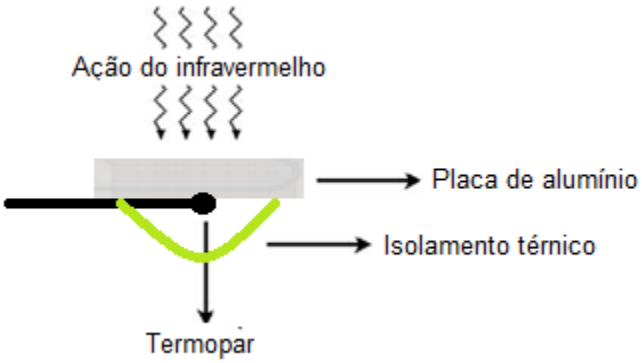
Figura 14 - Vista frontal do forno



Fonte: PEREIRA, L.A.M. **Desenvolvimento de uma linha experimental em escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo "ZIGBEE".** 2012.118f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

Para medir a potência efetiva da resistência é necessário verificar a condução de calor ao longo de um determinado material, com calor específico conhecido. Sendo assim, para calcular a potência efetiva de cada infravermelho instalado, uma barra de alumínio de 9,10 g foi aquecida por 15 minutos. Cada infravermelho, isoladamente, aqueceu a mesma barra. O sensor (blindado) foi posicionado exatamente do lado oposto no qual a radiação era incidida (Figura 15).

Figura 15 - Disposição do experimento para avaliar a potência efetiva das resistências instaladas



Fonte: Própria autoria

Esses experimentos foram repetidos em triplicata, para cada uma das resistências de topo e lastro, da entrada e saída do forno. Como a medida da resistência da zona 2 (centro do forno) era a mais complicada devido a diculdade de posicionamento dos sensores, uma média foi calculada para as resistências superiores e outra para as resistências inferiores. Esses cálculos seguiram o mesmo princípio da Equação 4. Os valores de temperatura *versus* tempo foram colocados em um gráfico, e o valor da potência efetiva foi calculado a partir da simplificação da Equação 6.

4.4.3.2 Testes com alimento: Avaliação de temperatura

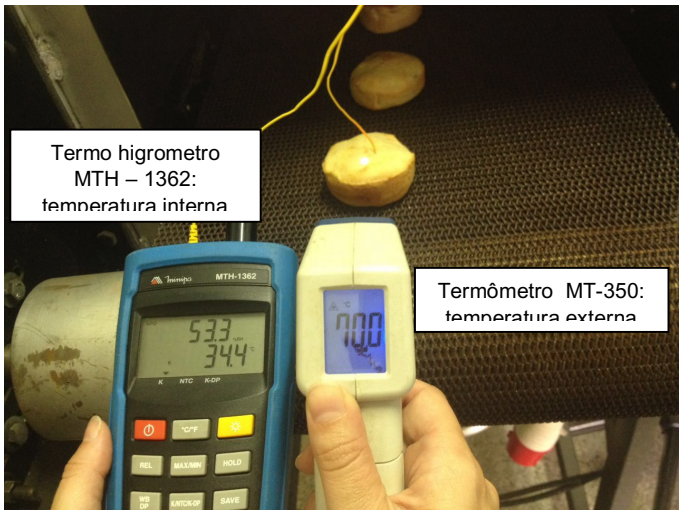
Os experimentos nessa etapa do trabalho, que envolvem o reaquecimento por micro-ondas e infravermelho do forno tipo túnel, foram realizados em batelada, e não contínuo, conforme proposta inicial, no qual o micro-ondas seria acoplado a entrada do forno tipo túnel, e o reaquecimento seria realizado ao longo do forno de forma contínua.

Para avaliar a eficiência da combinação das radiações micro-ondas e infravermelha, 30 amostras foram preparadas e armazenadas conforme descrito no item 4.3.

Para avaliação da temperatura interna (centro) e externa (superfície) os experimentos foram dividos em 2 etapas: 15 amostras foram reaquecidas durante um determinado tempo t_1 no forno tipo túnel experimental, a uma temperatura média de 280°C, e 15 amostras foram reaquecidas utilizando a combinação das radiações, micro-ondas e infravermelha, nos intervalos de tempo t_2 e t_3, respectivamente. As determinações de t_1, t_2 e t_3 foram previamente definidas pelos experimentos descritos no item 4.4.2.3. As amostras eram reaquecidas de forma individual, e a posição para reaquecimento no micro-ondas foi baseada nos experimentos de Rosini, Nascentes e Nobrega (2004).

As temperaturas internas foram tomadas utilizando um sensor termo higrometro da marca Minipa® MTH – 1362. A temperatura externa foi medida utilizando o termômetro infravermelho da marca Minipa® MT – 350. Ambos equipamentos podem ser visualizados na Figura 16.

Figura 16 - Sensor termo higrometro e sensor infravermelho medindo temperatura interna e externa, respectivamente



Fonte: Própria autoria

No experimento em que as amostras foram reaquecidas apenas pela radiação infravermelha no forno tipo túnel, as temperaturas foram tomadas tanto no centro quanto na superfície, logo após serem retiradas do refrigerador e após o término do reaquecimento (t_1).

Nos experimentos envolvendo a combinação das radiações, as temperaturas foram medidas tanto no centro quanto na superfície, após serem retiradas do refrigerador, após ação do micro-ondas (t_2) e após ação do infravermelho (t_3), completando o processo combinado de reaquecimento.

4.4.3.3 Teste com alimento: Avaliação da migração de umidade no interior do alimento

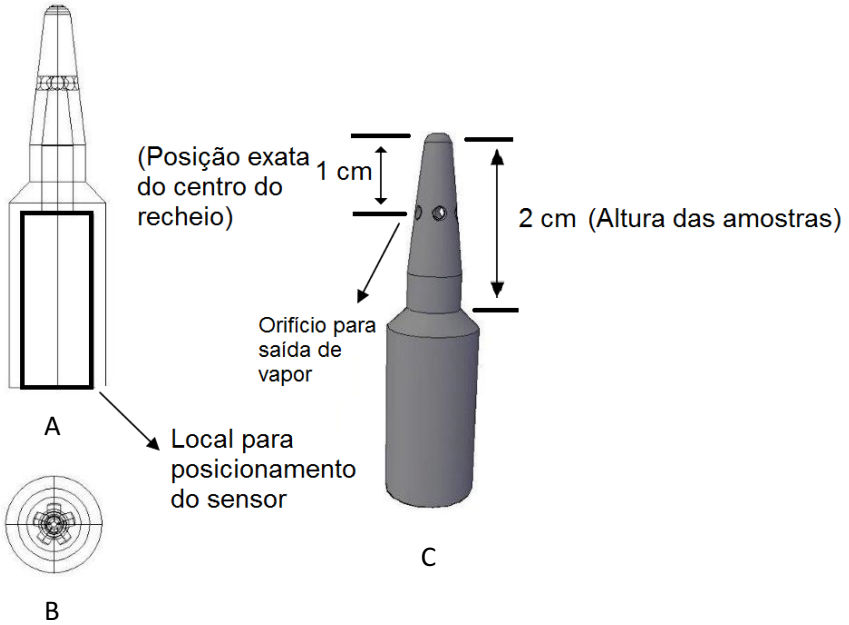
Devido à dificuldade de se medir a migração de umidade no interior de uma amostra de alimento, submetida a duas radiações diferentes, foi desenvolvida uma metodologia específica, a fim de se obter um perfil de migração interno de umidade mais realístico possível. Desta forma, 30 amostras foram preparadas e armazenadas também conforme descrito no item 4.3. Haja visto que todas as amostras foram elaboradas com a mesma massa e mesmo recheio, ambos padronizados, ou seja, mesmo teor de umidade, o experimento foi realizado como uma “tomografia” das amostras, no qual cada corte representou um tempo e uma posição. A junção de todos os cortes, forneceu o perfil de migração de água ao longo do eixo radial do alimento bifásico.

Para a realização dessas medidas foi utilizado o sensor de umidade LinPicco™ AXXX Basic, uma placa Arduíno® Duemilanove ligada ao computador para coleta dos dados e uma probe experimental, desenvolvida especificamente para a realização deste experimento, feita em AutoCad® e impressa na impressora 3D GTMAX®.

Para as medidas de umidade na superfície e lateral das amostras o sensor foi apenas posicionado à 1 mm de distância da amostra.

Para as medidas de umidade no interior das amostras, ou seja, no recheio dos salgados, uma probe experimental foi utilizada. A peça foi dimensionada (Figura 17), de modo que os pequenos orifícios para saída do vapor fossem posicionados exatamente no centro do recheio.

Figura 17 – A: Vista frontal da peça; B: Vista superior da peça; C: Peça pronta com dimensões

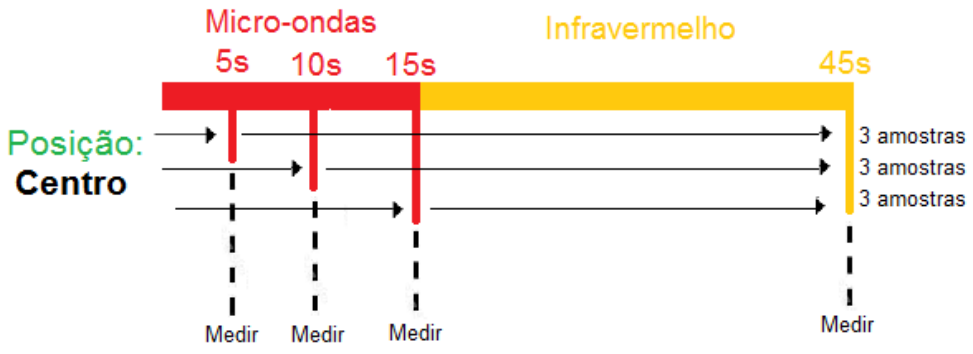


Fonte: Própria autoria

Para a elaboração do perfil de migração de água ao longo da amostra foi seguido o seguinte protocolo experimental: 3 amostras foram selecionadas de forma aleatória e as medidas de umidade no centro, superfície e lateral foram tomadas. Como trata-se de amostras uniformes e padronizadas (mesma massa e mesmo recheio) os valores aqui encontrados foram definidos como iniciais (tempo=0 segundos).

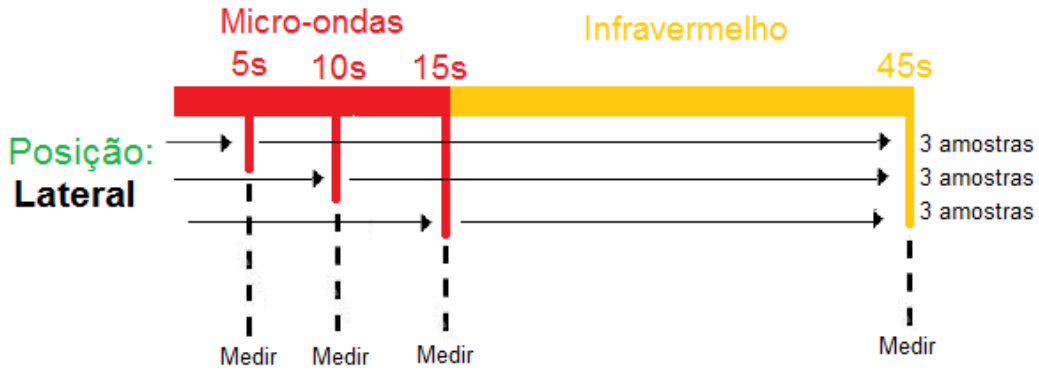
Em seguida, para cada posição, tanto centro, lateral quanto superfície, as medidas de umidade eram realizadas em triplicata nos tempos de 5, 10 e 15 segundos (3 medidas realizadas durante o aquecimento por micro-ondas) e após os 30 segundos (completa ação do infravermelho), totalizando 45 segundos totais de reaquecimento, conforme processo detalhado nos diagramas das Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Experimento de umidade no centro das amostras



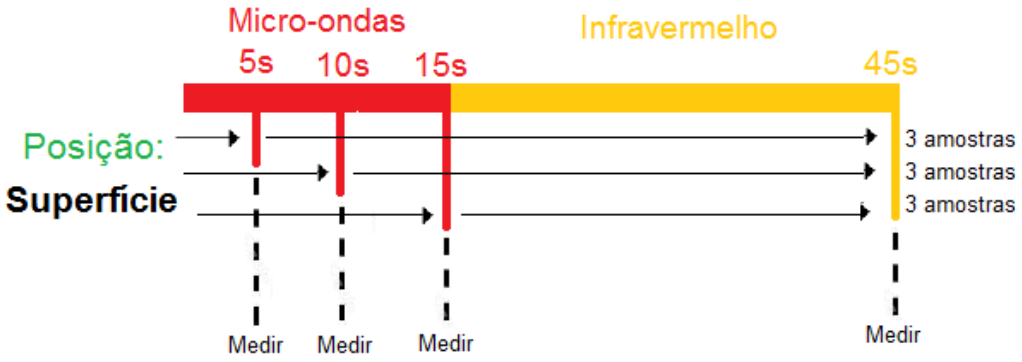
Fonte: Própria autoria

Figura 19 - Experimento de umidade na lateral das amostras



Fonte: Própria autoria

Figura 20 - Experimento de umidade na superfície das amostras



Fonte: Própria autoria

Pode-se notar que as medidas de umidade, em todas as regiões de interesse da amostra, não foram realizadas em locais no qual era possível controlar a umidade relativa do ambiente. Desta forma, a umidade do ambiente foi monitorada durante o

reaquecimento de todas as amostras, a fim de verificar se havia variação significativa de umidade relativa ou não. Além disso, o sensor LinPicco^{TM} AXXX Basic foi calibrado para fornecer uma medida por segundo. Experimentos prévios permitiram notar que, as primeiras 3 a 5 medidas coletadas pelos sensores, se tratava da umidade relativa ao vapor de água eliminado pelas amostras, após esse intervalo de tempo, notava-se a saturação dessa umidade com a umidade relativa do ambiente. Desta forma, tomou-se como medida de umidade a média das três primeiras medidas coletadas pelo sensor, de forma a reduzir tanto a influência da umidade relativa externa quanto a saturação com o ambiente.

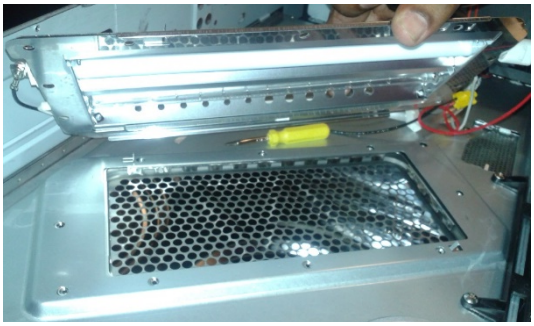
5 Resultados e Discussão

5.1 Adaptações do forno micro-ondas convencional

5.1.1 Adaptação do infravermelho

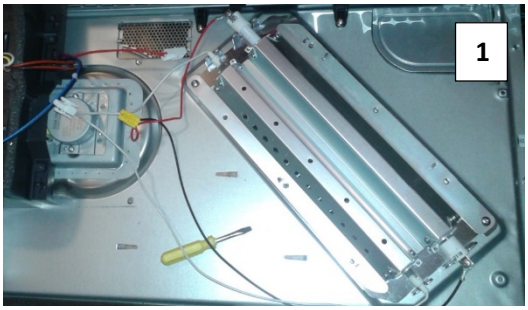
As adaptações com as lâmpadas de halogênio no aparato experimental podem ser visualizadas nas Figuras 21, 22, 23 e 24.

Figura 21 - KIT de infravermelho adaptado ao forno



Fonte: Própria autoria

Figura 22 - Vista externa e superior de adaptação do kit infravermelho no qual [1] representa o controle eletromecânico de abertura do forno, responsável pelo controle de umidade no interior do forno

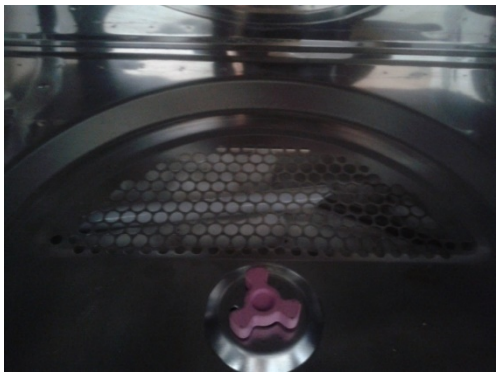


Fonte: Própria autoria

Figura 23 - Vista interna - Lâmpada de halogênio e resistência elétrica na região superior da cavidade do forno

Fonte: Própria autoria

Figura 24 - Resistência elétrica adaptada abaixo do prato giratório

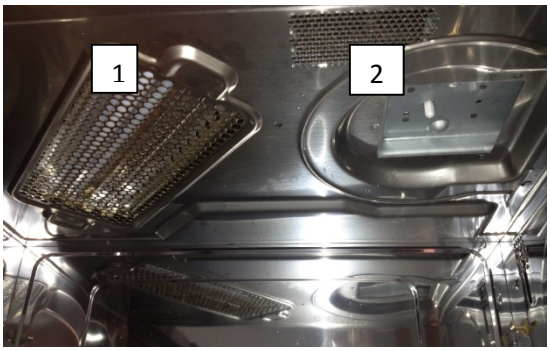


Fonte: Própria autoria

5.1.2 Adaptação do micro-ondas

A adaptação da radiação micro-ondas pode ser visualizada na Figura 25.

Figura 25 - Vista interna da parte superior da cavidade do forno na qual [1] representa a saída da radiação infravermelha e [2] saída da radiação micro-ondas (sem a mica)



Fonte: Própria autoria

Nota-se que, pelas imagens dos itens 5.1.1 e 5.1.2, que a disposição da lâmpada de halogênio e do guia de ondas permitiu que a incidência das radiações seguissem o mesmo padrão, ou seja, as radiações micro-ondas e infravermelha incidem na mesma direção vertical e perpendicular as amostras do alimento, comportamento também descrito por Datta e Ni (2000); Keskin, Sumnu e Sahin (2003); Sumnu, Sahin e Sevimli (2004); Seyhun et al. (2008); Uysal, Sumnu e Sahin (2008); Demikersen et al. (2011) e Liu, Fukuoka e Sakai (2012).

5.2 Monitoração da temperatura e umidade

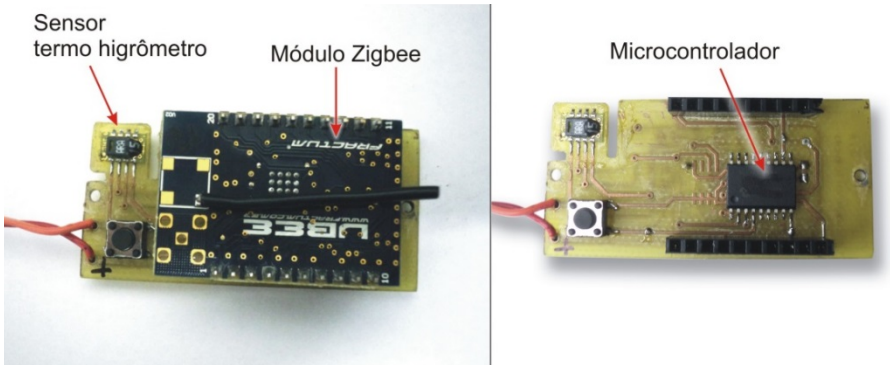
Foi associado um erro de medida aos dados experimentais obtidos. Esse erro levou em consideração tanto o desvio das repetições quanto o erro limite máximo

fornecido pelos fabricantes dos equipamentos, optando-se pelo maior erro nas representações de gráficos e tabelas.

5.2.1 Desenvolvimento dos sensores para monitoração do ar da cavidade do forno modelo

O protótipo desenvolvido para monitorar temperatura e umidade da cavidade é mostrado na Figura 26.

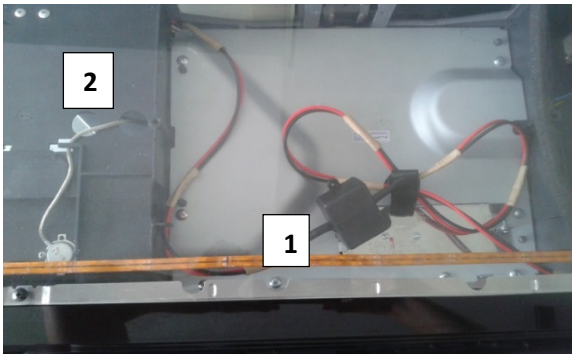
Figura 26 - Protótipo do dispositivo termo higrômetro



Fonte: Própria autoria

Esses sensores, instalados na região superior da cavidade do forno, podem ser visualizados na Figura 27.

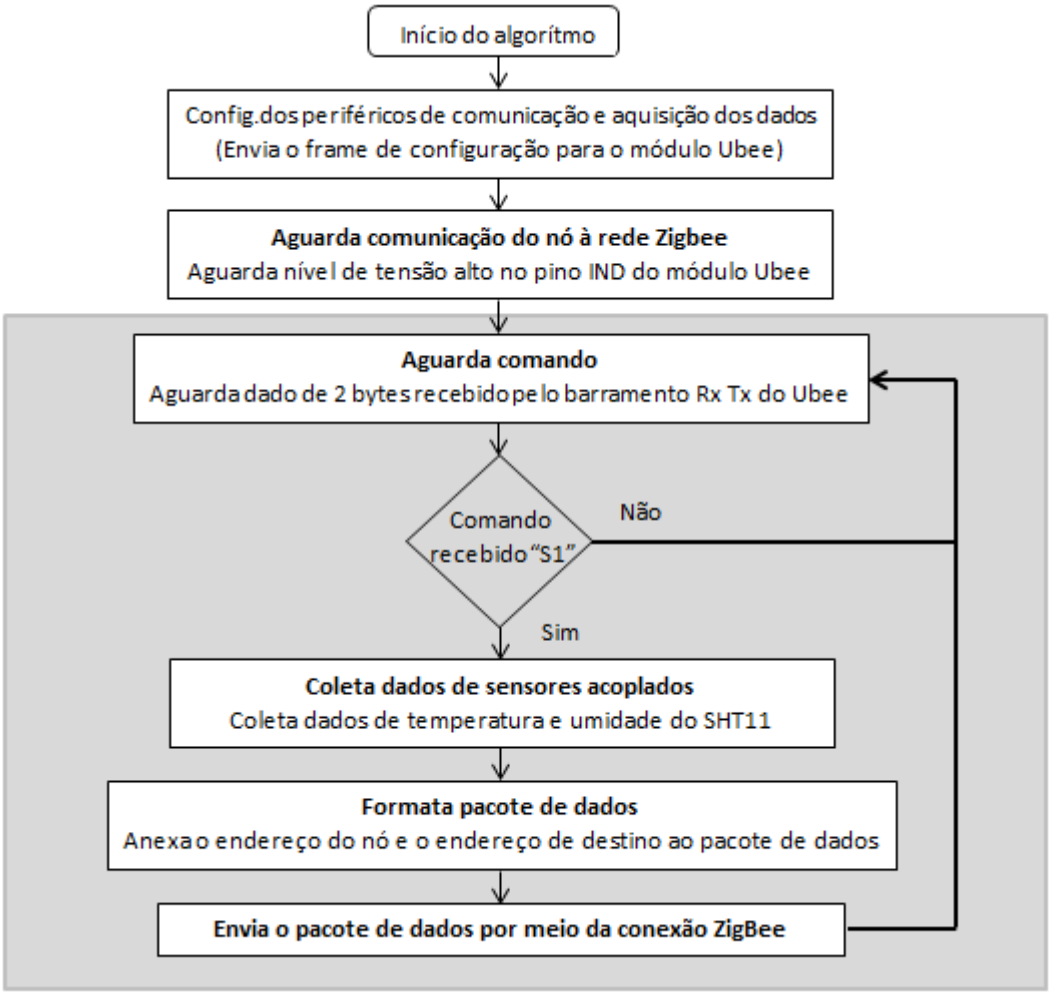
Figura 27 - [1] Condicionador dos sensores de temperatura e umidade instalado externamente ao forno na região superior. [2] Câmara de controle de umidade e cavidade de instalação dos sensores



Fonte: Própria autoria

O fluxograma do *firmware* desenvolvido para o micro controlador é mostrado na Figura 28. Os *firmwares* são conhecidos como um conjunto de instruções operacionais programados diretamente nos *hardwares*.

Figura 28 - Fluxograma do *firmware* desenvolvido

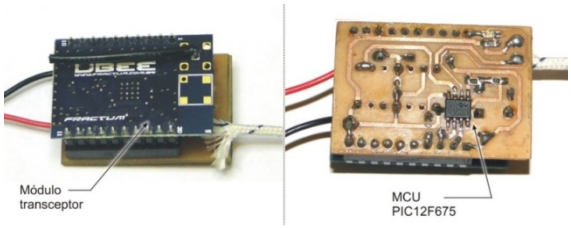


Fonte: Própria autoria

5.2.2 Desenvolvimento do sensor para monitoração da temperatura do alimento no forno modelo

O protótipo desenvolvido para monitorar a temperatura no interior do alimento, dentro da cavidade do forno modelo, é mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Imagens do protótipo do dispositivo sensor de temperatura



Fonte: Própria autoria

Devido a impossibilidade de operação da radiação micro-ondas na presença de metal, o dispositivo sensor foi posicionado do lado de fora da cavidade, enquanto o termopar blindado operava no interior do protótipo. O termopar adaptado no equipamento para a realização do experimento, e o mesmo sendo utilizado para a realização das medidas podem ser visualizados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Termopar adaptado ao centro do micro-ondas

Fonte: Própria autoria

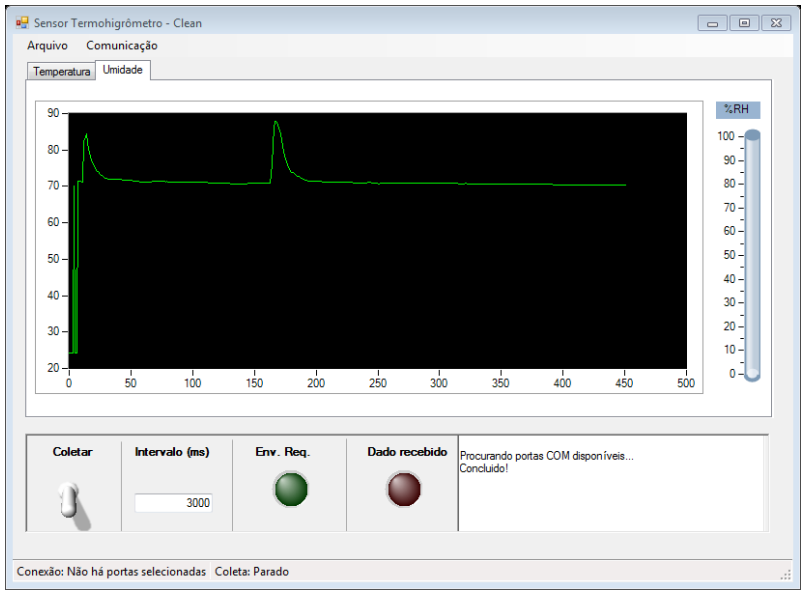
Figura 31 - Termopar posicionado no centro do salgado durante aquecimento

Fonte: Própria autoria

5.2.3 *Software* de aquisição de dados

O recorte de tela do *software* para aquisição dos dados de temperatura e umidade desenvolvido é mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Tela principal do *software* de coleta



Fonte: Própria autoria

5.3 Preparo das amostras

Os valores de composição centesimal da massa do modelo utilizado são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição centesimal da massa crua e assada: Resultados de análises expresso em massa seca 100 °C

Amostra	MS	MM	PB	FB	EE	ENN	pH
Massa crua	64,82	1,09	11,22	**	**	**	5,42
	64,57	1,10	11,41	**	**	**	5,48
Massa assada	97,20	1,46	11,15	3,47	23,20	60,72	**
	97,22	1,57	10,72	3,38	23,21	61,12	**

Observações: MS (matéria seca); PB (proteína bruta); FB (fibra bruta); EE (extrato etéreo); MM (matéria mineral); ENN (extrativo não nitrogenado).
Fonte: PEREIRA, L.A.M., PIZA, L.V., VICENTE, M., ARCE, A.I.C., SILVA, A.C.S., TECH, A.R.B., COSTA, E.J.X. Construção de um forno elétrico em escala piloto experimental usando instrumentação de sensores sem fio para a avaliação de alimentos assados. **Food and Bioproducts Processing**, Pirassununga, v.100, parte A, p.214-220, 13 jul 2016.

Esses dados foram utilizados para o cálculo da condutividade térmica.

Os salgados assados, utilizados nos experimentos, adquiriram em média um volume de 80,4 ± 4 cm^3 e espessura da massa de 1 ± 0,05 mm. O recheio, também padronizado, adquiriu um volume médio de 9 ± 0,45 cm^3. O salgado pronto, após

assamento em forno convencional, dentro dos valores padrões de coloração, pode ser visualizado nas Figuras 33 e 34.

Figura 33- Vista superior do salgado

Fonte: Própria autoria

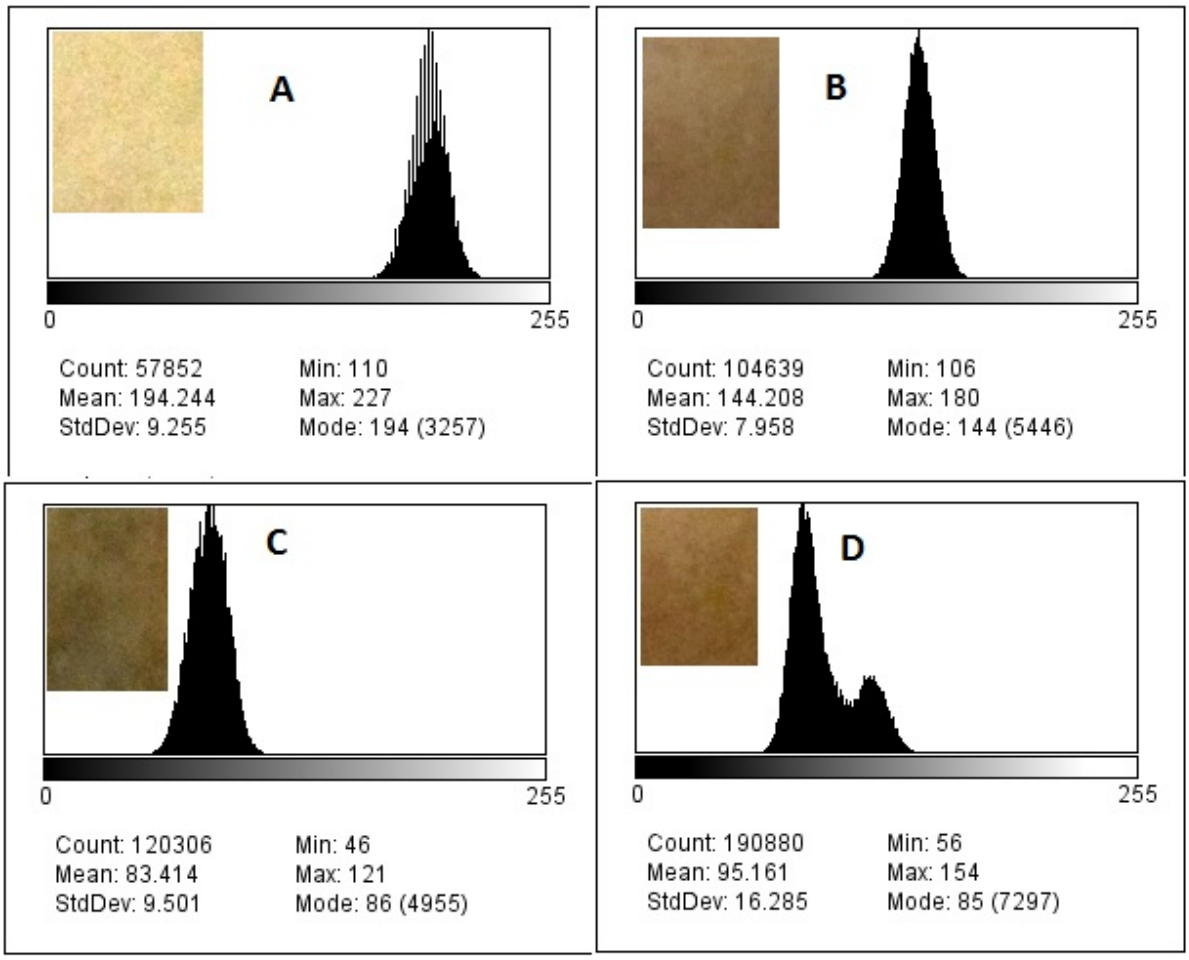
Figura 34 - Corte transversal dos salgado

Fonte: Própria autoria

O formato cilíndrico dimensionado segundo metodologia de Pereira et al. (2016) também foi escolhido baseado nas observações de Liu, Fukuoka e Sakai (2012) ao fato de que a distribuição radial das radiações é uniforme em todos os pontos de uma amostra de formato cilíndrico, o que não é observado, por exemplo, em amostras retangulares.

Os dados de coloração dos salgados, obtidos pelo *software* ImageJ®, podem ser visualizados na Figura 35.

Figura 35: Exemplos de amostras abaixo da coloração ideal, na coloração ideal e acima da coloração ideal



Fonte: PEREIRA, L.A.M., PIZA, L.V., VICENTE, M., ARCE, A.I.C., SILVA, A.C.S., TECH, A.R.B., COSTA, E.J.X. Construção de um forno elétrico em escala piloto experimental usando instrumentação de sensores sem fio para a avaliação de alimentos assados. **Food and Bioproducts Processing**, Pirassununga, v.100, parte A, p.214-220, 13 jul. 2016.

A Figura 35-B indica o exemplo do histograma de coloração da superfície de uma amostra determinada como padrão, ou seja, aquela que atingiu o término do tempo padronizado para assamento em forno convencional (40 minutos), e adquiriu coloração de superfície similar a maioria das amostras. Nota-se que a amostra representada pela Figura 35-D possui um histograma dentro do intervalo considerado padrão, já as amostras da Figura 35-A e Figura 35-C representam salgados com o histograma deslocado a esquerda e a direita do padrão, respectivamente, ou seja, amostras que tiveram as superfícies menos aquecidas

que o ideal (cruas) e amostras que tiveram as superfícies aquecidas acima do ideal (queimadas).

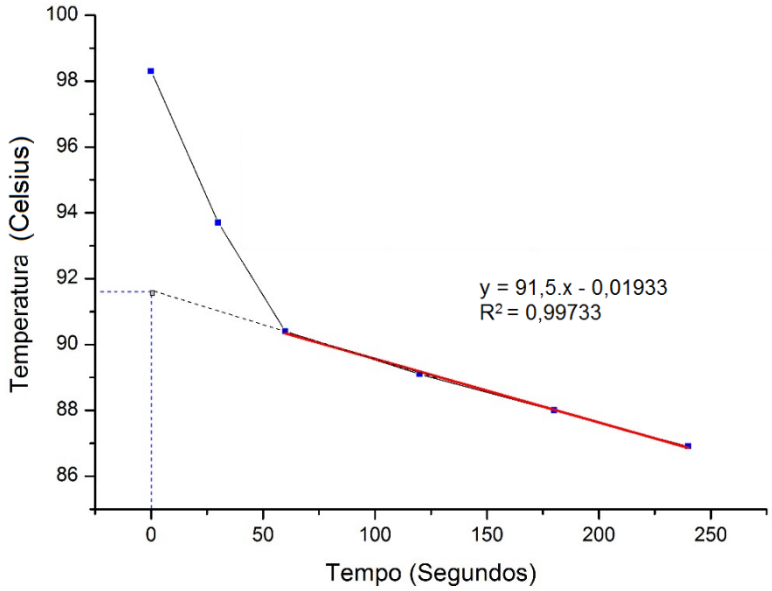
Esses resultados permitem afirmar que o ImageJ® pode ser usado pra dar informações sobre o ponto ideal de assamento do alimento, conforme estudos de Pereira et al. (2016) (Anexo 1), que são parte dos resultados abordados nesta tese. O fato do ImageJ® ser usado como ferramenta complementar para avaliar diversas características da imagem de alimentos, corroboram com dados da literatura, que o utilizaram para determinação quantitativa dos pigmentos fotossintéticos em imagens de feijões verdes (Valverde, This e Vignolle (2007)), determinação das dimensões ortogonais de diversas imagens de grãos como feijão, soja, ervilha e arroz (Igathinathane, Pordesimo e Batchelor (2008)) e determinação de zinco em imagens de grãos de arroz (Duarte et al. (2015)).

5.4 Cálculo dos parâmetros para a simulação computacional

5.4.1 Propriedades físico químicas do salgado

O resultado do experimento para cálculo do equivalente em água e perda energética foi colocado em forma de gráfico ilustrado na Figura 36, no qual o eixo das abscissas representa o tempo em segundos e o eixo das ordenadas representa as temperaturas em graus Celsius.

Figura 36 - Calorímetro com água aquecida para determinar o equivalente em água e a perda energética



Fonte: Própria autoria

A partir desse gráfico, e resolvendo as Equações 1 e 2, no qual:

$m_{água1}$ = 10 g;

$m_{água2}$ = 320 g

T_1 = temperatura inicial da água + calorímetro = 26 ^oC;

T_2 = temperatura da água a ser colocada no calorímetro ($m_{água2}$) = 98,5 ^oC;

T_3 = temperatura de equilíbrio = 87 ^oC;

foi obtido o valor de equivalente em água. Já a perda energética, por ser proporcional a inclinação da reta, foi obtida diretamente do gráfico. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de equivalente em água e perda energética do calorímetro (Erro estimado ±10%)

Medidas	Valores
Equivalente em água	50 gramas
Perda energética	0,01933 W

Fonte: Própria autoria

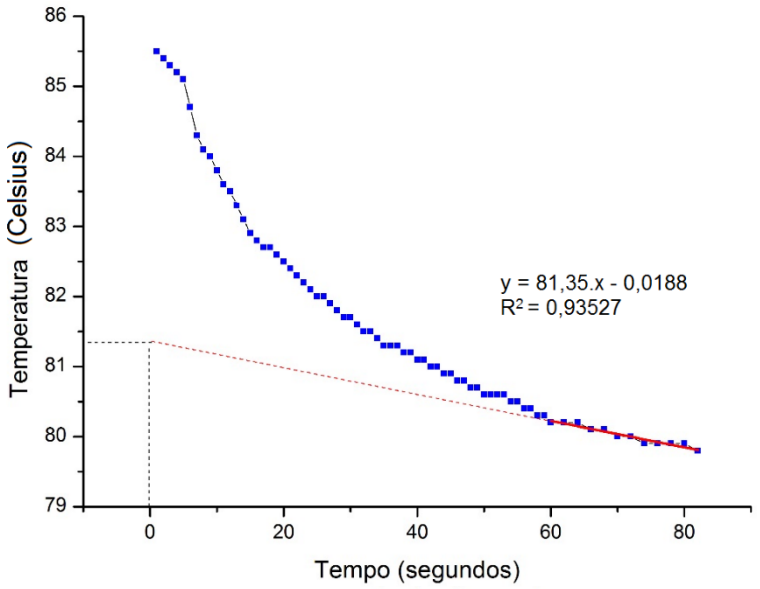
Segundo Wang et al. (2013) diversos são os métodos utilizados para mensurar as propriedades térmicas de determinadas amostras e/ou alimentos. As mais comumente utilizadas são: calorímetro adiabático convencional, método de comparação, aquecimento por pulso elétrico ou calorimetria de varredura diferencial (DSC). Embora o calorímetro convencional tenha sido reportado como método normalmente utilizado, não foram encontrados na literatura dados recentes da aplicação desta técnica em alimentos. Já o método DSC foi amplamente empregado para este fim, como reportado por Delgado, Rubiolo e Gribaudo (1990) em amostras de morango, Wang e Kolbe (1991) em Kani-Kama, Tocci, Flores e Mascheroni (1997) em carne de cordeiro desossada, Ngadi, Chinnan e Mallikarjuan (2003) em camarão frito, Cogné et al. (2003) em sorvetes, Handami, Monteau e Le Bali (2004) em produtos de panificação e Fasina (2005) em amostras de batata doce.

O uso dessa ferramenta por diversos pesquisadores está relacionado com suas características associadas a rapidez de avaliação, precisão e sensibilidade, além de ser capaz de operar em uma ampla faixa de temperatura. No entanto, os calorímetros convencionais também são considerados precisos e eficazes quanto menor for a perda energética e mais preciso for o cálculo do equivalente em água.

Nota-se na Tabela 5, que a perda de potência de 0,01933 W encontrada para esse calorímetro foi baixa, e embora desprezível, foi considerada na simulação computacional. O uso dos dados da Tabela 5 foram fundamentais para alimentar a simulação e tornar o processo mais preciso e próximo da realidade. Sendo assim, pode-se inferir que o calorímetro utilizado permitiu calcular as propriedades térmicas, tanto da massa quanto do recheio, com precisão.

O resultado do experimento para o cálculo do calor específico da massa foi colocado em forma de gráfico ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – (Água aquecida + massa) no calorímetro



Fonte: Própria autoria

Pelo princípio da Equação 1, com o valor do equivalente em água e de acordo com o equilíbrio térmico visualizado na Figura 37, o valor do calor específico da massa foi calculado da seguinte forma:

$$(m_{massa}.c_{p(massa)} + w.c_p).(T_{equilíbrio} - T_{inicial}) = m_{água\ aquecida}.c_p.(T_{inicial} - T_{equilíbrio}) \quad (8)$$

$$(100.c_{p(massa)} + 50.1).(79{,}75 - 26) = 590.1.(85{,}5 - 79{,}75) \quad (9)$$

$$5375.c_{p(massa)} + 2687{,}5 = 3392{,}5 \quad (10)$$

$$c_{p(massa)} = 0{,}13\ cal/g.°C$$

Pelos cálculos acima, encontrou-se o valor de 0,13 cal/g.°C para a variável calor específico da massa. O mesmo procedimento foi repetido para o recheio, cujo valor encontrado foi de 0,52 cal/g.°C.

A condutividade térmica da massa foi obtida por meio da equação de predição de Choi e Okos (1983), que pode ser visualizada pela Equação 11:

$$K_{massa} = 0{,}2051.Mc + 0{,}2.Mp + 0{,}175.Mf + 0{,}135.Ma + 0{,}61.Mw \quad (11)$$

Em que:

Mf = Fração mássica de lipídeos;

Ms = Fraçao mássica não lipídica;

Mw = Fração mássica de água;

Mc = Fração mássica de carboidrato;

Mp = Fração mássica de proteína;

Ma = Fração mássica de cinzas;

Os valores de composição centesimal, determinada experimentalmente, e disponíveis na Tabela 4, foram subtituidos na Equação 11, conforme cálculos a seguir:

$$K_{massa} = 0{,}2051.0{,}0347 + 0{,}2.0{,}1115 + 0{,}175.0{,}2320 + 0{,}135.0{,}0146 + 0{,}61.0{,}028 \quad (12)$$

$$K_{massa} = 0{,}089\ W/m°\mathrm{C}$$

Já a condutividade térmica do recheio, ou seja, da mistura de carne moída, cebola e tomate foi obtida por meio da Equação de Choi e Okos (1986) (Equação 13):

$$K_{recheio} = \sum(k_i.X_i^v) \quad (13)$$

Em que:

K_i = Condutividade térmica do ingrediente;

X_i^v = Fração volumétrica do ingrediente;

após determinação da condutividade de cada um dos ingredientes por meio dos valores de composição centesimal de cada um deles, disponíveis na tabela Taco, e da Equação 11, ou seja:

$$K_{tomate} = 0{,}2051.0{,}031 + 0{,}2.0{,}011 + 0{,}175.0{,}002 + 0{,}135.0{,}005 + 0{,}61.0{,}95 \quad (14)$$

$$K_{tomate} = 0{,}589\ W/m°\mathrm{C}$$

$$K_{carne\ moída} = 0{,}2051.0{,}0 + 0{,}2.0{,}359 + 0{,}175.0{,}073 + 0{,}135.0{,}013 + 0{,}61.0{,}552 \quad (15)$$

$$K_{carne\ moída} = 0{,}423\ W/m°\mathrm{C}$$

$$K_{cebola} = 0{,}2051.0{,}089 + 0{,}2.0{,}017 + 0{,}175.0{,}001 + 0{,}135.0{,}004 + 0{,}61.0{,}889 \quad (16)$$

$$K_{cebola} = 0{,}565\ W/m°C$$

A fração volumétrica de cada um desses ingredientes foi obtida dividindo o volume de cada ingrediente pela somatória do volume de todos os ingredientes, a partir dos dados disponíveis na Tabela 2 e densidade estimada experimentalmente de cada um deles, de forma que, retomando a Equação 13:

$$K_{recheio} = (K.X^{v})_{tomate} + (K.X^{v})_{carne\ moída} + (K.X^{v})_{cebola} \quad (17)$$

$$K_{recheio} = 0{,}589.0{,}148 + 0{,}423.0{,}78 + 0{,}565.0{,}068 \quad (18)$$

$$K_{recheio} = 0{,}455\ W/m°C$$

Desta forma, é possível visualizar na Tabela 6, os valores de condutividade térmica e calor específico obtidos tanto para massa quanto para o recheio da amostra de salgado.

Tabela 6 - Propriedades térmicas do salgado (Erro estimado ±10%)

Fases	Condutividade térmica (k)	Calor específico (c_p)
Massa	0,089 W/m.°C	0,13 cal/g.°C
Recheio	0,455 W/m.°C	0,52 cal/g.°C

Fonte: Própria autoria

Segundo Marcotte, Taherian e Karimini (2008) diversos modelos matemáticos podem ser usados para compreender e estudar a relação entre as propriedades físicas dos alimentos e a temperatura. Para prever a condutividade térmica, por exemplo, modelos como de Gonzo (2002), Wang et al. (2006a), Carson (2006), Choi e Okos (1983) e Choi e Okos (1986) são sugeridos na literatura e usados para materiais compostos ou homogêneos.

Todos esses modelos foram desenvolvidos levando em consideração as variações, que ocorrem principalmente nas mudanças de fase dos alimentos, em processos como assamento e congelamento, e fatores como perda de umidade e gordura. Diante da diversidade de modelos, Carson et al. (2006) afirmaram não haver uniformidade e consenso entre os valores de K preditos. Não havendo um modelo universal para predição dessa variável, cada caso deve ser avaliado separadamente, a fim de encontrar o modelo que melhor se ajuste aos dados em questão.

Para os cálculos da condutividade térmica da massa a Equação de Choi e Okos (1983) foi utilizada, enquanto para o recheio a Equação de Choi e Okos (1986) foi utilizada, por abrangirem um intervalo amplo de temperatura, variando de -40 a

150 ^{o}C, intervalo que incluem as temperaturas empregadas no reaquecimento das amostras, e ser previamente empregada de forma eficiente por Soares et al. (2012) em amostras de mangaba, Egea, Reis e Danesi (2015) em palmito pupunha, Sousa Jr. et al. (2012) em leite e Frick e Becker (2001) em diversos alimentos.

Todas as referências encontradas na literatura, realizaram experimentos a fim de avaliar o comportamento dos valores de K de amostras de carne moída desde o descongelamento até o cozimento das amostras, já que essa propriedade varia com a temperatura. Pan e Singh (2001) avaliaram as amostras entre 5 e 70°C e apresentaram valores de K entre 0,35 a 0,41 W/m.^{o}C. Já Marcotte, Taherian e Karimini (2008) encontraram valores de K entre 0,26 e 0,48 W/m.^{o}C operando de 20 a 80 ^{o}C. Nota-se que, embora superior a condutividade térmica encontrada na literatura, o valor de K para o recheio (carne moída) de 0,455 apresentado na Tabela 6, corrobora com os dados encontrados na literatura, permanecendo na mesma ordem de grandeza. Pequenas variações podem ser notadas devido a diferença dos cortes e espécies de carnes utilizadas. Tanto Pan e Singh (2001) quanto Marcotte, Taherian e Karimini (2008) observaram que as variações existentes nesta variável ocorrem mais precisamente em baixas temperaturas permanecendo constante após 50/60 ^{o}C. Como os experimentos aqui apresentados envolvem apenas o reaquecimento, ou seja, processo sem grandes alterações de composição como perda de gordura e água que influem fortemente na variação de K, e operam em temperaturas acima do congelamento, o valor de K encontrado foi considerado constante na simulação computacional.

Para a massa, o valor de 0,089 W/m.^{o}C disponível na Tabela 6, é ligeiramente inferior ao encontrado por Jury et al. (2007) em massa de pães, que varia entre 0,1 e 0,2 W/m.^{o}C, tanto para a massa crua quanto após o assamento, observando variação com a temperatura apenas durante o processo de assamento. Sendo assim, essa variável também foi considerada constante na simulação computacional. O valor inferior ao encontrado na literatura pode estar relacionado principalmente as diferenças na composição das duas massas.

Já os valores de calor específico, tanto da massa quanto do recheio, foram inferiores aos reportados na literatura. Matuda, Filho e Tadini (2010) observaram que o calor específico da massa de pães permaneceu constante após o congelamento, apresentando valor de 2,7 J/g.^{o}C (0,64 cal/g.^{o}C). Essa diferença pode estar

relacionada com composição e tipos das massas. O experimento abordado na literatura incluiu ingredientes como polisorbato e ácido ascórbico, ausentes na composição de massa deste experimento.

Em relação ao recheio, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA,1996) reportou valores que variavam de 0,75 a 0,87 cal/g.^{o}C para diversas espécies de carne bovina. O valor inferior ao reportado pode estar relacionado ao tipo de corte e espécie dos animais.

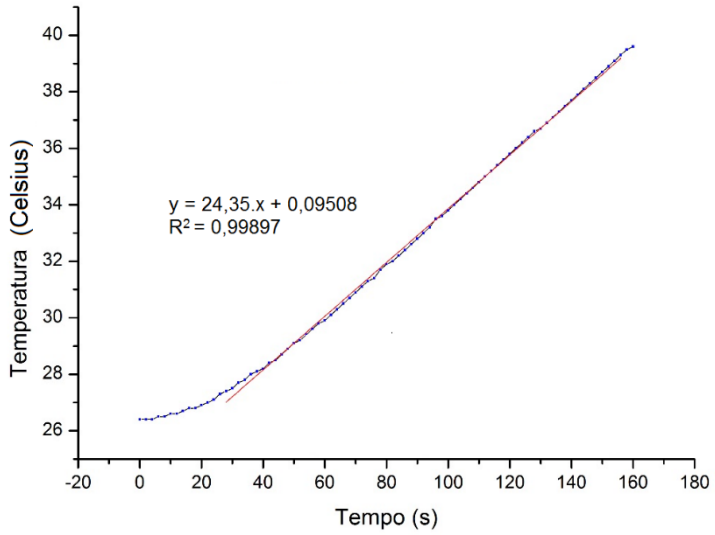
Todos os valores apresentados na Tabela 6 foram empregados na simulação computacional.

5.4.2 Simulação computacional para reaquecimento de alimentos no forno modelo

5.4.2.1 Potência efetiva

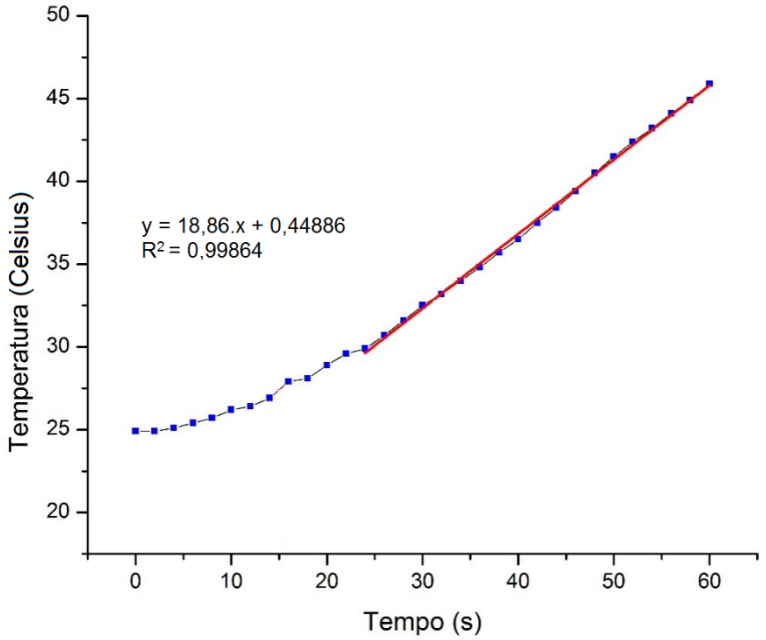
Os perfis de temperatura obtidos do aquecimento das placas de ferro e alumínio, para verificação da potência efetiva do infravermelho superior, pode ser visualizado nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

Figura 38 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma barra de ferro com infravermelho inferior



Fonte: Própria autoria

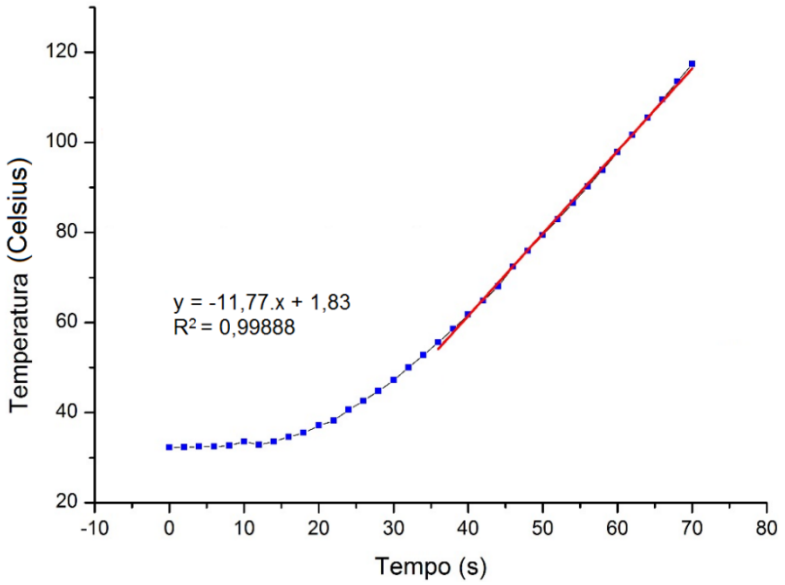
Figura 39 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma placa de alumínio com infravermelho inferior



Fonte: Própria autoria

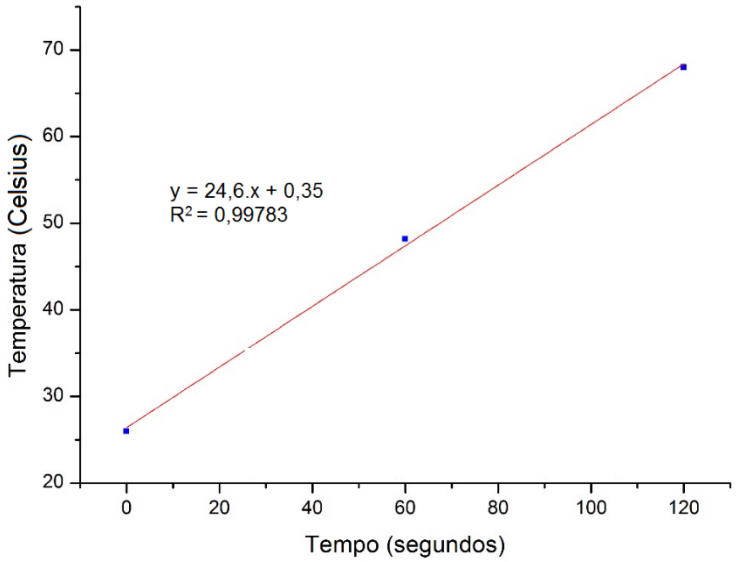
As Figuras 40 e 41 representam os perfis de aquecimento, da mesma placa de alumínio, para verificação da potência efetiva do infravemelho inferior e dos 300 mL de água, para verificação da potência efetiva da radiação micro-ondas, respectivamente.

Figura 40 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de uma placa de alumínio com infravermelho superior



Fonte: Própria autoria

Figura 41 – Variação de temperatura frente ao aquecimento de 300 mL de água por micro-ondas



Fonte: Própria autoria

Todos os cálculos, tanto da potência efetiva do infravermelho superior quanto inferior, e potência efetiva da radiação micro-ondas foram realizadas da mesma forma, seguindo o princípio descrito na Equação 1. Baseando-se na Equação 4 e utilizando a simplificação da Equação 6, juntamente com os valores de intersecção e inclinação de cada uma das retas obtidas acima, foram calculados os valores para a potência efetiva do infravermelho superior, potência efetiva do infravermelho inferior e potência efetiva da radiação micro-ondas. Esses resultados podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Potências efetivas (Erro estimado ±10%)

Radiação/ posição	Potência efetiva
Infravermelho superior	20 W/s
Infravermelho inferior	5 W/s
Micro-ondas	105 W/s

Fonte: Própria autoria

Todos os valores de potência, tanto do infravermelho quanto do magnetron, reportados na literatura, são superiores aos encontrados neste trabalho e

disponíveis na Tabela 7. Para a lâmpada de halogênio, responsável pela potência do infravermelho, os valores reportados por Data e Ni (2000) foram de 2.000 W/m^2, 4.000 W/m^2 e 6.000 W/m^2. Já Uysal, Sumnu e Sahin (2008) e Demikersen et al. (2011) reportaram a mesma potência: 1500 W.

Para a radiação do micro-ondas os valores reportados na literatura também são superiores aos encontrados neste trabalho. Keskin, Sumnu e Sahin (2003), Sumnu, Sahin e Sevimli (2004) e Seyhun et al. (2008) reportaram a mesma potencia: 706 W. Sumnu et al. (2006) reportaram duas potências diferentes: 750 W e 950 W, já Gowen et al. (2007) trabalharam com três potências diferentes: 210 W, 300 W e 560 W. Em contrapartida Alibas (2006) desenvolveu um equipamento de micro-ondas programável, permitindo-o trabalhar com potências variando de 90 W a 1000 W.

Ambas as potências, tanto infravermelha quanto micro-ondas, são inferiores as reportadas na literatura, pois tratam-se das potências instaladas e não efetivas, ou seja, todos os valores apresentados na Tabela 7 são resultado do experimento para encontrar a potência efetiva, aquela que efetivamente é absorvida pelas amostras e responsável pelo seu aumento de temperatura. Ademais, esse valor é relativamente baixo pois parte da potência emitida é dissipada no ambiente.

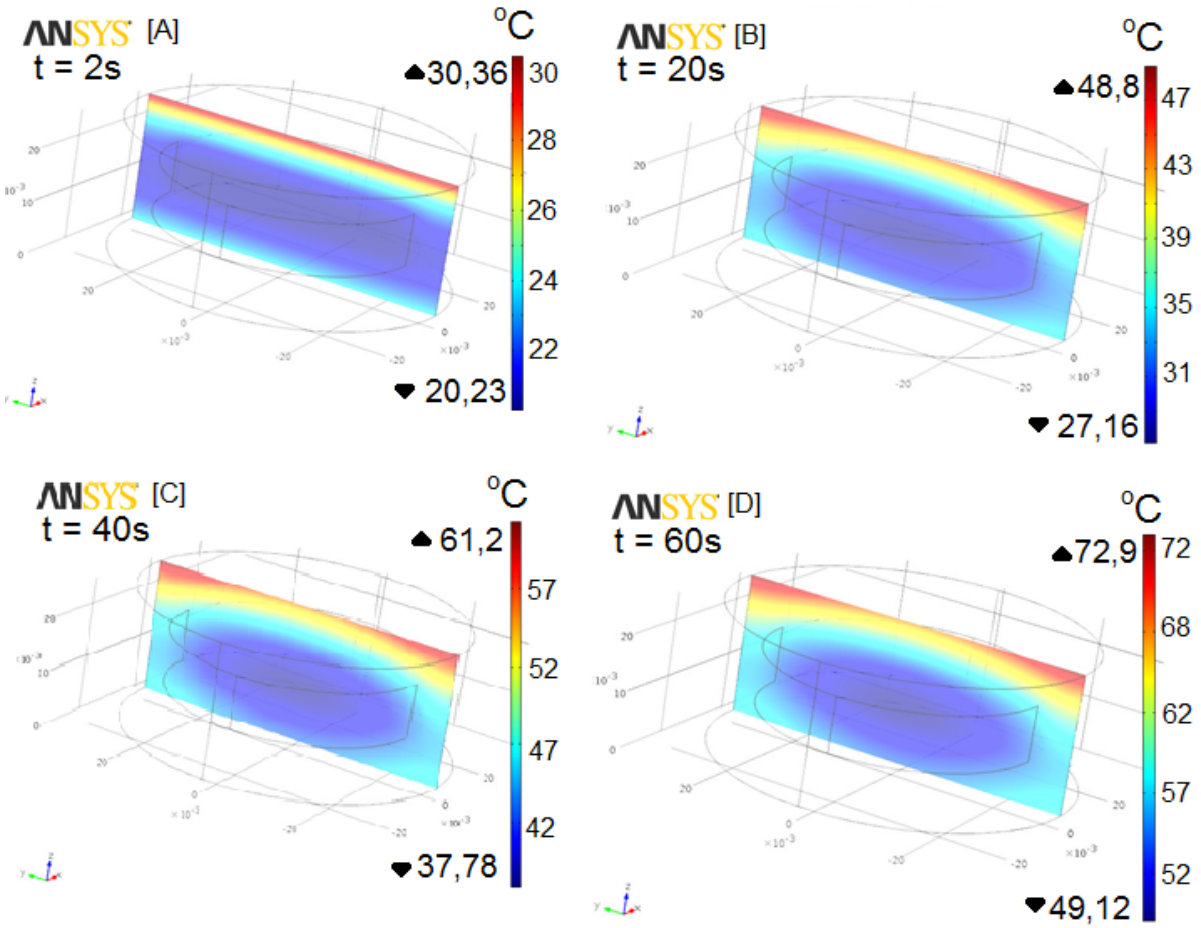
Nota-se também que, apesar de instaladas lâmpadas de halogênio de mesma potência, tanto no topo quanto no lastro do forno modelo (protótipo), os valores efetivos são diferentes, sendo o do lastro inferior ao do topo. Isso ocorreu pois no topo a potência era dissipada no ambiente e insidida no alimento. Já no lastro além de dissipar no ambiente, essa potência aquecia por radiação o prato e por condução o prato era aquecido e aquecia a amostra. Esse obstáculo diminuiu significativamente a potência que incidia no alimento.

5.4.2.2 Simulação computacional

Os valores obtidos nos itens 5.4.1 e 5.4.2.1 foram utilizados nas condições de contorno do problema e realizar a simulação. Inicialmente, foram realizadas simulações com o infravermelho e com o micro-ondas isoladamente, a fim de se determinar o perfil de aquecimento de ambos e então escolher a melhor combinação entre infravermelho e micro-ondas que garanta um aquecimento rápido e homogêneo.

Na Figura 42 tem-se os resultados dos aquecimentos apenas com infravermelho em função do tempo, de 2, 20, 40 e 60 segundos.

Figura 42 - Requecimento com infravermelho, superior e inferior: [A]: 2 segundos de reaquecimento; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento e [D]: 60 segundos de reaquecimento



Fonte: Própria autoria

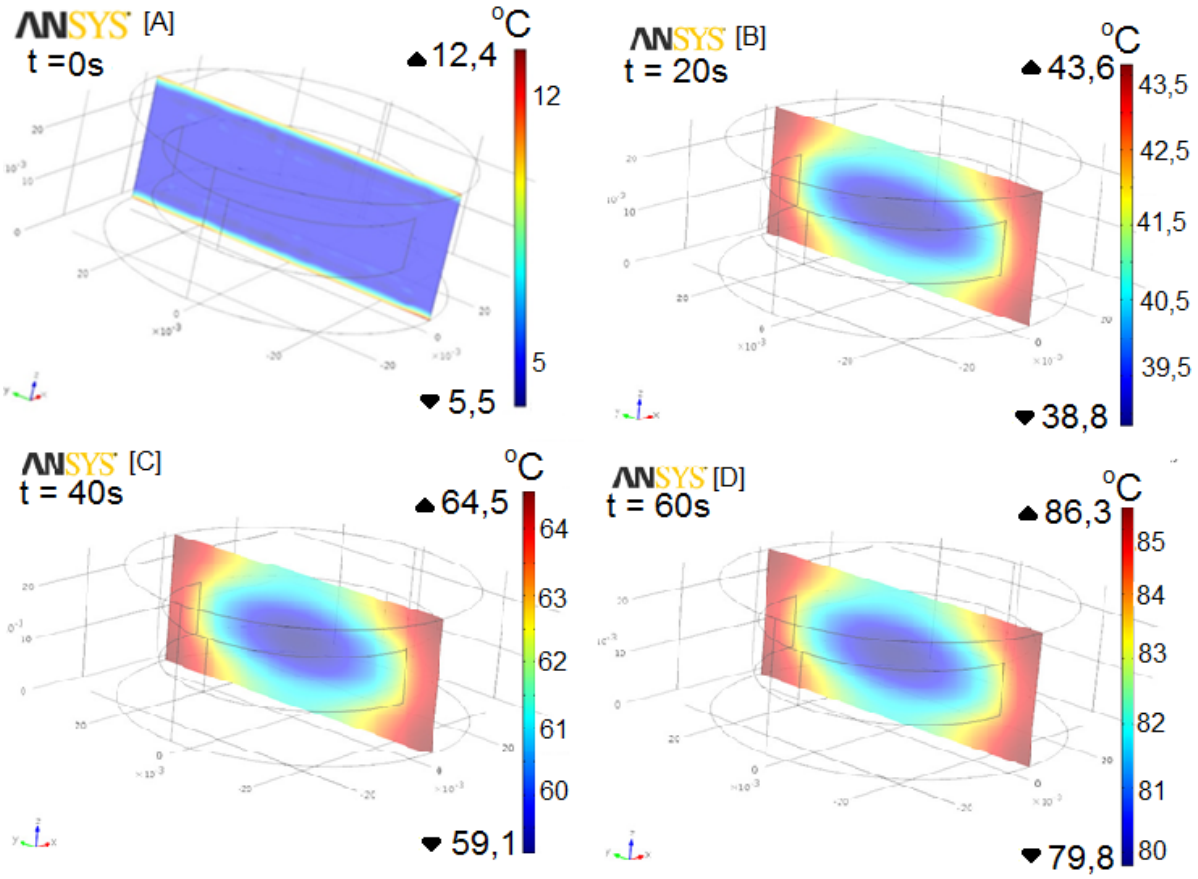
Os resultados mostraram que o aquecimento, apenas com infravermelho, resulta em uma diferença de temperatura de aproximadamente 23°C entre o centro da amostra e a superfície externa. Além disso, observa-se que o infravermelho superior causa mais efeito no salgado assado do que o inferior, devido a presença do prato, no qual o alimento é colocado.

Essa simulação corrobora com estudos realizados por Sakin, Kaymak-Ertekin e Ilicali (2007) em amostras de bolo, no qual a diferença entre temperatura interna (centro) e externa (superfície) foi de aproximadamente 50°C. Embora a diferença

encontrada pelo predito seja inferior ao encontrado na literatura, fica claro a baixa capacidade de penetração da radiação infravermelha, resultando em diferenças de temperatura significativa entre centro (pouco aquecido) e superfície (mais aquecida). Nota-se que a comparação do resultado foi realizada com uma amostra homogênea (bolo), já que dados de alimentos bifásicos para esse fim, não foram encontrados na literatura.

A segunda simulação foi realizada apenas com o micro-ondas, levando em consideração o perfil de penetração do micro-ondas e a porcentagem de água na massa e no recheio. O resultado em função do tempo está apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Reaquecimento micro-ondas: [A]: Amostra retirada do refrigerador; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento; [D]: 60 segundos de reaquecimento



Fonte: Própria autoria

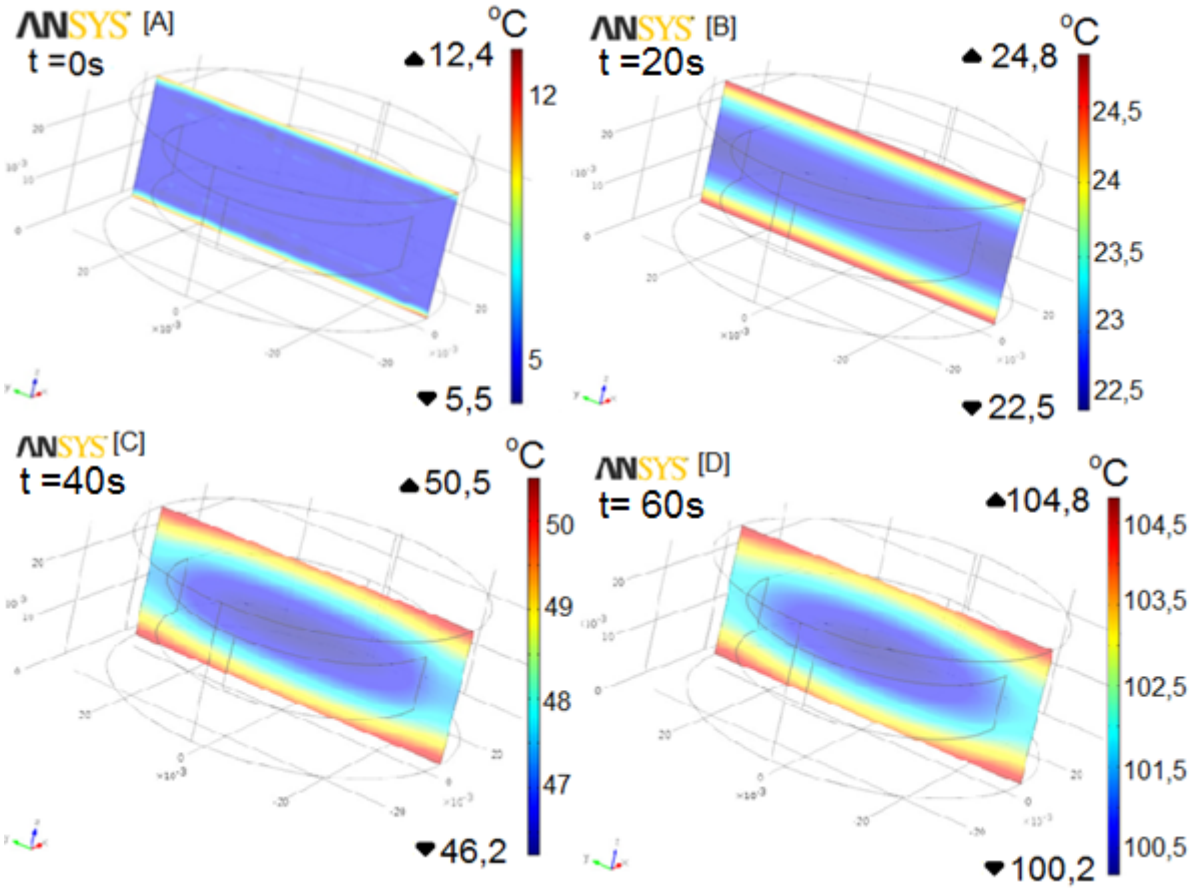
Neste processo de aquecimento, nota-se pela simulação, que a diferença final de temperatura de aproximadamente 6,5°C entre centro e superfície é menor em

comparação com o aquecimento apenas com infravermelho, porém apresenta um perfil diferente, com as maiores temperaturas localizadas nas laterais.

Dentro da mesma ordem de grandeza Liu, Fukuoka e Sakai (2012) e Liu et al. (2014a) simularam amostras também cilíndricas de purê de batata, no qual ambos reportaram uma diferença de 5°C entre centro e superfície. Esses resultados corroboram com os simulados para os alimentos bifásicos, comprovando desta forma a maior capacidade de penetração da radiação micro-ondas em comparação com a radiação infravermelha. No entanto Burfoot, Griffin e James (1988) encontram valores e comportamentos diferentes dos reportados acima. Nesse caso a diferença de temperatura entre centro e superfície de amostras de espaguete bolonhesa embalados (embalagem para micro-ondas) foi de 36 °C para um forno micro-ondas de 2450 mHz. Isso pode ter ocorrido devido a embalagem, que dificultou a penetração da radiação, necessitando de um tempo maior de aquecimento para atingir temperatura homogênea em toda amostra.

Com as informações dos perfis de aquecimento, foi feita uma simulação contendo, tanto o infravermelho quanto o micro-ondas, em um mesmo aquecimento. A combinação de tempo de aquecimento com infravermelho e micro-ondas foi escolhida de forma a evitar o superaquecimento, e obter um perfil final de temperatura mais homogêneo possível. Os resultados apresentados na Figura 44 representam a melhor configuração encontrada.

Figura 44 - Reaquecimento com micro-ondas e infravermelho: [A]: Amostra retirada do refrigerador; [B]: 20 segundos de reaquecimento; [C]: 40 segundos de reaquecimento; [D]: 60 segundos de reaquecimento



Fonte: Própria autoria

Nesta simulação, nota-se que a temperatura final foi mais homogênea em comparação com as anteriores. Neste aquecimento combinado, a diferença máxima na temperatura final foi de 4,6°C, inferior aos valores associados apenas ao infravermelho e micro-ondas isolados, de 23°C e 6,5°C respectivamente.

Esse resultado corrobora com as conclusões dos estudos de Datta e Ni (2000), Sumnu et al. (2006) e Seyhun et al. (2008) que relatam aquecimento homogêneo de diversas amostras de alimento na presença do aquecimento combinado das potências de micro-ondas e infravermelho, além de diversos benefícios associados a textura, conteúdo de umidade, volume específico, entre outros.

Apesar de todos os dados encontrados na literatura estarem relacionados a amostras de alimentos homogêneos, ou seja, com uma única fase, com os resultados da simulação pode-se inferir que o uso combinado do micro-ondas e do

infravermelho também será viável, a fim de garantir um aquecimento mais homogêneo em um curto intervalo de tempo, agilizando a operação do forno e otimização energética do seu preparo.

5.4.2.3 Teste do forno e reaquecimento das amostras

5.4.2.3.1 Testes com alimento

Após a remoção das amostras do refrigerador, eram realizadas as medidas de temperatura interna e da superfície dos salgados. Em média os salgados possuíam temperatura de superfície de 12,4 ± 0,4 ^{o}C e temperatura interna de 5,7 ± 0,9 ^{o}C.

Os resultados de temperatura, interna e externa, das amostras reaquecidas pelos 6 testes descritos no item 4.4.2.3, podem ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição dos testes de combinação para reaquecimento das amostras (Erro estimado ± 5%)

Teste	Temperatura interna (^{o}C)	Temperatura externa (^{o}C)
1	63,3	73,5
2	70,0	61,0
3	72,5	70,5
4	67,5	71,2
5	76,9	77,1
6	82,0	78,0

Fonte: Própria autoria

De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2016), a temperatura mínima de cozimento de carne bovina é de 71 ^{o}C. Portanto nota-se que os testes de 1 a 4 não foram eficientes para o cozimento adequado, já que o interior do salgado apresentou temperatura inferior ao desejado. Isso ocorreu devido ao fato do alimento ter sido aquecido inicialmente com a radiação infravermelha seguida pela radiação micro-ondas. A umidade removida pelo micro-ondas não sofreu eliminação suficiente, impedindo a penetração das radiações e aumento desejado da temperatura.

Durante os testes com combinação alternada, percebeu-se que a ação completa do micro-ondas antes da radiação infravermelha poderia acarretar, tanto

em temperatura ideal de consumo quanto em características sensoriais adequadas ao consumidor, confirmando como mais eficientes as combinações 5 e 6.

A diferença entre temperatura de centro e superfície para os experimentos 5 e 6 foram 0,2 ^{o}C e 9 ^{o}C, respectivamente. Embora a comparação com dados da literatura sejam realizados com alimentos homogêneos, ou seja, apenas uma fase, o experimento 5 corroborou com os dados de Liu, Fukuoka e Sakai (2012), que apresentaram diferença de aproximadamente 5 ^{o}C entre temperaturas preditas e experimentais, em amostras de purê de batata. Segundo os mesmos autores, diferenças de até 5% entre valores simulados e obtidos por meio de experimentos são consideradas aceitáveis. Temperaturas experimentais abaixo das preditas em uma simulação computacional podem ocorrer devido ao atraso operacional que ocorre ao longo do experimento. Esse "*delay*" operacional é o atraso na resposta que ocorre entre o final do aquecimento e a distribuição de temperatura durante o experimento.

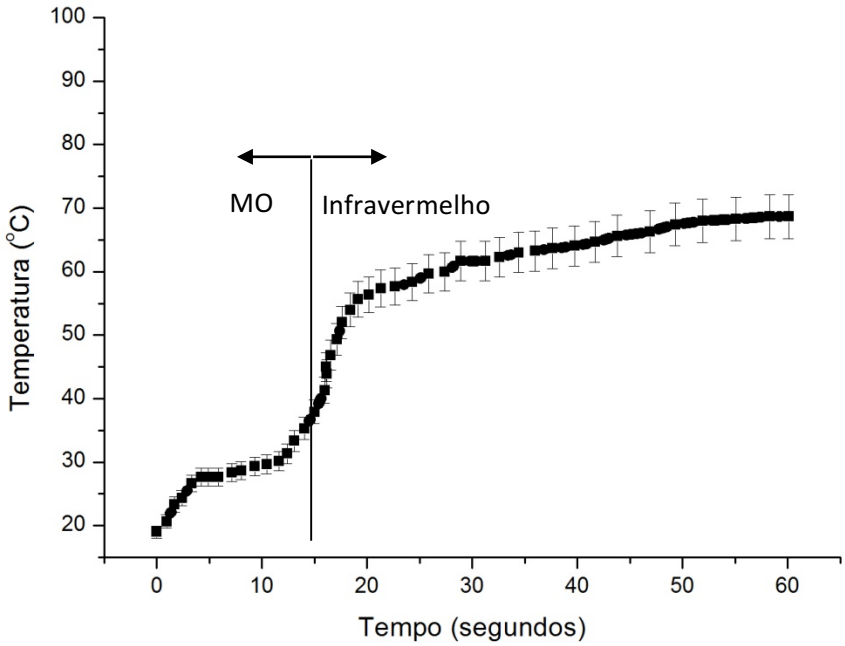
Em contrapartida, o experimento 6 apresentou diferença de 9 ^{o}C, valor superior aos 4,5 ^{o}C da simulação computacional apresentada no item 5.4.2.3.1. Esse resultado corrobora com os encontrados por Liu et al. (2014a), também em amostras de pure de batata, no qual a diferença entre simulado e experimental foi de 10 ^{o}C aproximadamente para superfície e 15 ^{o}C para o centro do pure.

Embora o experimento 6 apresentou valores experimentais superiores ao simulado, a temperatura interna atingiu o mínimo sugerido, além da temperatura de superfície de 78 ^{o}C comprovar a importância da circulação de ar quente, ao comparar com os 77,1 ^{o}C atingidos no experimento 5.

Após a decisão da melhor combinação de aquecimento, o monitoramento em tempo real foi realizado para acompanhar o aumento de temperatura no interior do alimento durante o preparo.

As Figuras 45 e 46 mostram os resultados dos experimentos sem e com circulação de ar, respectivamente.

Figura 45 - Perfil de temperatura no interior do salgado sem circulação de ar quente

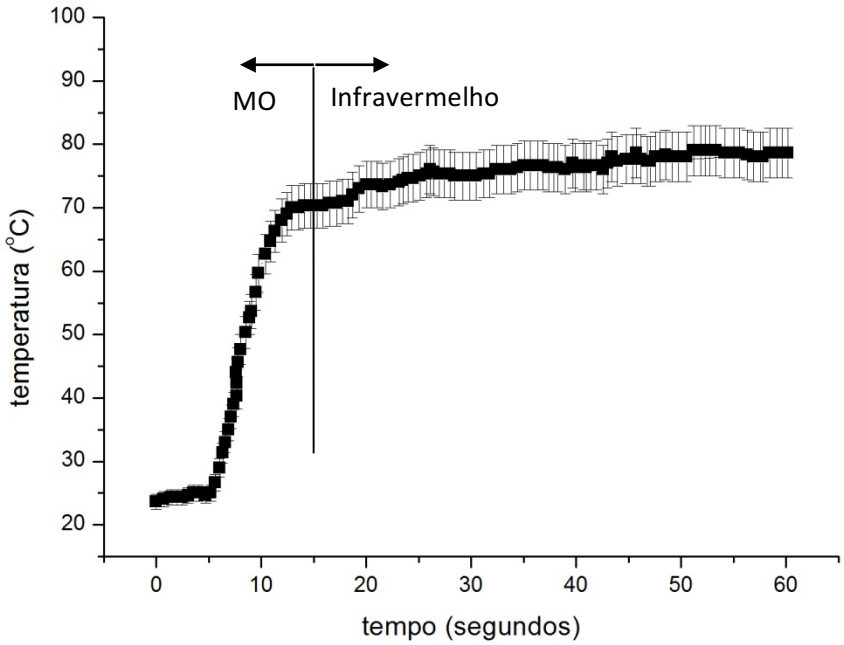


Fonte: Própria autoria

Por meio da Figura 45 é possível notar que a temperatura no interior do alimento foi estabilizada próximo aos 67°C. Estes experimentos evidenciaram a falha observada quando se faz medidas pontuais, como foi feito na primeira etapa dos experimentos, no qual um termo higrômetro era pontualmente inserido no centro do alimento e uma medida era tomada. Nota-se que este método insere erros nas medidas, já que o calor especifico dos ingredientes utilizados no recheio são diferentes, portanto a alta temperatura associada ao último teste realizado desta forma, pode estar relacionada com o contato com ingredientes com baixo calor especifico, apresentado temperaturas maiores do que a temperatura média central de todo o recheio.

Além disso, evidencia-se a necessidade da utilização desta circulação, já que a temperatura interna do recheio não apresentou temperatura mínima necessária de assamento.

Figura 46 - Perfil de temperatura no interior do alimento com circulação de ar quente



Fonte: Própria autoria

Os dados do gráfico da Figura 46 mostram que a circulação de ar quente contribuiu para um aumento de aproximadamente 10°C no perfil final de temperatura do salgado. A maior temperatura observada após os 60 segundos de aquecimento foi de aproximadamente 78°C, temperatura esta superior a temperatura mínima de cozimento dos produtos cárneos, resultando em preparo eficiente e seguro. Os benefícios da circulação de ar quente também foram comprovados por Datta e Ni (2000) em amostras porosas como carne e massa de *cookie* e por Sumnu et al. (2006) em pães.

Além disso, o acompanhamento do perfil de temperatura durante o aquecimento permite verificar que o tempo de preparo, anteriormente definido como 1 minuto, pode ser diminuído para 45 segundos, tempo a ser definido com novos experimentos. Esta mudança pode ser confirmada já que, observando-se os dados, não nota-se mudança significativa de temperatura após este intervalo de tempo, contribuindo portanto para eficiência energética e agilidade de preparo.

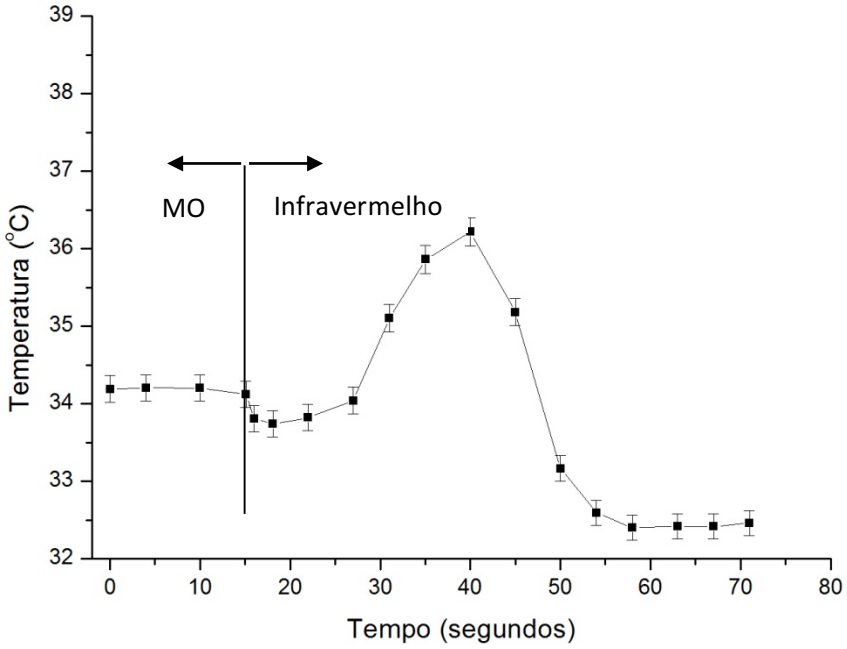
Estes resultados obtidos em um forno convencional, adaptado para conter duas tecnologias de aquecimento, não representa a real geometria de um forno tipo túnel experimental, mas pode-se inferir que a forma como as radiações atuam no alimento não se alteram drasticamente de uma geometria a outra. Desta forma, os resultados podem ser usados como condições iniciais para o teste em forno tipo

túnel, dando condições para se inferir dados, tanto para a simulação computacional no forno quanto para os testes com alimento.

5.4.3.2.2 Teste do forno modelo

As medidas de temperatura e umidade dentro do forno foram realizadas para todos os experimentos. Para este caso o comportamento de temperatura (Figura 47) e umidade (Figura 48) no interior do aparato experimental são colocados em forma de gráfico.

Figura 47 - Temperatura no interior do forno micro-ondas



Fonte: Própria autoria

Poucos são os trabalhos encontrados na literatura que, além de avaliar o perfil de temperatura de alimentos ao serem submetidos a variações de temperatura, também avaliem o comportamento do local de aquecimento, levando em consideração as alterações no espaço, relacionadas as mudanças no alimento. O comportamento apresentado pela Figura 47 corrobora com o perfil observado por Broyart e Trystran (2001) em fornos tipo túnel durante o aquecimento de biscoitos. Os autores relataram aumento de temperatura do forno a medida que a temperatura de superfície do alimento aumentava. Embora a Figura 46 expresse os dados de temperatura interna, e não de superfície das amostras, é possível correlacionar essas alterações com as variações observadas no forno modelo. Nota-se que durante a ação da radiação micro-ondas, primeiros 15 segundos, não há alteração

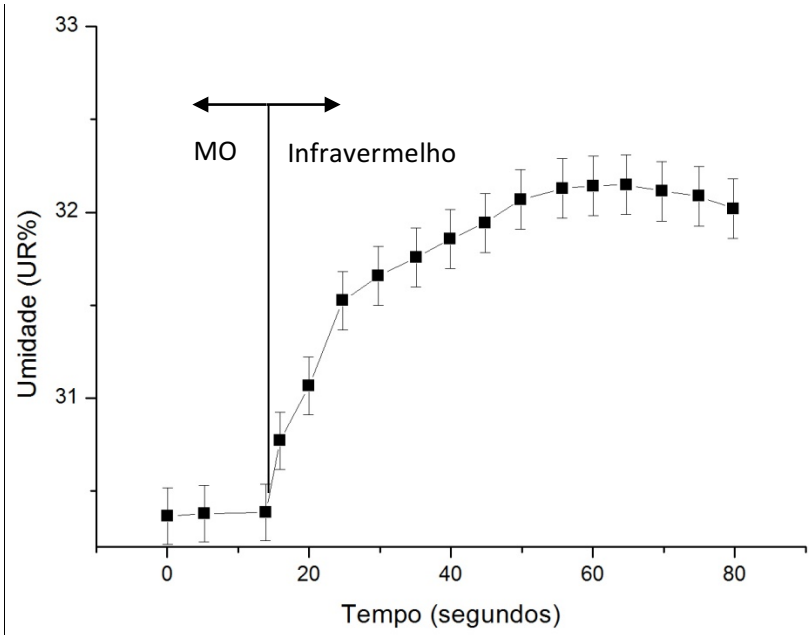
de temperatura do ambiente, já que o aquecimento é observado apenas no interior das amostras, comportamento também observado por Datta e Ni (2000) e Demikersen et al. (2011).

Enquanto o micro-ondas age no interior das amostras, a baixa capacidade de penetração do infravermelho faz com que sua ação ocorra potencialmente nas superfícies. O comportamento da temperatura no interior do forno (Figura 47), entre 15 e 45 segundos aproximadamente, também foi observado por Ploteau, Nicolas e Glouannec (2012).

Nota-se na Figura 47, após 45 segundos aproximadamente, uma queda de temperatura de aproximadamente 3,5 ^{o}C no interior do forno. Essa queda ocorreu devido ao término do reaquecimento das amotras, reduzido para 45 segundos, de acordo com resultados observados no item 5.4.2.3.1.

O comportamento do forno modelo também foi observado baseado nas alterações de umidade das amostras reaquecidas. O resultado expresso em umidade *versus* tempo, pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 - Umidade no interior do forno micro-ondas



Fonte: Própria autoria

Nota-se que durante a ação do micro-ondas, primeiros 15 segundos, não há remoção significativa de umidade. No momento em que a lâmpada é ligada, 45 segundos restantes, foi verificado um aumento significativo na umidade do forno, ou seja, umidade era removida do alimento. Este gráfico também permite verificar que o

tempo adotado para o preparo ideal do alimento é suficiente para eliminar a água livre necessária, visto que próximo dos 45 segundos, tempo final de preparo, inicia-se uma estabilidade nessa eliminação, seguida pelo declínio 20 segundos após o término do aquecimento, no qual a umidade do forno tende a se equilibrar com a do ambiente.

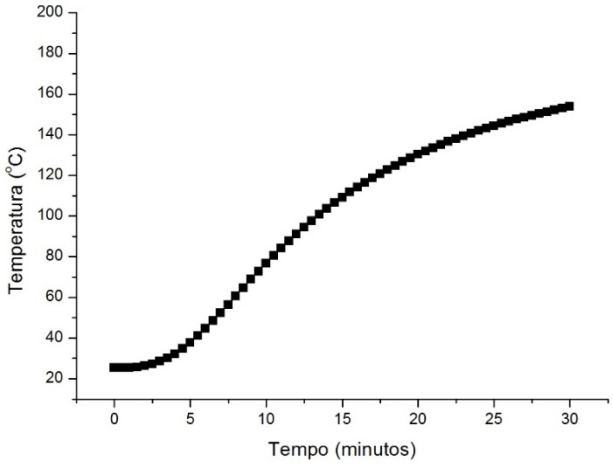
Essa relação entre água removida do alimento e aumento de umidade ambiente também foi observada por Broyart e Trystran (2001) no aquecimento de biscoitos em forno tipo túnel. Devido a dificuldade de se medir umidade no interior do alimento e no interior de fornos micro-ondas, a literatura encontrada (Keskin, Sumnu e Sahin (2003); Sumnu, Sahin e Senvili (2004); Sumnu et al. (2006) e Alibas (2006)) comprova apenas o benefício da combinação das radiações em relação ao conteúdo de umidade, baseado na diferença de peso das amostras antes e depois do processamento combinado.

5.4.3 Simulação computacional para reaquecimento das amostras em forno tipo túnel

5.4.3.1 Potência efetiva

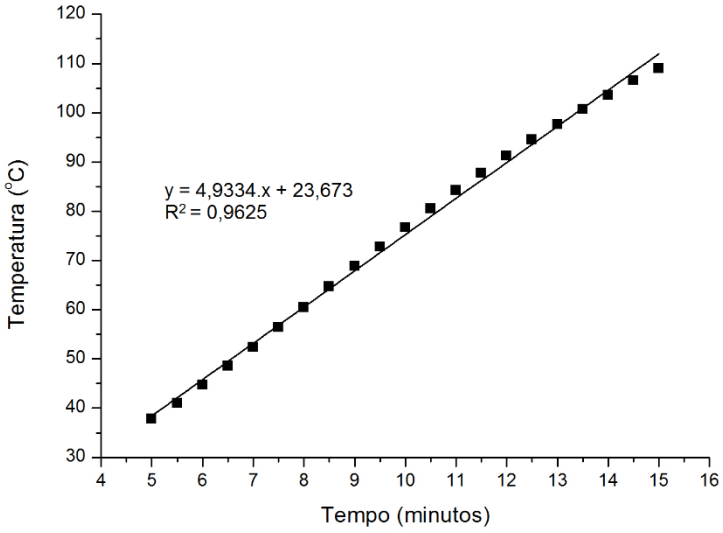
Para cada um dos experimentos, de cada uma das resistências, os dados de temperatura (^{o}C) *versus* tempo (minutos) foram colocados em um gráfico, conforme Figura 49. Os dados referentes ao comportamento linear do aquecimento foram colocados em um gráfico separadamente para avaliação (Figura 50) e foram obtidos os valores das respectivas potências reais.

Figura 49 - Potência efetiva do infravermelho (forno tipo túnel)



Fonte: Própria autoria

Figura 50 - Região de comportamento linear



Fonte: Própria autoria

A Tabela 9 contém todos os dados dos valores de intersecção obtidos dos gráficos, bem como os valores das potências encontradas.

Tabela 9 - Potências efetivas (Erro estimado ± 5%)

Resistências	Potência 1 (W.s)	Potência 2 (W.s)	Potência 3 (W.s)	Média (W.s)	Desvio Padrão
R1	17,8	18,4	17,1	17,8	0,53
R2	9,5	9,8	8,9	9,4	0,37
R5	14,7	14,6	15,1	14,8	0,26
R6	10,5	7	7.9	8,5	1,48

Fonte: Própria autoria

Nota-se que os valores das potências de R1 e R5 foram superiores aos das resistências R2 e R6. Isso ocorreu pois R1 e R5 são resistências posicionadas no topo do forno, não dissipando calor por meio da esteira. Já as resistências inferiores dissipam calor, pelas duas superfícies da esteira, antes de aquecer diretamente as amostras.

Foram assumidas as médias das potências superiores e inferiores de 16,3 W.s e 8,9 W.s respectivamente, para serem utilizadas na simulação computacional.

Conforme pode ser observado, ao comparar a Tabela 9 com a Tabela 7, os valores de potência da radiação infravermelha, estão na mesma ordem de grandeza,

permitindo desta forma, utilizar os mesmos resultados da simulação computacional inicial, agora nos experimentos que combinam a mesma radiação micro-ondas com a radiação infravermelha do forno tipo túnel, ou seja, os experimentos realizados no forno tipo túnel seguirão o mesmo padrão, que combinam 15 segundos de micro-ondas seguido por 30 segundos de infravermelho, totalizando 45 segundos de requecimento.

5.4.3.2 Avaliação de temperatura no alimento

Diferente dos experimentos realizados por Golwen et al. (2007), Uysal, Sumnu e Sahin (2008) e Kowalski e Rajewska (2009) no qual compararam diversos alimentos somente submetidos a infravermelho, somente submetidos a micro-ondas e submetidos a combinação de ambas as radiações, a comparação das temperaturas neste trabalho foi realizada apenas entre amostras reaquecidas somente pela radiação infravermelha e pela combinação das radiações. Isso ocorreu pois o intuito era verificar a ação de cada radiação, e isso foi possível pois é plausível observar a ação independente do micro-ondas durante o reaquecimento combinado, e do infravermelho durante aquecimento apenas no forno tipo túnel, tornando desnecessário o reaquecimento apenas pela radiação micro-ondas.

Os resultados de temperatura, encontrados nos experimentos de reaquecimento dos alimentos bifásicos, utilizando apenas a radiação infravermelha (formo tipo túnel) e por meio da ação combinada da radiação micro-ondas e infravermelha, podem ser observados nas Tabela 10 e Tabela 11, respectivamente.

Tabela 10 - Valores de temperaturas encontrados por meio do reaquecimento apenas pela radiação infravermelha (Erro estimado 5%)

		Após refrigerador		Após infravermelho	
N	**Peso(g)**	**T_{int} (°C)**	**T_{ext} (°C)**	**T_{int} (°C)**	**T_{ext} (°C)**
1	44,65	5,5	12	14,3	63
2	44,50	3,6	11,3	13,6	56
3	42,30	5,6	11,5	15,1	62
4	46,30	5,2	11,7	11,6	76
5	43,08	5,5	12,8	16	67
6	41,44	3,2	11	15,7	75
7	39,45	4,2	11,3	6,9	65
8	43,29	4,4	16,5	13,2	63
9	46,80	3,6	14	11,1	67
10	48,65	5,3	15,3	16,1	65,3
11	55,77	4,2	14,5	17,9	64
12	48.81	5,7	13,5	9,1	76
13	40.56	5,3	12,5	15,2	69,3
14	48,65	5,6	11,5	14,9	68,5
Média	**42,46**	**4,75**	**12,81**	**14,19**	**69,9**
σ	**11,26**	**0,86**	**1,64**	**3,12**	**4,18**

Observações: n – número das amostras; T_{int} (°C) – temperatura interna (centro do recheio); T_{ext} (°C) – temperatura externa (superfície do salgado); σ – desvio padrão

Fonte: Própria autoria

Tabela 11 - Valores de temperaturas encontrados por meio do reaquecimento por meio da combinação das radiações infravermelha e micro-ondas (Erro estimado ± 5%)

		Após refrigerador		Micro-ondas		Infravermelho	
N	**Peso(g)**	**T_{int} (°C)**	**T_{ext} (°C)**	**T_{int} (°C)**	**T_{ext} (°C)**	**T_{int} (°C)**	**T_{ext} (°C)**
1	46,77	7,0	12,0	92,0	73,0	80,0	79,2
2	45,50	7,9	12,5	92,4	74,3	93,1	90,8
3	51,16	6,7	11,5	90,1	76,9	86,8	81,0
4	43,40	6,6	13,8	93,7	72,4	88,0	83,6
5	41,02	7,2	11,3	90,3	68,8	87,7	83,0
6	50,50	6,5	11,5	83,0	75,0	83,4	84,0
7	44,93	7,7	11,0	79,0	60,0	72,7	81,0
8	36,92	7,1	11,2	91,3	74,8	92,1	80,3
9	47,32	6,1	13,7	87,7	74,0	79,0	83,0
10	40,37	7,3	13,1	88,4	70,4	84,6	89,0
11	52,39	5,9	10,8	87,8	67,3	76,0	78,0
12	51,04	5,3	10,5	87,6	72,4	74,2	81,3
13	43,60	6,0	14,0	82,0	63,0	87,7	80,1
14	46,55	6,1	11,5	80,3	66,5	72,3	76,0
Média	**45,82**	**6,67**	**12,03**	**87,54**	**70,63**	**82,27**	**82,81**
σ	**4,37**	**0,71**	**1,14**	**4,53**	**4,74**	**6,64**	**4,18**

Observações: n – número das amostras; T_{int} (°C) – temperatura interna (centro do recheio); T_{ext} (°C) – temperatura externa (superfície do salgado); σ – desvio padrão

Fonte: Própria autoria

Convém salientar que a circulação forçada de ar quente, a qual teve necessidade comprovada no item 5.4.2.3.1 a fim de potencializar a ação combinada das radiações no reaquecimento dos alimentos bifásicos, não foi utilizada nem nesta avaliação de temperatura nem na avaliação de umidade das amostras (item 5.4.3.3). Isso ocorreu pois, a máxima temperatura atingida no interior da cavidade do micro-ondas foi de 36,5 °C (Figura 47). Segundo Datta e Ni (2000), tanto a baixa temperatura das amostras quanto o acúmulo de umidade na superfície, ocorre devido a presença do “ar frio” do ambiente, fato que não é observado nos fornos tipo túnel, no qual a temperatura atinge valores que variam entre 200 a 280 °C. Esse intervalo de temperatura torna dispensável a necessidade de circulação forçada para

intensificar, tanto a elevação de temperatura quanto a remoção de umidade dos alimentos bifásicos.

Em relação aos dados apresentados nas Tabelas 10 e 11 nota-se uma diferença significativa, tanto nos valores de temperatura interna quanto nos valores de temperatura externa, ao comparar as amostras reaquecidas apenas por infravermelho no forno tipo túnel e por meio da combinação das radiações. As amostras reaquecidas pela combinação das radiações, utilizando o forno tipo túnel, atingiram temperaturas internas médias de 82,27 ± 6,64^{o}C, temperatura essa também superior a temperatura mínima de cozimento de produtos cárneos de 71°C, sugerida pelo Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA (USDA, 2016), enquanto o reaquecimento de amostras, dentro do mesmo lote de fabricação, reaquecidas apenas no forno tipo túnel, no mesmo período de tempo, atingiram temperaturas internas médias de 14,19 ± 3,12 ^{o}C, inferior ao recomendado, confirmando os resultados dos testes previamente discutidos no item 5.4.3.2.2.

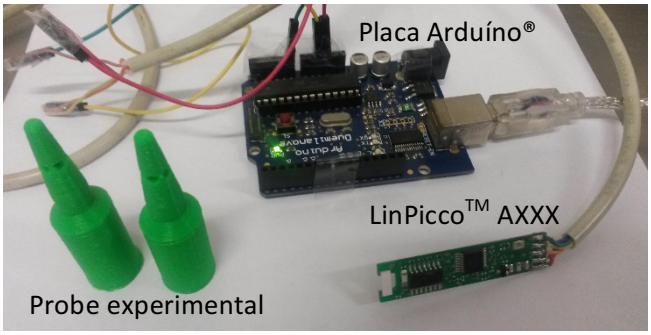
Os resultados obtidos também corroboram com os adquiridos por Keskin, Sumnu e Sahin (2003) em pães e por Sumnu, Sahin e Sevimli (2004) em bolos, no qual a combinação representou redução do tempo de preparo de 75% quando comparado as amostras preparadas apenas pela radiação infravermelha. Neste caso os autores optaram por estipular uma temperatura ideal e mediram o tempo necessário para alcança-lo, já nesta tese optou-se por fixar o tempo padrão e verficar o comportamento das radiações e das temperaturas naquele intervalo de tempo. Mesmo com metodologias diferentes é possível comparar os resultados, no sentido de que ambos comprovam a viabilidade de utilização dessa tecnologia, agora também para alimentos bifásicos. Ademais, se comparados por porcentagem de eficiência, a temperatura de 14,19 ± 3,12 ^{o}C atingida no reaquecimento apenas por forno tipo túnel representa apenas 17,2% dos 82,27 ± 6,64 ^{o}C atingidos no reaquecimento combinado, ou seja, o processo de reaquecimento por combinação apresentou eficiência de 82,7%, resultado este superior aos 75% encontrados na literatura citada.

Nota-se também que, os resultados experimentais comprovaram a predição realizada pela simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos, descrita no item 5.4.2, assim como observado por Seyhum et al. (2008) e Liu et al. (2014a).

5.4.3.3 Avaliação da migração de umidade no interior do alimento

O sensor LinPicco™ AXXX Basic, a placa Arduíno® Duemilanove e a probe experimental, desenvolvida especificamente para a realização desse experimento, podem ser visualizadas na Figura 51.

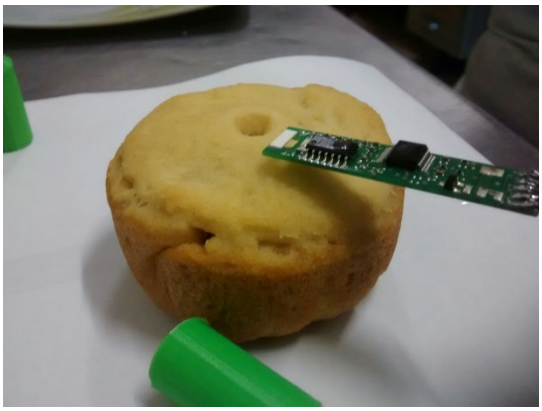
Figura 51 - Aparato experimental para medir umidade



Fonte: Própria autoria

Para as medidas de umidade na superfície e na lateral, os sensores foram posicionados a uma distância de 1 mm da amostra, conforme pode ser visualizado na Figura 52.

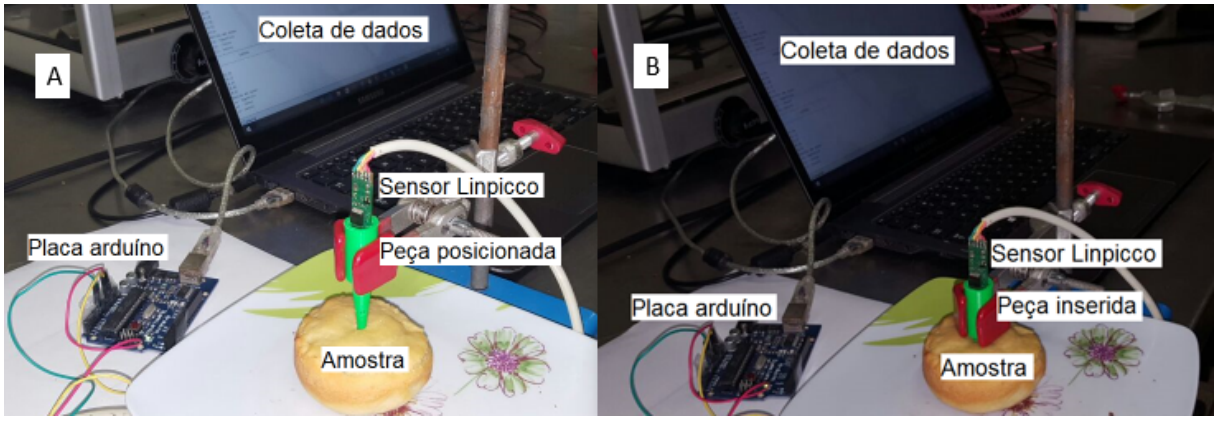
Figura 52 - Medida da umidade na superfície dos salgados



Fonte: Própria autoria

Para as medidas no interior das amostras, a peça foi posicionada no centro do recheio (Figura 53).

Figura 53 – A: Probe posicionada no centro do alimento; B: Probe inserida no centro do alimento



Fonte: Própria autoria

Conforme pode ser visualizado na Figura 53-B, a medida que a peça é inserida na amostra e posicionada exatamente no centro da mesma, a eliminaçao de vapor ocorre por meio dos micro orifícios, posibilitando que o sensor de umidade detecte a umidade, fornecendo os valores da mesma em cada posição.

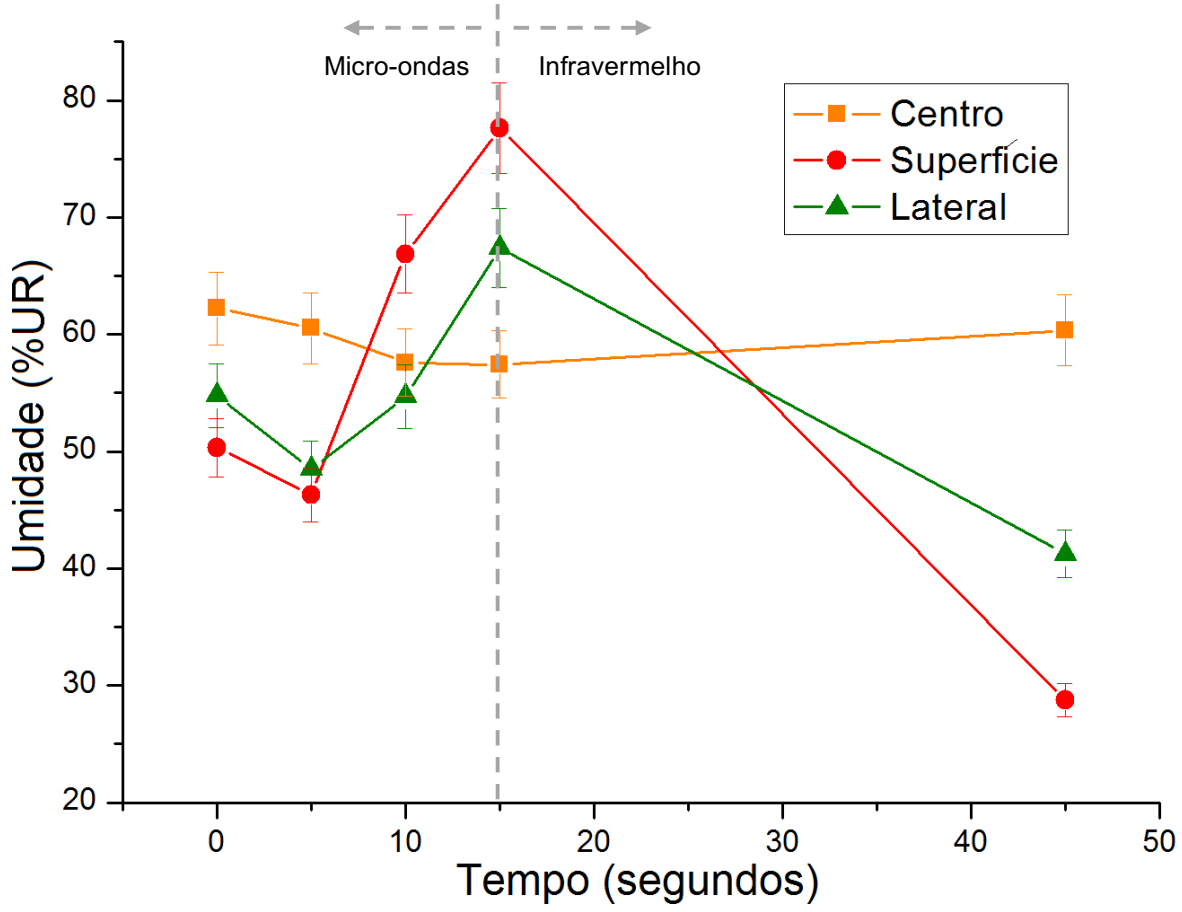
Nota-se que esse método, descrito detalhadamente no item 4.4.3.3 e ilustrado na Figura 52 e Figura 53, utilizado para medir o teor de umidade tanto no interior quanto na superfície das amostras, é inédito e ainda não reportado na literatura. Esse novo método permitiu uma análise detalhada da umidade expressa em %UR, tanto no centro quanto nas demais regiões das amostras.

Tradicionalmente autores como Ahmad, Morgan e Okos (2000), Mandala (2004), Al-Muhtaseb et al. (2009) entre outros utilizaram o método 44-15A (AACC, 1983), baseado na perda de peso para avaliação do teor de umidade em amostras submetidas ao aquecimento. No entanto, diversas são as limitações associadas a esse método, já que seu uso é restrito a condições específicas como tipo de amostras, aplicado apenas para alimentos derivados de farinha, grãos e cereais, além da necessidade de controle rigoroso do ambiente e equipamentos de alta precisão, como uma balança analítica. Ademais, a utilização desse método impossibilita a avaliação minuciosa de migração no interior das amostras, permitindo apenas uma análise global de perda de umidade total, mecanismo facilmente avaliado por meio do novo método aqui apresentado.

Os resultados das medidas de umidade no centro, superfície e lateral, colocados em forma de gráfico, no qual o eixo das abscissas representa o tempo em

segundos e o eixo das ordenadas representa a umidade em %UR, podem ser visualizados na Figura 54. Cada ponto representa a média de umidade naquela posição e naquele tempo mais ou menos o desvio padrão.

Figura 54 – Medidas de umidade no centro, superfície e lateral das amostras



Fonte: Própria autoria

Diferente de toda literatura encontrada, no qual a combinação das radiações é estudada para amostras de um único tipo de alimento, sendo eles em sua grande maioria, pães (Keskin, Sumnu e Sahin (2003); Sumnu et al. (2006) e Demikersen et al. (2011)), purês (Seyhun et al. (2008)), bolos (Sumnu, Sahin e Sevimli (2004)) ou amostras porosas (Datta e Ni (2000)), os resultados aqui apresentados levaram em conta o comportamento de cada fase do alimento, levando em consideração as diferenças existentes entre as propriedades físicas e a influência do comportamento da massa (fase A) sobre o recheio (fase B), e vice-versa. Cada ponto no gráfico representa a média mais ou menos o desvio padrão.

De acordo com a Figura 54 é possível notar que o comportamento da fase B, tanto durante a ação do micro-ondas quanto do infravermelho, é oposto ao comportamento da fase A, ou seja, enquanto a umidade do centro dimunui durante os primeiros 15 segundos (ação do micro-ondas), a umidade tanto das laterais quanto da superfície aumentou. Após os primeiros 15 segundos, ao iniciar a ação do infravermelho, enquanto o centro apresentou um pequeno aumento de umidade, as laterais e superfície apresentaram uma queda significativa de umidade.

A ligeira eliminação de água do centro no início do reaquecimento, e o aumento de umidade tanto nas laterais quanto na superfície no mesmo período (15 segundos iniciais) ocorre pois, segundo Sumnu et al. (2006) a potente penetração da radiação micro-ondas, acarreta em temperaturas mais elevadas, proporcionando aquecimento interno (recheio). Esse aquecimento aumenta a pressão interna, conduzindo o fluxo de pressão dirigida do centro para a superfície e laterais, acerelando ainda mais a perda de umidade naquela região. No entanto, pode-se observar que, diferente dos experimentos de Sumnu, Sahin e Sevimli (2004), a perda de umidade pela fase B e consequente ganho de umidade pela fase A, não apresentaram comportamento proporcional. Enquanto o centro “perdeu” aproximadamente 5% de umidade, a superfície e lateral “ganharam” aproximadamente 22% e 18% de umidade, respectivamente.

Esse comportamento pode ser explicado devido a diferença entre as propriedades físicas da massa e do recheio, de acordo com valores apresentados na Tabela 6. Embora a fase B apresente maior condutividade térmica, ou seja, conduz de forma mais rápida e eficiente a energia térmica absorvida, resultante do aumento de temperatura, esta possui maior calor específico, ou seja, precisa de mais energia para aumentar a temperatura, converter água do estado liquído para gasoso, aumentando o fluxo de pressão dirigida para a superfície. No entanto, o alto calor específico faz com que energia térmica conduzida seja inferior ao seu potencial de condução. A combinação dessas propriedades do recheio faz com que a eliminação de água seja menor do que aquela absorvida pela fase A. Ademais pode-se considerar também que o aumento da umidade em superfície e lateral podem estar relacionados não somente a migração de água livre entre as duas fases, mas também migração de água ligada, que não foi medida pelo sensor.

No entanto, nota-se que tanto a superfície quanto a lateral “ganharam” umidade, superior aquela “perdida” pelo centro. Isso ocorre pois, além de receber

umidade do centro, a penetração do micro-ondas também aquece as camadas internas da fase A. Conforme também observado na Tabela 6, tanto a condutividade térmica quanto o calor específico da massa são inferiores aos valores apresentados pelo recheio. Devido ao baixo calor específico, quando comparado com o recheio, tanto a região interna da superfície quanto da lateral, sofrem maior aumento de temperatura, convertendo maior quantidade de água livre em gás, aumentando o fluxo de pressão dirigida da superfície interna para a superfície externa, ou seja, migrando mais umidade. A baixa condutividade térmica pode ser desconsiderada para essa discussão, já que a espessura no qual a condução de calor ocorreria é muito pequena. Assim, explica-se a maior concentração de umidade na superfície externa das amostras após os 15 segundos de micro-ondas, já que somam-se a perda de água, tanto do recheio quanto da própria massa. Esse comportamento, embora comparado a amostras monofásicas, corroborou com os resultados de Datta e Ni (2000), Sumnu et al. (2006) e Demikersen et al. (2011).

Já na segunda etapa do reaquecimento, no qual aplica-se a radiação infravermelha por 30 segundos, nota-se uma pequena variação de aproximadamente 2% de umidade no centro, enquanto superfície e lateral apresentaram queda de aproximadamente 48% e 25% de umidade, respectivamente.

A pequena variação de umidade no recheio pouco está relacionada a aplicação do infravermelho. Isso ocorre pois, segundo Datta e Ni (2000) a capacidade de penetração da radiação infravermelha em amostras de massa a base de farinho de trigo varia de 4 a 6 mm. Isso significa que a radiação infravermelha não é capaz de atingir o centro do recheio, estando a pequena variação de umidade no recheio relacionada a própria distribuição de temperatura, resultante da condução do calor nas partículas de carne moída que constituem o núcleo dessas amostras.

Já a variação de umidade observada tanto na superfície quanto nas laterais, ocorre claramente devido ao aumento de temperatura ocasionado pelo uso da radiaçao infravermelha. A presença do infravermelho na superfície e lateral das amostras bifásicas, absorvido entre 4 a 6 mm de espessura, ocasiona um aumento de temperatura na região, aumentando a pressão gradiente, resultando em alta taxa de remoção de umidade. Porém, nota-se que a remoção de umidade da superfície e laterais não são iguais. Embora a área de superfície de 33,2 cm^2 seja inferior aos 51,1 cm^2 de área da lateral, a radiação é insidida perpendicular a superfície e

paralela a lateral, favorecendo a maior perda de umidade pela superfície (variação de 48%UR) em detrimento da remoção observada na lateral (25%UR).

Por conseguinte, além de disponibilizar uma nova metodologia que permita avaliação precisa de umidade no interior de qualquer tipo de material ou amostra de alimento, esta tese solucionou problemas relacionados ao acúmulo de umidade na superfície das amostras, além de possibilitar o estudo minucioso das alterações internas dos alimentos frente a aplicação de duas radiações diferentes, problemas estes presentes na literatura e relatados a mais de 40 anos por diversos autores como: Kaiser (1974), Standing (1974), Hayakawa e Hwang (1981), Trystran et al. (1991), Savoye et al. (1992), Fahloul et al. (1994), Ahmad, Morgan e Okos (2000), Mandala (2004), Sumnu et al. (2006), Khatir et al. (2011), Ploteou, Nicolas e Glouannec (2012) entre outros.

6 Conclusões

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que foi possível desenvolver um protótipo composto pela combinação das radiações micro-ondas e infravermelha, com adição de circulação de ar quente. Esse protótipo permitiu, junto à instrumentação eletrônica desenvolvida (sensores de temperatura e umidade para monitoramento de ambiente e alimento e softwares de coleta de dados), verificar de forma clara e eficiente o comportamento de ambas as radiações no modelo matemático testado e validado: os alimentos bifásicos, comprovando a necessidade da ação completa da radiação micro-ondas antes da ação completa da radiação infravermelha para um reaquecimento homogêneo e eficaz desse tipo de alimento. A simulação computacional auxiliou no dimensionamento da etapa experimental. Ademais, a união de ambas radiações resolveu diversos problemas associados a qualidade, como acúmulo de umidade e temperatura ideal de consumo, bem como eficiência de processamento. Essa tese também disponibiliza uma nova metodologia para avaliar o teor de umidade no interior de amostras de alimentos, variável até então limitante para solucionar problemas sensoriais de determinados alimentos.

Todos os resultados apresentados permitem concluir que a hipótese de que a combinação das radiações micro-ondas e infravermelha pode ser usada como uma nova alternativa no reaquecimento de alimentos bifásicos, em forno tipo túnel em escala-piloto, é verdadeira considerando-se a metodologia apresentada na tese.

7 Referências

ABREU, R.A. **Perdas no processo produtivo**. Rio de Janeiro, 26 nov. 2002.

American Association of Cereal Chemist. **Method 44-15A: Moisture-air-oven methods.** Estados Unidos: AACC, 1983.

ALIBAS, I. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. **Swiss Society of Food Science and Technology,** Turquia, v.40, n.8, p. 1445-1451, 6 set. 2006.

AL-MUHTASEB, A.H.; HARARAH, M.A.; MEGAHEY, E.K.; McMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Dielectric properties of microwave-baked cake and its constituents over a frequency range of 0.915–2.450 GHz. **Journal of Food Engineering**, Jordânia, v. 98, n.1, p. 84-92, 11 dez. 2009.

AHMAD, S.S.; MORGAN, M.T.; OKOS, M.R. Effects of microwave on the drying, checking and mechanical strength of baked biscuits. **Journal of Food Engineering,** Estados Unidos, v. 50, n.2, p. 63-75, 6 nov. 2000.

AVERSA, M.; CURCIO, S.; CALABRO, V.; IORIO, G. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. **Journal of Food Engineering**, Itália, v.78, n.3, p. 922-932, 24 jan. 2006.

BARBOZA, A.C.R.N.; CRUZ, C.V.S.; GRAZIANI, M.B.; LORENZETTI, M.C.F.; SABADINI, E. Aquecimento em forno micro-ondas/ Desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. **Química Nova**, Campinas, v.24, n.6, p. 901-904, 28 mai. 2001.

BLACKWELL, W.J.; CHEN, F.W. Combined Infrared and Microwave Retrievals of Atmospheric Profiles in the Presence of Clouds using Nonlinear Stochastic Methods: The SCENE Algorithm. **IEEE,** Lexington, p. 3928-3931, 2006.

BANGA, J.R.; ALONSO, A.A.; GALLARDO, J.M.; PEREZ-MARTIN, R.I. Mathematical Modelling and Simulation of the Thermal Processing of Anisotropic and Non-homogeneous Conduction-heated Canned Foods: Application to Canned Tuna. **Journal of Food Engineering**, Espanha, v. 18, n. 4, p. 369-387, 5 mar. 1992.

BOTTANI, E.; FERRETI, G.; MANFREDI, M.; VIGNALI, G. Modeling and Thermo-Fluid Dynamic Simulation of a Fresh Pasta Pasteurization Process. **International Journal of Food Engineering**, Itália, v.9, n.3, p.327-339, 2013.

BOUHRARA, M.; CLERJON, S.; DAMES, J.L.; CHEVARIN, C.; PORTANGUEN,S.; KONDJOYAN, A.; BONNY, J.M. Dynamic MRI and Thermal Simulation To Interpret Deformation and Water Transfer in Meat during Heating. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, França, v. 59, n.4, p. 1229-1235, 25 jan. 2011.

BURFOOT, D., GRIFFIN, W.J., JAMES, S.J. Microwave pasteurization of prepared milk .**Journal of Food Engineering**, Inglaterra, v.8, p. 145-156, 13 out. 1988.

BROYART, B.; TRYSTRAM, G. Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits. **Journal of Food Engineering**, França, v.51, n.1, p. 47-57, 2001.

CARSON, J.K., LOVATT, S.J., TANNER, D.J., CLELAND, A.C. Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous food. **Journal of Food Engineering**, Nova Zelandia, v. 75, n. 3, p. 297-207, 2006.

CARSON, J.K. Review of effective thermal conductivity models for food. **International Journal of Refrigeration,** França, v. 29, n. 6, p. 958-967, set. 2006.

CARZINO, M.C.**Projeto e análise para dimensionamento automático de fornos para cozimento de pães e biscoitos** 2006.100f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing-A review. **Food Research International**, India, v. 52, n.1, p.243-261, 21 fev. 2013.

CHEN, K., SONG, J. Y., ZHANG, S. Simulation and Analysis for Externally Prestressed Concrete Bridge Based on ANSYS, **Advanced Materials Research**, China, v. 243-249, p. 1737-1742, 17 mai. 2011.

CHOI, Y., OKOS, M.R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. **Food Engineering and Process Applications,** Londres,v.1, p.93-101, 1986.

CHOI, Y.; OKOS, M.R. Thermal properties of liquid foods- Review. **Physical and Chemical Properties of Food**, Nova Iorque, n. 93, p. 35-77, 1983.

COGNÉ, C., ANDRIEU, J., LAURENT, P., BESSON, A. & NOCQUET, J. Experimental data and modeling of thermal properties of ice creams. **Journal of Food Engineering,** França, v.58, n. 4, p. 331 -341, 2003.

CUCURULLO, G.; BERNARDI P.G; CARFAGNA, R.;PIERRO, V. IR temperature measurements in microwave heating**. Infrared Physics & Technology**, Itália, v.43, n.3-5, p. 145-150, jun. 2002.

DATTA, A.K.; NI, H., Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. **Journal of Food Engineering**, EstadosUnidos, v.51, n.4, p.355-364, 18 set. 2000.

DELGADO, A.E., RUBIOLO, A.C., GRIBAUDO, L.M. Effective Heat Capacity for Strawberry Freezing and Thawing Calculations. **Journal of Food Engineering**, Argentina, v.12, p.165-175, 14 mar 1990.

DEMIRKESEN, I.; SUMNU, G.; SAHIN, S.; UYSAL, N. Optimisation of formulations and infrared–microwave combination baking conditions of chestnut–rice

breads.**International Journal of Food Science & Technology,** Turquia, v.46, n.9, p. 1809-1815, 28 abr. 2011.

DINCOV, D.D.; PAROTT, K.A.; PERICLEOUS, K.A. Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating. **Journal of Food Engineering**, Inglaterra, v.65, n.3, p.403-412, fev. 2004.

DUARTE, R.F., PROM-U-THAI, C., AMARAL, D.C., FAQUIN, V., GUILHERME, L.R.G., REIS, A.R., ALVES, E. Determination of zinc in rice grains using DTZ staining and ImageJ software. **Journal of Cereal Science,** Lavras, v.68, p. 53-58, 1 dez 2015.

EGEA, M.B., REIS, M.H.M., DANESI, E.D.G. Aplicação de modelos matemáticos preditivos para o cálculo das propriedades termofísicas do palmito pupunha. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.17, n.2, p.179-187, 2015.

FASINA, O. O. Thermophysical properties of sweetpotato puree at freezing and refrigeration temperatures. **International Journal of Food Properties**, v. 8, n. 1, p. 151-160, 2005.

FAHLOUL, D.; TRYSTRAM, G.; McFARLANE, I.; DUQUENOY, A. Measurements and Predictive Modelling of Heat Fluxes in Continuous Baking Ovens**. Journal of Food Engineering,** França, v.26, n.4, p.469-479, 1 nov. 1994.

FERREIRA, S.M.R. OLIVEIRA, P.V., PRETTO, V. Parâmetro de qualidade do pão francês. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**. Curitiba, v.19, n.2, p. 301-318, dez. 2001.

FRACTUM. Módulo RF U-BEE Protocolo IEEE 802.15.4 REV 01. 2013. Disponível em: <http://www.fractumrf.com/manuais/UBEE_datasheet.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2013.

FRICK, B.A., BECKER, B.R. Evaluation of Thermophysical Properties Models for food. **Hvac & R Research**, Missouri, v. 7, n. 4, p. 301-330, out. 2001.

GHANZALA, S.; RAMASWAMY, H.S.; SMITH, J.P.; SIMPSON, M.V. Thermal process simulations for sous vide processing of fish and meat foods. **Canadian Institute of Food Science and Technology,** Canada, v. 28, n. 2, p. 117-122, 1995.

GONZO, E.E. Estimation correlations for the effective thermal conductivity of granular materials. **Chemical Engineering Journal,** v. 90, p. 299-302, 2002.

GOWEN, A.A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave–hot-air drying. **Innovative Food Science and Emerging Technologies,** Irlanda, v.9, n.1, p.129-137, 30 jun. 2007.

GUNASEKARAN, S. Computer vision technology for food quality assurance. **Trends in Food Quality and Technology**, Estados Unidos, v. 7, n.8, p.245-255, ago. 1996.

HANDAMI, N., MONTEAU, J. Y., LE BAIL, A. Thermophysical properties evolution of French partly baked bread during freezing. **Food Research International,** Ira, v. 37, n. 7, p. 703-713, 26 fev 2004.

HAYAKAWA, K., HWANG, P.S. Apparent thermophysical constant for thermal and mass exchange of cookies underground commercial baking. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie,** v.36, p.336-345, 1981.

HERRÁN, J., FERNANDÉS, I., OCHOTECO, E., CABAÑERO, G., GRANDE, H. The role of wáter vapour in ZnO nanostructures for humidity sensing at room temperature. **Sensors and actuors B: Chemical**, Espanha, v.198, p. 239-242, 21 mar. 2014.

HERRÁN, J., FERNÁNDEZ, I., TENA-ZAERA, R., OCHOTECO, E., CABAÑERO, G., GRANDE, H. Schottky diodes based on electrodeposited ZnO nanorod arrays for humidity sensing at room temperature. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Espanha, v. 174, p. 274-278, 11 ago 2012.

HILL, M.J., MARCHANT, T.R. Modelling Microwave Heating. **Applied Math Modelling**, Estados Unidos, v. 20, n.1, p.1-15, jan.1994.

IGATHINATHANE, I., PORDESIMO, L.O., BATCHELOR, W.D. Major orthogonal dimensions measurement of food grains by machine vision using ImageJ. **Journal of Cereal Science,** Mississippi, v. 42, p. 76-84, 25 ago 2008.

KAISER, V.A. Modelling and simulation of a multi-zone oven band. **Food Technology**, v.25, p.52-53, 1974.

KANTRONG, H.; TANSAKUL, A. MITTAL,G.S. Drying characteristics and quality of shiitakemushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. **Journal of Food Science and Technology**, Índia, 30 out. 2012.

KHATIR, Z.; PATON, J.; THOMPSON, H.; KAPUR, N.; TOROPOV, V.; LAWES, M.; KIRK, D. Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven. **Applied Energy,** Inglaterra, v.89, n.1, p.89-96, 11 mar. 2011.

KHATIR, Z.; PATON, J.; THOMPSON, H.; KAPUR, N.; TOROPOV, V. Optimisation of the energy efficiency of bread-baking ovens using a combined experimental and computational approach. **Applied Energy**, Inglaterra, v. 112, p. 918-927, 13 mar. 2013.

KESKIN, S.O.; SUMMU, G.; SAHIN, S. Bread baking in halogen lamp–microwave combination oven. **Food Research International**, Turquia, v. 37, n.5, p. 489-495, 10 out. 2003.

KIZILTAS, S.; ERDOGDU, F.; PALAZOGLU, T.K. Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. **Journal of Food Engineering**, Turquia, v.9, p.449-457, 4 nov. 2009.

KOHL, D.; HEINERT,L.; BOCKA,J.; HOFMANNB,T.; SCHIEBERLE,P. Gas sensors for food aroma during baking and roasting processes based on selective odorant measurements by an array (HRCG/SOMMSA).**Thin Solid Films,** Alemanha,v.391, n.2, p. 303-307, 2001.

KOWALSKI, S.J.; RAJEWSKA, K. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation.**Drying Technology: An International Journal**, Polônia, v.27, n.7-8, p. 878-887, 17 ago. 2009.

JIANGMIAO, Z.; ZHIXIN, L.; YING, W. Simulation of Electric Field Distribution in Concrete of Pulse Electro-Osmosis Technology Based on ANSYS *Software*. **Applied Mechanics and Materials**, China, v.353-356, p. 1287-1292, 8 ago. 2013.

JURY, V., MONTEAU, J.Y., COMITI, J., LE-BAIL, A. Determination and prediction of thermal conductivity of frozen part baked bread during thawning and baking. **Food Research International,** França, v.40, p. 874-882, 27 fev 2007.

LEWIS, E.; SHERIDAN, C.; O`FARRELL, N.; FLANAGAN, C.; KERRY, J.F.; JACKMAN, N. Optical fibre sensors for assessing food quality in full scale production ovens — a principal component analysis and artificial neural network based approach. **Nonlinear Analysis: Hybrid Systems,** Irlanda, v.2, n.1, p. 51-57, 2 mai. 2006.

LITOVCHENKO, I. The study of baking ovens by computer simulation. **Food Technology,** Kiev, v.17, n.2, p. 107-114, 2013.

LIU, H.; MA, X.; LI, L.; HU, Z.; GUO, P.; JIANG, Y.The catalytic pyrolysis of food waste by microwave heating. **Bioresource Technology,** China, v. 166, p. 45-50, 19 mai. 2014b.

LIU, S., FUKUOKA, M., SAKAI, N. A finite element model for simulating temperature distribuitions in rotating food during microwave heating. **Journal of Food Engineering**. Japão, v.115, p.49-62, 8 out 2012.

LIU, S.; OGIWARA, Y.; FUKUOKA, M.; SAKAI, N. Investigation and modeling of temperature changes in food heatedin a flatbed microwave oven.**Journal of Food Engineering,** Japão, v.131, p.142-156, 2 fev. 2014a.

MANDALA, I.G. Physical properties of fresh and frozen stored, microwave-reheated breads, containing hydrocolloids. **Journal of Food Engineering**, Grécia, v.66, n.3, p.291-300, 14 mar. 2004.

MARCOTTE, M., TAHERIAN, A.L., KARIMI, Y. Thermophysical Properties of processed meat and poultry products. **Journal of Food Engineering,** Quebec, v. 88, p. 315-322, 10 mar 2008.

MATUDA, T.G., FILHO, P.A., TADINI, C.C. Experimental data and modeling of the thermodynamic poperties of bread dough at refrigeration and freezing temperatures. **Journal of Cereal Science,** São Paulo, v. 53, p.126-132, 2 nov 2010.

MONDACA,R.A.L.; GALVEZ, A.V.; MORAGA,N.O. Computational Simulation and Developments Applied to Food Thermal Processing. **Food Engineering Review**, Chile, v.3, n.3, p.121-125, 3 Nov. 2011.

NGADI, M. O., CHINNAN, M. S., MALLIKARJUAN, P. Enthalpy and heat capacity of fried shrimp at freezing and refrigeration temperatures. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 36, p. 75-81, 2003.

NORTON, T.; SUN, D.W. Computational fluid dynamics (CFD)—an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. **Trends in Food Science and Technology,** Irlanda, v.17, n.11, p.600-620, nov. 2006.

NURME, K., MERIVEE, E., MUST, A., SIBUL, I., MUZZI M, DI., GIULIO, A., WILLIAMS, I., TOOMING, E. Responses of the antennal bimodal hygroreceptor neurons to innocuous and noxious high temperatures in the carabid beetle, *Pterostichus oblongopunctatus*. **Journal of Insect Physiologist**, Itália, v.81, p.1-13, 20 jun 2015.

O`FARREL, M.; LEWIS, E.; FLANAGAN, E.; LYONS, W.B.; JACKMAN, N. Using a reflection-based optical fibre system and Neural Networks to evaluate the quality of food in a large-scale industrial oven. **Sensors and Actuators**, Irlanda, v.115, n.2-3, p. 424–433, 15 jun. 2004.

PACE, M.; BONIS, M.V.; MARRA, F.; RUOCCO, G. Characterization of a combination oven prototype: Effects of microwave exposure and enhanced convection to local temperature rise in a moist substrate. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Itália, v. 38, n.5, p. 557-564, 24 fev. 2011.

PAN, Z., SINGH, P.R. Physical and Thermal Properties of Ground Beef During Cooking. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie,** Estados Unidos, v. 34, p. 437-444, 22 jan 2001.

PATON, J; KHATIR, Z.; THOMPSON, H.; KAPUR, N.; TOROPOV, V. Thermal energy management in the bread baking industry using a system modeling approach**.** **Applied Energy Engineering**, Inglaterra, v. 53, n.2, p. 340-347, 29 mar. 2012.

PARDO, M.W.S.; MORENO, A.O.; ZARAGOZA, F.J.G.; MONDRAGÓN, H.N.; PÉREZ, J.J.C. Comparison of pound cake baked in a two cycle microwave-toaster oven and in conventional oven. **Food Science and Technology,** México, v. 46, n.1, p. 356-362, 29 ago. 2011.

PEREIRA, L.A.M. **Desenvolvimento de uma linha experimental em escala reduzida para produção de biscoitos utilizando uma rede de multi sensores com protocolo "ZIGBEE".** 2012.118f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2012.

PEREIRA, L.A.M.; PINTO,C.N.; PIZA, L.V., SILVA,A.C.S.; BARRON, U.G.; COSTA, E.J.X. A New Alternative Real-Time Method to Monitoring Dough Behavior during

Processing Using Wireless Sensor Technology. **International Journal of Food Engineering**, Brasil, v.9, n.4, p.505-509, 2013.

PEREIRA, L.A.M., PIZA, L.V., VICENTE, M., ARCE, A.I.C., SILVA, A.C.S., TECH, A.R.B., COSTA, E.J.X. Construção de um forno elétrico em escala piloto experimental usando instrumentação de sensores sem fio para a avaliação de alimentos assados. **Food and Bioproducts Processing**, Pirassununga, v.100, parte A, p.214-220, 13 jul 2016.

PERIS, M. GILABERT, L.E. On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: A review. **Analytica Chimica Acta**, Espanha, v.804, p.29-36, 27 set. 2013.

PERROT, N.; TRUSTRAM, G.; LE GUENNEC, D.; GUELY, F. Sensor Fusion for Real Time Quality Evaluation of Biscuit during Baking. Comparison between Bayesian and Fuzzy Approaches.**Journal of Food Engineering**, França, v.29, n.3-4, p.301-315, 6 jan. 1995.

PITCHAI, K.; CHEN, J.; BIRLA, S.; GONZALEZ, R.; JONES, D.; SUBBIAH, J.A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation. **Journal of Food Engineering,** Estados Unidos, v. 128, p. 60-71, 29 dez. 2013.

PLOTEOU, J.P.; NICOLAS, V.; GLOUANNEC, P. Numerical and experimental characterization of a batch bread baking oven**. Applied Thermal Engineering**, França, v. 48, p.289-295, 10 mai. 2012.

PURLIS, E. Bread baking: Technological considerations based on process modeling and simulation. **Journal of Food Engineering,** Argentina, v.103, n.1, p. 92-102, 28 out. 2010.

RESURRECCION JR, F.P.; TANG, J.; PEDROW, R.; LIU, F.; TANG, Z. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system. **Journal of Food Engineering**, Estados Unidos, v.118, n.4, p.406-416, 2 mai. 2013.

RICHARD, P.; DURANCE, T.D.; SANDBERG, G.M.M. A Computer Simulation of Thermal Sterilization of Canned Foods With Sub-Freezing Initial Temperatures. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal,** Canadá, v. 24, n. 1, p. 95-98, fev. 1991.

ROSINI, F., NASCENTES, C.C., NÓBREGA, J.A. Experimentos didáticos envolvendo radiação micro-ondas. **Química Nova**, São Carlos, v. 27, n. 6, p. 1012-1015, 15 abr. 2004.

SACKS, S.; CALAFAT, S.; NIERENBERG, D.; DALY, S.**Think.Eat.Save:** Reduce your foodprint. Disponível em: <http://www.thinkeatsave.org/index.php/partners/our-supporters>. Acesso em: 23 abr. 2013.

SAENGRAYAP, R.; TANSAKUL, A.; MITTAL, G.S. Effect of far-infrared radiation assisted microwave-vacuumdrying on drying characteristics and quality of red chilli. **Journal of Foods Science and Technology**, Índia, 1 abr. 2014.

SAKIN, M.; KAYMAK-ERTEKIN, F.; ILICALI, C. Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cupcake baking. **Journal of Food Engineering**, Turquia, v. 83, n.3, p.463-474, 10 abr. 2007.

SAVOYE, I., TRYSTRAM, G., DUQUENOY , A. P., MARCHIN, F. Heat and mass transfer dynamic modelling of an indirect biscuit baking tunnel-oven. Part I: Modelling principles. **Journal of Food Engineering,** v. 16, n. 3, p.173-196, 23 mai 1992.

SCHIRMER, M.; HUSSEIN, W.B.; JECKLE, M.; HUSSEIN, M.A.; BECKER, T. Impact of air humidity in industrial heating processes on selected quality attributes of bread rolls. **Journal of Food Engineering**, Alemanha, v.105, n.4, p.647-655, 29 mar. 2011.

SEYHUN, N.; RAMASWAMY, H.; SUMNU, G.; SAHIN, S.; AHMED, J. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree. **Journal of Food Engineering,** Turquia, v. 92, n.3, p. 339-344, 24 dez. 2008.

SHAUGHNESSY, B.M.; NEWBOROUGH, M. Energy performance of a low-emissivity electrically heated oven. **Applied Thermal Engineering,** v.20, n.9, p. 813-830, 30 jul 2000.

STANDING, C.N. Individual heat transfer modes in band oven biscuit baking. **Journal of Food Science,** v.39, n.2, p.267-271, mar 1974.

SOARES, D.S.C., SANTOS, J.T.S., CAMPOS, A.F.P., COSTA, F.S.C., NUNES; T.P., JÚNIOR, A.M.O. Avaliação do tempo de congelamento da mangaba (*Hancornia Speciosa Gomes*) em ultrafreezer através dos modelos matemáticos de Planck e Pham. **Scientia Plena,** Brasil, v. 8, n. 4, p.1-6, 2 mar 2012.

SOUSA JR, J.E.C., FONTAN, R.C.I., SAMPAIO, V.S., SILVA, W.S., BONOMO, R.C.F., VELOSO, C.M. Thermal Diffusivity and Specific Heat of Bovine Milk Affected by Temperature and Composition. **International Journal of Food Engineering,** Bahia, v. 8, n. 3, p.1-13, jan 2012.

SUMNU, G. DATTA, A.K.; SAHIN, S.; KESKIN, S.O.; RAKESH, V. Transport and related properties of breads baked using various heating modes. **Journal of Food Engineering,** Turquia, v. 78, n.4, p. 1382-1387, 28 fev. 2006.

SUMNU, G.; SAHIN, S.; SEVIMLI, M. Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes.**Journal of Food Engineering,** Turquia, v.71, n.2, p. 150-155, 8 dez. 2004.

TRYSTRAM, G.; FAHLOUL, D.; DUQUENOY, A.; ALLACHE, M. Dynamic Modelling and simulation of the biscuit baking oven process. In: European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2, França, p. 203-208, 1991.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W.; ADAMCZAK, T. Three-dimensional CFD modeling and simulation of the temperature profiles and air flow patterns during a continuous industrial baking process. **Journal of Food Engineering**, Austrália, v. 65, n.4, p.599-608, 18 fev. 2004.

TOCCI, A. M., FLORES, E. S. E. MASCHERONI, R. H. Enthalpy, heat capacity and thermal conductivity of boneless mutton between -40 and +40°C. **Lebensmittel - Wissenschaft und-Technologie**, v. 30, p.184-191, 1997.

UNITED STATES DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Nutrient data base for standard reference.** Whashington DC: USDA, 1996.

UNITED STATES DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Ground beef and food safety.** Whashington DC: USDA, 2016.

UYSAL, N.; SUMNU, G.; SAHIN, S. Optimization of microwave–infrared roasting of hazelnut. **Journal of Food Engineering,** Turquia, v.90, n.2, p.255-261, 29 jun. 2008.

VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, L.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, F.L. LINSEC - Programa computacional para modelagem e simulação de sistemas de secagem de grãos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 664-673, out. 2012.

VALVERDE, J., THIS, H., VIGNOLLE, M. Quantitative determination of photosynthetic pigments in green beans using thin-layer chromatography and a flatbed scanner as densitometer. **Journal of Chemical Education**, Paris, v. 84, n. 9, p.1505-1507, set. 2007.

WANG, D. Q., KOLBE, E. Thermal properties of surimi analyzed using DSC**. Journal of Food Science**, v. 56, n. 2, p. 302-308, mar 1991.

WANG, J., WANG, G.C., ZHANG, M.X., CHEN, M.Q., LI, D.M., MIN, F.F., CHEN, M.G., ZHANG, S.P., REN, Z.W., YAN, Y.A. A comparative study of thermolysis characteristics and kinetics of seaweeds and fir wood. **Process Biochemistry**, China, v. 41, n. 8, p.1883–1886, 2006a.

WANG, S., JIANG, X. M., WANG, Q., JI, H. S., WU, L. F., WANG, J. F. , XU, S. N. Research of specific heat capacities of three large seaweed biomass. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapeste, v.115, p. 2071-2077, 17 abr 2013.

WANG, Z. P., JI, Q. X. Simulation of Rolling Resistance of Tire Based on ANSYS, **Advanced Materials Research**, China, v. 156-157, p. 592-595, 27 out. 2010.

WANG, Z.; WU,H.; ZHAO,G.; LIAO,X.; CHEN, F.; WU, J.; HU,X. One-dimensional finite-difference modeling on temperature history and freezing time of individual food. **Journal of Food Engineering,** China, v.79, n.2, p.502-510, 29 mar. 2006b.

XANTHAKIS, E.; BAIL, A.L.; RAMASWAMY, H. Development of an innovative microwave assisted food freezing process.**Innovative Food Science and Emerging Technologies,** França, p. 1-6, 29 abr. 2014.

ZAREIFARD, M.R.; BOISSONNEAULT, V.; MARCOTTE, M. Bakery product characteristics as influenced by convection heat flux. **Food Research International**, Canadá, v.42, n.7, p.856-864, 17 mar. 2009.

ZHANG, Y.; PULLIAINEN, J.; KOPONEN, S.; HALLIKAINEN, M. Water quality studies of combined optical, thermal infrared, and microwave remote sensing. **Microwave and optical technology letters,** Finlândia, v. 34, n. 4, p. 281-285, 20 ago. 2002.

ZINET, O.; LEVENT, B.A. Modification of a House hold Microwave Oven For Continuous Temperature and Weight Measurements During Drying of Foods, **International Microwave Power Institute**, 2000.

ANEXO 1

FOOD AND BIOPRODUCTS PROCESSING 100 (2016) 214–220

Contents lists available at ScienceDirect

Food and Bioproducts Processing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/fbp

Construction of an experimental pilot-scale electric oven using wireless sensor instrumentation for baked food evaluation

Luiz Arthur Malta Pereira[a,e], *Luciana Vieira Piza*[b,e], *Max Vicente*[c,e], *Aldo Ivan Céspedes Arce*[b,e], *Ana Carolina de Sousa Silva*[d,e], *Adriano Rogério Bruno Tech*[d,e,f], *Ernane José Xavier Costa*[d,e,f]

[a] *University Anhanguera, Brazil*
[b] *Food Engineering, University of São Paulo, Brazil*
[c] *University José Eduardo dos Santos, Angola*
[d] *University of São Paulo, Brazil*
[e] *Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga, SP, Brazil*
[f] *Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, Brazil*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 27 August 2015
Received in revised form 6 July 2016
Accepted 13 July 2016
Available online 22 July 2016

Keywords:
Industrial automation
Control system
Electronic properties
Food image
Biphasic food
Digital signal processing

ABSTRACT

This work aims at the development of a pilot-scale electric oven to test the possibility of evaluating baked food propriety by using a wireless sensor network. The experiment was realized in the Faculty of Animal Science and Food Engineering where the technologies will enable new possibilities to analyze baked food improvements. To test the oven developed, an experimental setup with traditional Brazilian baked food was investigated. The food investigated was biphasic; it consisted of a filler surrounded by flour-based dough. An image of the biphasic food was acquired to control the oven temperature and belt velocity during the baking process and then to check whether the baking had been carried out correctly. In addition, the temperature inside the filler was monitored using an encapsulated wireless system. The experimental setup developed was able to demonstrate how digital images and filler temperatures could be used to control the oven temperature and belt velocity within the pilot-scale oven.

© 2016 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

To add technology to Brazilian food manufacturing, it will be necessary to invest in interdisciplinary scientific research in order to understand factors that affects the quality of baked products. The economic value of the products produced is associated with their acceptance in the market. Thus, it is necessary to understand the factors that affect the quality of a baked product such as food color that is directly related to the heat transfer and convection occurring in the oven (Shibukawa et al., 1989), firmness that is related to the oven temperature profile, structure (Patel et al., 2005), airflow (Therdthai et al., 2002) and moisture content (Zareifard et al., 2009) that can affect the dynamics of convection and radiation heat transfer and hence the way in which oven characteristic act on the baked food proprieties.

The international standardization, with respect to food products increasingly focuses on control of quality even before

E-mail addresses: arthur.pereira@usp.br (L.A.M. Pereira), luciana.piza@usp.br (L.V. Piza), maxvicente@usp.br (M. Vicente), acaid@usp.br (A.I.C. Arce), anac_ss@yahoo.com.br (A.C.d.S. Silva), adriano.tech@usp.br (A.R.B. Tech), ernane@usp.br (E.J.X. Costa).
http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.004
0960-3085/© 2016 Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.