



Álvaro Teixeira de Vasconcelos Fonseca

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**ANÁLISE DE UM FORNO DE LASTRO
ADAPTADO COM TERMOSSIFÕES DE
NAFTALENO**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil,
FCT-UNL

Co-orientadora: Doutora Márcia Barbosa Henriques
Mantelli, UFSC

Presidente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias
Co-orientadora: Prof. Doutora Márcia Barbosa Henriques Mantelli
Arguente: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz

Copyright

A Faculdade de Ciências e tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço aos meus Pais por me terem sempre apoiado em todos os aspectos ao longo do percurso académico, especialmente durante a minha estadia em terras de Vera Cruz, onde me proporcionaram todas as condições necessárias assim como toda a confiança que sempre depositaram em mim.

À Professora Márcia Mantelli pela oportunidade, confiança e apoio que sempre me deu ao longo do desenvolvimento do trabalho. Mostrou sempre interesse e disponibilidade, apesar do tempo ter sido um recurso escasso.

Ao Professor Luis Gil por todo o apoio que me deu na elaboração do trabalho. Mostrou sempre compreensão e disponibilidade, tendo dado conselhos fundamentais para a elaboração do mesmo.

Aos meus amigos e camaradas Pedro Silveira, Luis Cisterna e Leandro Setúbal pela disponibilidade que sempre tiveram em me ajudar.

À minha querida Carolina Corseuil e seus Pais, Professores Henry e Anelise Corseuil pelos importantes conselhos e por todo o apoio que me deram durante este período.

Por ultimo agradeço às Universidades Nova de Lisboa (FCT) e Federal de Santa Catarina (UFSC) e a todos os meus amigos que estiveram presentes durante esta longa jornada.

Resumo

A eficiência energética de processos industriais é, neste momento, uma das principais áreas de atuação da ciência da engenharia. A utilização racional de fontes primárias de energia vai de encontro à necessidade de preservar a natureza. Neste sentido, e com o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, alternativas aos fornos elétricos e a gás convencionais vêm surgindo no mercado. A aplicação destas tecnologias permite otimizar processos que levam a uma maior padronização de produtos reduzindo o consumo energético. Nesse sentido, o Laboratório de tubos de calor (LABTUCAL) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), vem desenvolvendo pesquisas em tubos de calor e termossifões com vista à otimização térmica de equipamentos industriais. Termossifões são dispositivos de transporte de calor de grande eficiência, pois utilizam o calor latente de vaporização e condensação do fluido de trabalho, proporcionando uma temperatura uniforme no forno e um rápido aquecimento devido à sua excelente condutividade térmica. Estudos teóricos e experimentais mostram que os fornos adaptados com termossifões apresentam performances térmicas superiores e uma maior homogeneidade de temperaturas comparativamente aos fornos encontrados no mercado.

O principal objetivo desta dissertação é aplicar termossifões num forno de lastro a gás convencional para operar a temperaturas na ordem dos 300°C. A temperatura requerida é para confeccionar pasteis de nata, doce típico Português. Pretende-se analisar o desempenho térmico do forno antes e depois da implementação da tecnologia. Serão utilizados pasteis de nata como corpo de prova para que se possa estabelecer um termo de comparação.

Palavras-chave: forno de cocção, termossifões em árvore, naftaleno, pasteis de nata

Abstract

The energy efficiency of industrial processes is currently one of the main business areas of engineering science. The rational use of primary energy resources meets the need to preserve nature. With technological energy reduction development, different types of economic and ecological ovens, which replace the wood and electric ballast as energy sources, are being released in the market. The application of these technologies allows optimizing processes that lead to greater standardization of products reducing energy consumption. In this sense, the heat pipes Laboratory (LABTUCAL) of the Federal University of Santa Catarina (UFSC), has been developing research on heat pipes and thermosyphon for the thermal optimization of industrial equipment. Thermosyphons are high thermal conductivity devices because they use the latent heat of vaporization and condensation of the working fluid, providing a uniform temperature in the furnace and rapid heating due to its excellent thermal conductivity. Theoretical and experimental studies show that the furnace fitted with thermosyphons have higher thermal performance and greater homogeneity compared to the ovens in market.

The main objective of this thesis is to apply thermosyphons in a conventional gas ballast oven to operate at temperatures of around 300°C. This temperature is required for making Portuguese custard tarts, typical sweets from Portugal. We intend to analyze the thermal performance of the oven before and after the implementation of the technology. Portuguese custard tarts will be used as specimen so that we can establish a comparison.

Keywords: baking oven, tree type thermosyphon, naphthalene, Portuguese custard tart

Índice

Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XVI
Lista de Símbolos, Siglas ou Abreviaturas.....	XVII
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Termossifão Bifásico	4
2.2 Resistência térmica de um termossifão	6
2.3 Limites de Operação	8
2.4 Termossifões em Árvore	8
2.5 Termossifões aplicados em fornos.....	9
2.6 Fluidos de trabalho	11
2.7 Naftaleno: Propriedades Termofísicas.....	13
2.8 Viabilidade da utilização do Naftaleno como fluido de trabalho	15
2.9 Início de operação de um termossifão de naftaleno (<i>“Start-up”</i>)	16
2.10 Gases não condensáveis	17
3 Modelo Experimental	21
3.1 Construção/Adaptação do forno.....	21
3.2 Construção dos termossifões.....	25
3.3 Carregamento dos termossifões	28
3.4 Sistema de aquisição de temperaturas	30
3.5 Otimização térmica dos termossifões	32
3.5.1 1º Fator de carregamento de Naftaleno: 50%.....	32
3.5.2 2º Fator de carregamento de Naftaleno: 75%.....	34
4 Metodologia Experimental e Resultados Obtidos	38
4.1 Forno na configuração original.....	38
4.2 Forno na configuração final.....	42
4.2.1 Forno sem carga	42

4.2.2	Forno carregado	45
5	Conclusões e Sugestões	51
6	Referências Bibliográficas.....	53

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de funcionamento de um (a) termossifão (b) tubo de calor [1]	4
Figura 2.2 - Efeito do tipo de escoamento e o tipo de fluido no coeficiente de transferência de calor [4].....	5
Figura 2.3 - Princípio de funcionamento de termossifões (a) verticais (b) inclinados [1]	6
Figura 2.4 - Circuito elétrico equivalente de um termossifão [1].....	7
Figura 2.5 - Esquema da configuração de termossifões em árvore [9]	9
Figura 2.6 - Esquema de forno de cocção de pães assistido por termossifões em árvore (Mantelli, 2012) [1].....	10
Figura 2.7 - Distribuição de temperaturas na câmara de cocção de um forno (a) convencional (b) assistido por termossifões (Mantelli, 2012) [1]	10
Figura 2.8 - (a) Esquema de um forno de esteira assistido por termossifões (b) Geometria dos termossifões em árvore utilizados [1].....	11
Figura 2.9 - Distribuição de temperatura no interior do forno de esteira [1]	11
Figura 2.10 - Alguns fluidos de trabalho típicos para a faixa de temperatura de operação [13]	12
Figura 2.11 - Pressão de vapor versus temperatura do naftaleno e água [8]	14
Figura 2.12 - (a) Efeito “slug flow” devido à baixa potência fornecida na região do evaporador do termossifão. (b) Recristalização do naftaleno na região do condensador do termossifão [10]	15
Figura 2.13 - Naftaleno recristalizado na região superior do condensador [10]	16
Figura 2.14 - Esquema de um termossifão com gases não-condensáveis [8]	17
Figura 2.15 - Modelo experimental construído [8].....	18
Figura 2.16 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do fundo do evaporador para quatro condições: (a) termossifão sem argônio (b) termossifão com 2 bar de argônio (c) termossifão com 3 bar de argônio (d) termossifão com 11 bar de argônio [8]	19
Figura 2.17 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do início do evaporador para o termossifão (a) antes da purga inicial (b) após a purga inicial [8]	20
Figura 3.1 - Forno de lastro da Progás	21
Figura 3.2 - (a) Detalhe dos queimadores originais do forno (b) Lastro de tijolos refratários	22
Figura 3.3 - (a) Estrutura de suporte do forno (b) camara de cocção.....	22
Figura 3.4 - (a) Rasgos na chapa lateral onde entram os termossifões (b) Estrutura construída para suportar as árvores e os queimadores	22
Figura 3.5 - (a) queimadores fixados na estrutura construída (b) queimador em operação	23
Figura 3.6 - (a) Queimadores originais utilizados para o “start-up” (b) Rasgos na chapa inferior do forno	23
Figura 3.7 - (a) chapa inferior deslizante na posição 1 (b) chapa inferior fixada	24
Figura 3.8 - (a) chapa inferior deslizante na posição 2 (b) chapa inferior fixada	24
Figura 3.9 - Projeto dos termossifões do tipo árvore construídos	25
Figura 3.10 - (a) corte dos tubos (b) calandragem dos tubos condensadores	26

Figura 3.11 - (a) esmagamento da ponta dos condensadores com a prensa hidráulica (b) Carga aplicada na prensa hidráulica.....	26
Figura 3.12 - (a) Detalhe do esmagamento obtido (b) corte do excesso de material com a máquina de soldar TIG (tugstein inert gas)	27
Figura 3.13 - (a) Nivelamento dos termossifões (b) detalhe da barra em L utilizada para o nivelamento dos tubos	27
Figura 3.14 - Projeto do forno implementado com a tecnologia de termossifões em árvore	28
Figura 3.15 - (a) Equipamento para detetar vazamentos (Leak Detector Spectron 5000 Edwards ®) (b) Detalhe do tubo umbilical ligado ao tubo de sucção do equipamento	29
Figura 3.16 - Etapas do procedimento de selagem do tubo [1]	29
Figura 3.17 - Posicionamento dos termopares no interior da câmara de cocção (malha A e B)	30
Figura 3.18 - Posicionamento dos termopares nas malhas (a) A, inferior e (b) B, superior.....	30
Figura 3.19 - Localização e denominação dos termopares na árvore A	31
Figura 3.20 - Localização e denominação dos termopares na árvore B	31
Figura 3.21 - Exemplo da distribuição de temperaturas obtida pelo programa desenvolvido....	32
Figura 3.22 - Distribuição de temperaturas nos termossifões (a) inclinados a 10° (b) inclinados a 2°	33
Figura 3.23 - Disposição dos termopares na árvore A.....	33
Figura 3.24 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador ao condensador.....	34
Figura 3.25 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A para uma baixa potência térmica fornecida.....	35
Figura 3.26 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A para uma alta potência térmica fornecida	36
Figura 3.27 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore B (potência superior).....	37
Figura 4.1 - Evolução temporal da temperatura interna do forno	39
Figura 4.2 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno	40
Figura 4.3 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção no instante t=3000s	40
Figura 4.4 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção no instante t=4200s	41
Figura 4.5 - (a) Disposição dos pastéis nos tabuleiros (b) Resultado obtido	41
Figura 4.6 - Evolução temporal da temperatura interna do forno	42
Figura 4.7 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno	43
Figura 4.8 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A (t=3000s).....	44
Figura 4.9 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore (t=3000s).....	44
Figura 4.10 - Distribuição de temperatura interna do forno (t=3000s).....	45
Figura 4.11 - Detalhe dos queimadores em operação a baixa potência (a) originais (b) na câmara de combustão.....	46

Figura 4.12 - Detalhe dos queimadores em operação a alta potência (a) originais (b) na câmara de combustão	46
Figura 4.13 - Evolução temporal da temperatura interna do forno	47
Figura 4.14 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno	47
Figura 4.15 - Temperatura da parede externa dos termossifões em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A no meio do processo de confecção (t=3110 s)48	
Figura 4.16 - Temperatura da parede externa dos termossifões em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore B no meio do processo de confecção (t=3110 s)49	
Figura 4.17 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção a meio do processo de confecção (t=3110 s).....	49
Figura 4.18 - (a) Disposição dos pastéis nos tabuleiros (b) Resultado obtido (configuração final do forno)	50

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades termofísicas da água, naftaleno e mercúrio [14]	13
Tabela 2.2 - Propriedades termofísicas do naftaleno [16-18]	14
Tabela 3.1 - Dimensões dos tubos utilizados	25

Lista de Símbolos, Siglas ou Abreviaturas

Símbolos Romanos

C - Condutância térmica

$C_{10}H_8$ - Fórmula química do naftaleno

g - Aceleração da gravidade

h - Coeficiente de transferência de calor

L - Comprimento do termossifão

$L_{efetivo}$ - Comprimento efetivamente útil do termossifão

Q - Taxa de calor

\dot{Q}_{in} - Potência térmica de entrada

\dot{Q}_{out} - Potência térmica de saída

R - Resistência térmica

\overline{T}_c - Temperatura média do condensador

\overline{T}_e - Temperatura média do evaporador

T_{eb} - Temperatura de ebulição

Abreviaturas e Siglas

GLP - Gás liquefeito de petróleo

LABTUCAL – Laboratório de tubos de calor

MATLAB – *Matrix Laboratory*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

1 Introdução

Neste capítulo, começo por apresentar a motivação que me levou à execução da dissertação. Em seguida são apresentados os objetivos e a estrutura da mesma.

1.1 Motivação

Durante a minha estadia como intercâmbista na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tive a oportunidade de integrar num projeto que consistiu inicialmente na produção e comercialização do famoso doce típico Português, pastel de nata (ou de Belém).

O pastel de nata tem algumas características particulares, nomeadamente a sua confecção que necessita de elevadas temperaturas para a obtenção de bons resultados. Em Portugal, onde este doce é fabricado e comercializado no País inteiro, foram desenvolvidos fornos especiais que atingem temperaturas até 400°C.

Ao longo do nosso crescimento como empresa, sempre sentimos esta dificuldade da confecção dos pasteis de nata com os fornos utilizados. Inicialmente, utilizámos um pequeno forno elétrico doméstico, onde para conseguirmos obter bons resultados tínhamos de confeccionar poucos pasteis por fornada para que a confecção fosse feita a uma temperatura superior. Numa fase posterior, onde tivemos a oportunidade de estabelecer uma parceria com uma empresa de massas congeladas, utilizámos um forno de lastro a gás, que será utilizado neste trabalho, que revelou sempre grandes problemas devido à falta de potência térmica e à heterogeneidade de temperatura.

Com a envolvimento no projeto a ser cada vez maior, senti a necessidade de elaborar uma Dissertação que de certa forma tivesse relacionada com o projeto que estava envolvido. Nesse sentido, e por conhecer a linha de pesquisa da UFSC na área de fornos para o setor alimentar, achei interessante falar com a Professora Márcia, com a qual tive o prazer de cursar a disciplina Transmissão de Calor e onde após uma conversa sobre as minhas pretensões foi-me dada a oportunidade de utilizar esse mesmo forno implementando termossifões, tecnologia que a Universidade tem vindo a desenvolver ao longo dos anos.

Surgiu assim então a oportunidade de aplicar esta tecnologia no forno de lastro a gás.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é implementar termossifões carregados de naftaleno como fluido de trabalho num forno de lastro a gás convencional. Nesse sentido, realizaram-se vários testes para analisar o desempenho térmico dos termossifões sujeitos a diferentes condições de operação com vista à otimização térmica dos mesmos.

Para a execução do trabalho, constam os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento térmico do forno na configuração original, utilizando pastéis de nata como corpo de prova.
- Executar as devidas alterações no forno para que seja possível a implementação dos termossifões.
- Projetar, produzir e carregar os termossifões com naftaleno.
- Analisar o comportamento térmico dos termossifões sujeitos a diferentes condições de operação: fator de carregamento de naftaleno, potências térmicas fornecidas na região dos evaporadores e diferentes inclinações dos tubos no interior da câmara de cocção.
- Analisar o comportamento térmico do forno com os termossifões aplicados, utilizando pastéis de nata como corpo de prova.
- Análise comparativa de desempenho entre a configuração original e a configuração final obtida.

1.3 Estrutura da Dissertação

No **Capítulo 1** apresenta-se a motivação, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O **Capítulo 2** é dedicado à revisão bibliográfica. Inicialmente são apresentados os termos bifásicos, sendo abordado o seu princípio de funcionamento e a teoria inerente. Em seguida é abordada a substância naftaleno e as suas características como fluido de trabalho. A revisão bibliográfica termina com a temática dos gases não condensáveis e suas implicações no desempenho de termosifões.

No **Capítulo 3** é consagrado o modelo experimental. Inicialmente, descrevem-se as adaptações realizadas no forno para a implementação dos termosifões. Em seguida, são apresentadas as etapas da construção dos termosifões, assim como o seu carregamento. Por fim, são descritos os ensaios experimentais realizados com vista à otimização térmica dos termosifões.

No **Capítulo 4** são apresentadas as metodologias adotadas e os resultados obtidos para o forno nas duas configurações: original e final. Em ambos os casos, são utilizados pastéis de nata como corpo de prova nos ensaios realizados.

No **Capítulo 5** apresentam-se as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

No **Capítulo 6** são apresentadas as referências bibliográficas.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que foi cuidadosamente feita para a execução do trabalho. Primeiramente são apresentados os termossifões bifásicos onde é abordado o seu princípio de funcionamento e suas características. Em seguida, apresenta-se o conceito de resistência térmica de termossifões que é comumente utilizada no projeto destes dispositivos. Em seguida é apresentada a configuração de termossifões do tipo árvore e suas aplicações em fornos. Por fim, apresenta-se o naftaleno, fluido de trabalho utilizado no interior dos termossifões, onde se apresenta as suas propriedades termofísicas e suas limitações como fluido de trabalho.

2.1 Termossifão Bifásico

Os termossifões são dispositivos transmissores de calor de grande condutância térmica que são classificados como um tipo de tubo de calor. Um tubo de calor ou “*heat pipe*” é um dispositivo bastante eficiente, capaz de transportar grandes quantidades de calor através de uma distância considerável quando submetido a pequenos gradientes de temperatura. Um tubo de calor ou termossifão consiste num tubo de metal evacuado e selado nas pontas onde é parcialmente preenchido com um volume de fluido de trabalho que, em condições normais de operação, se encontra saturado com a fase líquida e gasosa. Os processos de mudança de fase fornecem uma grande quantidade de energia térmica e por isso possibilitam que os tubos de calor e termossifões transferiram elevadas taxas de calor. A figura 2.1 apresenta os esquemas de funcionamento de um termossifão e de um tubo de calor convencionais, onde teoricamente possuem três regiões distintas: evaporador, seção adiabática e condensador. (MANTELLI, 2012) [1]

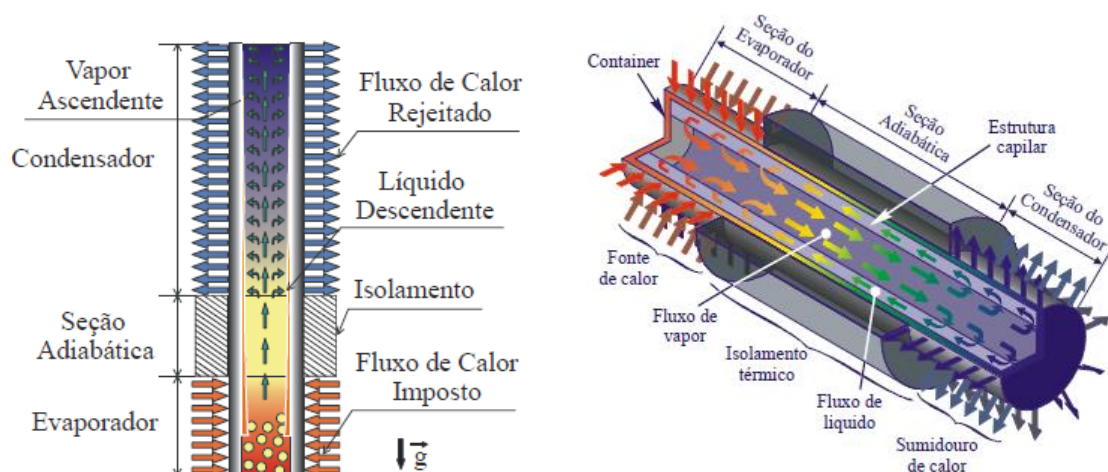


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento de um (a) termossifão (b) tubo de calor [1]

Os tubos de calor apresentam uma estrutura capilar interna onde o fluido condensado retorna ao evaporador por meio de forças de capilaridade. Devido à sua estrutura interna, os

tubos de calor podem operar em qualquer posição, inclusive em ambientes sem gravidade, o que os torna dispositivos importantes para a indústria espacial. (PIORO e PIORO, 1997) [2].

Os termosifões são tubos de calor que se caracterizam pela ausência da estrutura capilar interna. Nestes, o fluido condensado formado no condensador escorre pela parede interna do tubo pela ação da força da gravidade, sendo por isso necessário o evaporador estar abaixo do condensador. O processo de fabricação de termosifões é mais simples e barato comparativamente com os tubos de calor convencionais, sendo por isso mais atrativos para a indústria. (PIORO e PIORO, 1997) [2]. São dispositivos de condutividade térmica muito elevada, apresentando uma eficiência na troca de calor de 500 a 1000 vezes superior quando comparados a tubos de cobre maciços da mesma geometria (KOSOY, 2004) [3]. A resistência térmica ao fluxo de calor entre evaporador e condensador é muito pequena, fazendo com que a diferença de temperaturas entre estas regiões possa ser mínima. Desta forma, estes dispositivos podem ser utilizados como homogeneizadores de temperatura. (MANTELLI, 2012) [1]. Como o evaporador e o condensador operam de forma independente, pode haver uma grande flexibilidade na geometria, na distância entre o evaporador e o condensador e nas suas áreas de troca de calor. A possibilidade de operar em diversos níveis de temperatura torna-os ainda mais flexíveis.

A alta condutância térmica desses dispositivos está diretamente ligada aos altos coeficientes de convecção dos fluídos em condições de ebulição e de condensação. O gráfico da figura 2.2 ilustra o efeito do tipo de escoamento e do tipo de fluído no coeficiente de transferência de calor, para diversos fluidos sujeitos a diferentes condições. (BEJAN et al., 1996) [4]. Observa-se que os processos de ebulição de líquidos, condensação da água e dos vapores orgânicos são, de maneira geral, os processos de transferência de calor que atingem os maiores coeficientes de convecção, sendo apenas superados pelos coeficientes obtidos com os metais líquidos.

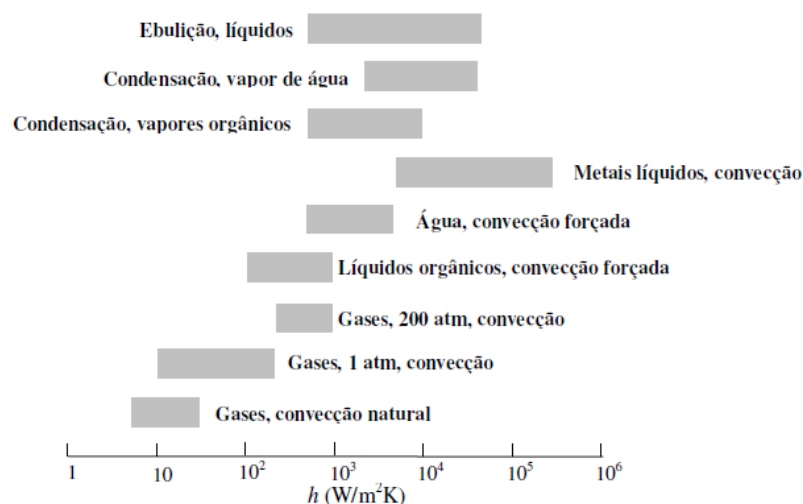


Figura 2.2 - Efeito do tipo de escoamento e o tipo de fluído no coeficiente de transferência de calor [4]

O princípio de funcionamento de um termosifão bifásico resume-se da seguinte forma: grande parte do fluido de trabalho encontra-se concentrado na região do evaporador onde recebe

calor externo de uma fonte térmica e vaporiza internamente; por diferença de pressão, o vapor gerado é conduzido em direção à parte superior do tubo (condensador); nessa região o sistema perde calor para o ambiente e o vapor sofre condensação; Para finalizar o ciclo, o vapor retorna ao evaporador pela força da gravidade. Esse processo, ilustrado na figura 2.3, ocorre ciclicamente transferindo calor da região do evaporador para a região do condensador. Nesse sistema, a pressão do vapor no evaporador e no condensador é praticamente constante, sendo o processo aproximadamente isotérmico. (PIORO e PIORO, 2007) [2]

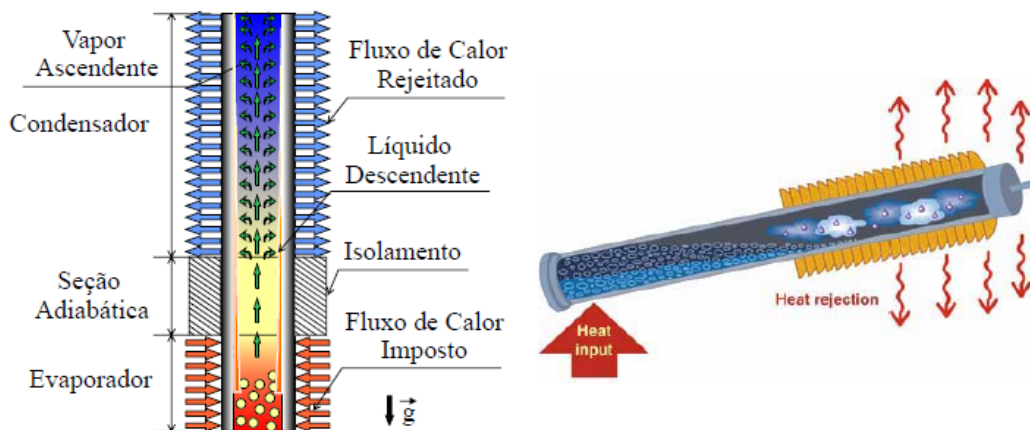


Figura 2.3 - Princípio de funcionamento de termossifões (a) verticais (b) inclinados [1]

2.2 Resistência térmica de um termossifão

Para caracterizar a capacidade de transmissão de calor de um termossifão é utilizado o conceito de condutância térmica que é a razão entre a carga térmica [W] e a diferença de temperaturas [°C] entre o evaporador e o condensador em regime permanente. O inverso da condutância térmica é a resistência térmica de acordo com:

$$C = R^{-1} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.2.1)$$

A resistência térmica de um termossifão representa a dificuldade/facilidade que o dispositivo tem em transportar calor. Quanto maior a resistência térmica global de um termossifão, maior será a dificuldade do sistema em transportar calor. Pode ser definida de acordo com a seguinte expressão: (MANTELLI, 2006) [5]

$$R = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{Q} \quad (2.2.2)$$

Onde \bar{T}_e e \bar{T}_c representam as temperaturas médias do evaporador e do condensador, respectivamente e Q [W] a potência térmica transferida.

De acordo com (MANTELLI et al., 1999) [6], a resistência térmica total em regime permanente de um termosifão bifásico pode ser modelada a partir da analogia entre circuitos térmicos e elétricos, como mostra a figura 2.4. Na figura, R_1 e R_9 estão relacionadas com as fontes externas quente e fria. As resistências térmicas R_2 , R_8 e R_{10} estão relacionadas com a transferência de calor pela parede do tubo, as duas primeiras na direção axial e a terceira longitudinalmente; R_3 está relacionada com a evaporação e tem duas regiões: a resistência da piscina de fluido acumulado no evaporador e o filme líquido na parede; R_4 e R_6 são as resistências térmicas associadas à interface líquido-vapor para o evaporador e do condensador respectivamente, usualmente desprezáveis. Finalmente, R_5 é a resistência térmica associada ao vapor ascendente dentro do tubo. As resistências associadas aos fenômenos de condensação e evaporação são determinadas de forma clássica. (INCROPERA E DEWITT, 1993) [7]

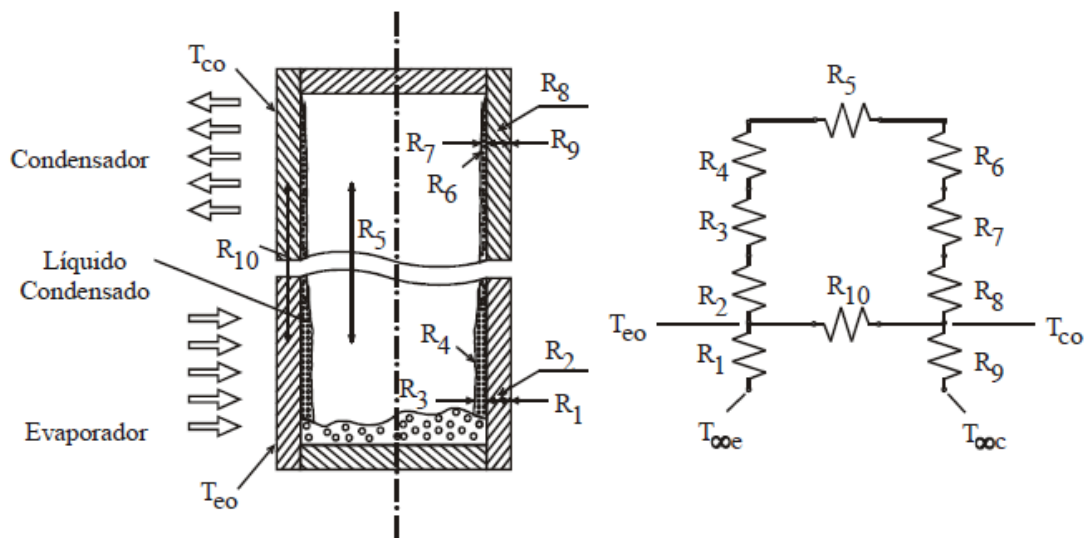


Figura 2.4 - Circuito elétrico equivalente de um termosifão [1]

(ANGELO, 2007) [8], baseando-se nas correlações presentes na literatura (INCROPERA E DE WITT) [7], verificou que a resistência de condução longitudinal de um termosifão convencional, (R_{10}), é cerca de mil vezes maior do que as resistências através do fluido de trabalho. Consequentemente apenas uma parcela residual da taxa de calor é transmitida no sentido longitudinal pelas paredes do tubo, sendo por isso desprezável. Através desse estudo foi possível concluir que a resistência térmica entre a parede do tubo e a fonte fria (R_9), corresponde a 95% da resistência térmica total.

2.3 Limites de Operação

A capacidade de transporte de calor dos tubos de calor e termossifões é em geral muito alta mas não infinita. Sob certas condições de trabalho, principalmente quando a taxa de calor a ser transmitida é muito alta, ocorrem no interior dos tubos fenômenos físicos que limitam a sua capacidade de transportar energia, resultando nos limites de operação. Para certos níveis de temperatura e de taxa de calor transmitido, pode resultar na secagem do evaporador, onde o fluido de trabalho não se encontra disponível nesta região. Torna-se muito importante conhecer essas condições do ponto de vista de segurança visto que a secagem do evaporador ocasiona um rápido aumento de temperatura das paredes do tubo, podendo levar ao colapso do sistema. Outra limitação de transporte de calor ocorre quando o termossifão está submetido a condições de baixa pressão de vapor e baixa densidade do fluido de trabalho. Nestas condições, a transferência de calor é sensivelmente menor que nas condições normais para uma determinada diferença de temperatura entre o evaporador e condensador. (Essa condição é chamada de limite sônico.) [8].

Os principais limites de operação presentes em termossifões bifásicos são: limite de ebulição, limite sônico e limite de arraste líquido.

Neste trabalho, serão utilizados termossifões numa configuração desenvolvida por MANTELLI, et al.(2005) [9], denominada de termossifões em árvore, que será abordada de seguida (secção 2.4). Apesar da extensa pesquisa na literatura sobre os limites de operação para termossifões nesta configuração, apenas foi possível encontrar correlações para os calcular para termossifões convencionais, ou seja, termossifões que possuem apenas um evaporador e um condensador (um tubo apenas), não sendo apresentadas no presente trabalho.

2.4 Termossifões em Árvore

A tecnologia de termossifões vem sendo aplicada na procura de soluções de problemas térmicos, nomeadamente em fornos industriais, que apresentam muitas vezes ineficiência energética e problemas na distribuição de temperaturas. (MANTELLI, 2012) [1]. MANTELLI, et al. (2005) [9], desenvolveram uma configuração denominada de termossifões em árvore que tem sido empregada com sucesso na solução destes problemas. Os termossifões em árvore consistem em vários tubos verticais (condensadores), conectados a um tubo horizontal (evaporador), como sugere a figura 2.5. Esta configuração possibilita a sua aplicação em ambientes onde se pretende a uniformização da temperatura. Apresenta a vantagem de se utilizar apenas um tubo evaporador e conseqüentemente um único queimador para cada conjunto evaporador/condensadores. A sua geometria promove uma maior eficiência na transferência de calor do queimador para o evaporador devido à sua maior área de troca de calor. A desvantagem desta configuração é a maior complexidade na fabricação dos tubos. (MANTELLI et al., 2005) [9]

Devido aos coeficientes de transferência de calor externos ao condensador serem menores do que os coeficientes internos do termossifão, o vapor espalha-se igualmente entre todos os condensadores, resultando uma temperatura praticamente uniforme. (MANTELLI et al., 2005) [9].



Figura 2.5 - Esquema da configuração de termossifões em árvore [9]

2.5 Termossifões aplicados em fornos

A tecnologia de termossifões vem sendo aplicada com sucesso em fornos de cocção de alimentos. Estudos teóricos e experimentais mostram que os fornos adaptados com termossifões apresentam performances térmicas superiores e uma melhor distribuição de temperaturas comparativamente aos fornos encontrados no mercado. MANTELLI et al. (2006) [5], aplicaram a tecnologia de termossifões em árvore num forno de cocção de pães, ilustrado na figura 2.6. Neste caso, os termossifões foram instalados nas paredes laterais da cavidade do forno.

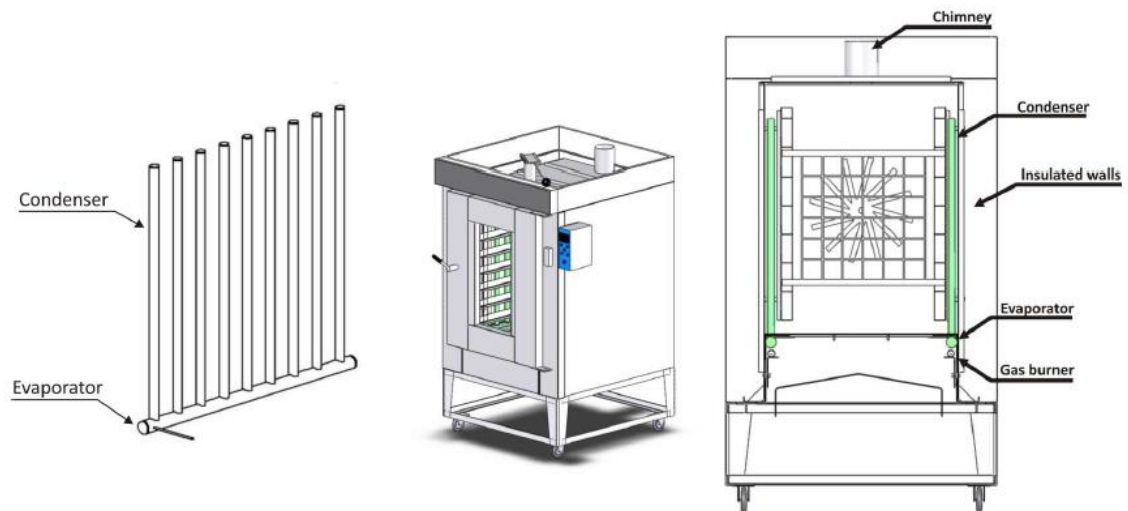


Figura 2.6 - Esquema de forno de cocção de pães assistido por termossifões em árvore (Mantelli, 2012) [1]

Os resultados obtidos mostraram uma distribuição de temperaturas no interior da câmara de cocção praticamente uniforme, como ilustra a figura 2.7. Para além da grande homogeneidade de temperaturas, foi possível constatar uma redução energética de até 50% quando comparado com outros fornos.

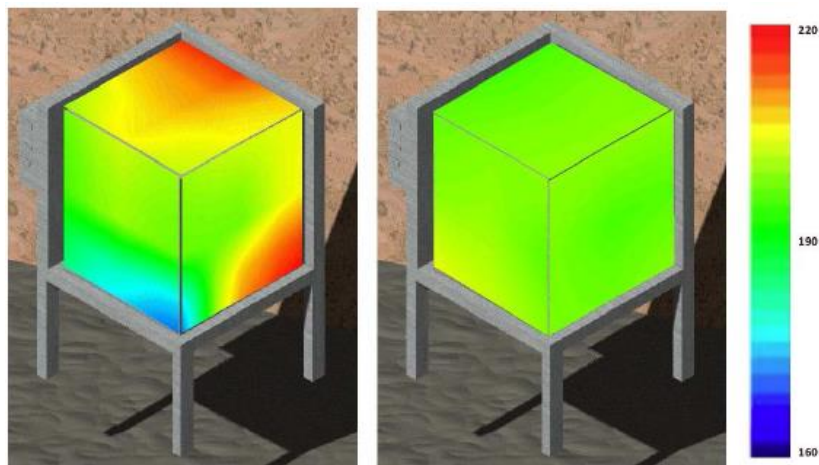
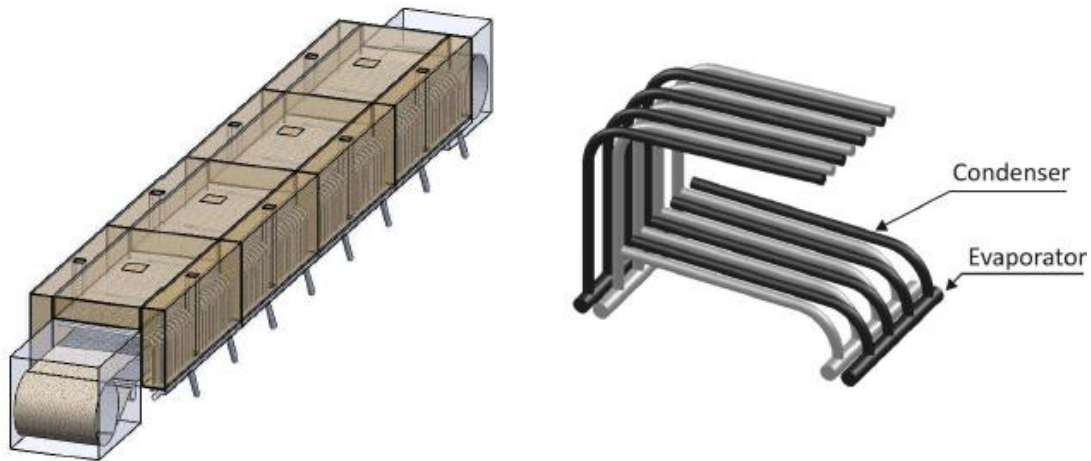


Figura 2.7 - Distribuição de temperaturas na câmara de cocção de um forno (a) convencional (b) assistido por termossifões (Mantelli, 2012) [1]

No caso de fornos de lastro e de esteira, em que as superfícies horizontais necessitam de ser aquecidas uniformemente, pode ser utilizada uma configuração em árvore um pouco diferente, onde os tubos condensadores são curvados logo após a conexão com o evaporador formando um ângulo de 90° aproximadamente.

Nos fornos de esteira, como ilustra a figura 2.8, as resistências elétricas são substituídas por termossifões em árvore.



Podemos observar pela figura 2.9 uma boa homogeneidade de temperaturas no interior do forno de esteira operado por termossifões em árvore.

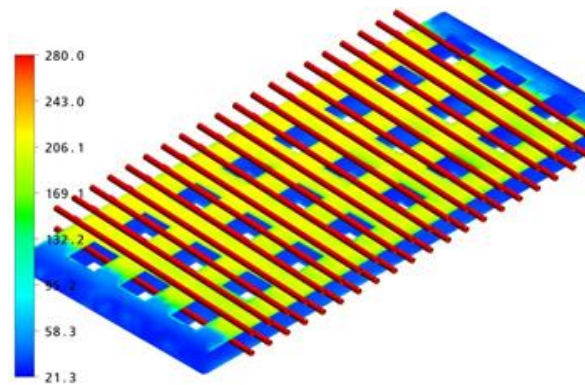


Figura 2.9 - Distribuição de temperatura no interior do forno de esteira [1]

2.6 Fluidos de trabalho

O fluido de trabalho é o agente de transferência de calor de um termossifão. O tipo de fluido de trabalho a utilizar depende do intervalo de temperatura de operação e do tipo de material do termossifão. Como a operação de um termossifão se baseia principalmente na vaporização e condensação do fluido de trabalho, a criteriosa seleção deste é um importante fator a ser considerado no projeto e na manufatura do dispositivo. (MANTELLI et al., 2006) [10]

As propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho e a compatibilidade térmica e química do material com o fluido são importantes questões científicas. (DEVARAKONDA e ANDERSON, 2005) [11]. O fluido de trabalho é selecionado conforme as seguintes considerações: temperatura e pressão de operação, máximo fluxo de calor no evaporador, propriedades termofísicas do fluido (ponto de evaporação e de fusão, parâmetros críticos, calor

latente de evaporação, densidade do vapor, etc.), toxicidade, risco de ignição e explosão. (DEVARAKONDA E OLMINSKY, 2004) [12]

Os agentes de transferência de calor incluem água, gases liquefeitos, compostos orgânicos e metais líquidos. A figura 2.10 mostra alguns fluidos de trabalho típicos agrupados de acordo com a temperatura de operação. (PETERSON, 1994) [13]

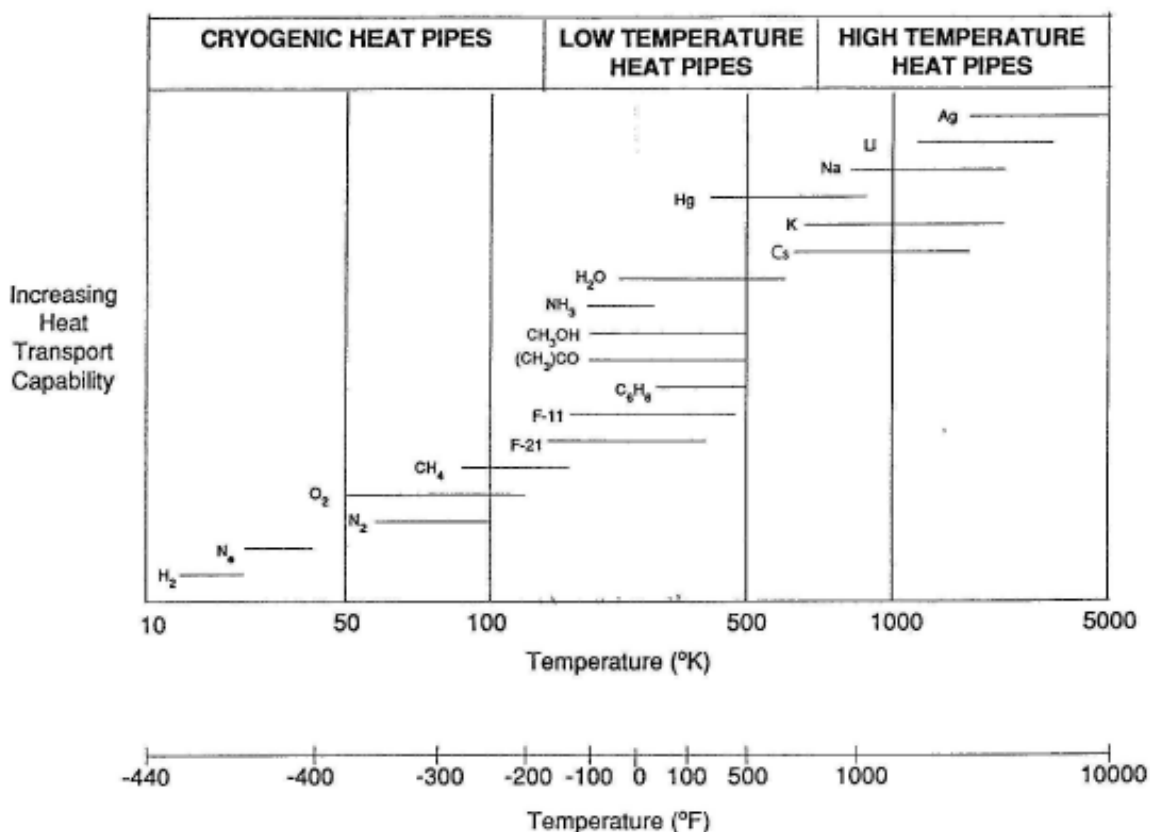


Figura 2.10 - Alguns fluidos de trabalho típicos para a faixa de temperatura de operação [13]

A água é um excelente fluido de trabalho, pois além de não ser tóxica e ser de fácil manuseio, é um líquido com grande calor latente de vaporização, como se pode observar na tabela 2.1. Tem sido amplamente utilizada como fluido de trabalho para a faixa de temperatura de 100 a 250°C. No entanto, para níveis superiores de temperatura, não se recomenda a sua utilização devido à sua pressão crítica. Ao chegar aos 230°C a pressão de vapor interna atinge aproximadamente 26 atmosferas, o que pode ocasionar o colapso do sistema. (DEVARAKONDA e OLMINSKY, 2004) [12].

Para temperaturas acima de 450°C são utilizados metais líquidos como o sódio, lítio, potássio e o mercúrio como fluido de trabalho. Nestes casos, os termosifões são utilizados em trocadores de calor industriais.

Para temperaturas criogênicas podem ser utilizados como fluido de trabalho, o hélio, o neônio, o oxigênio ou o nitrogênio. Nestes casos, os termosifões e os tubos de calor são aplicados principalmente no controle térmico de superfícies óticas, sensores infravermelhos, telescópios e detectores de raios X em ambiente espacial.

Para a faixa de temperaturas de 250 a 450°C, os compostos orgânicos apresentam um grande potencial para serem utilizados como fluidos de trabalho por apresentarem propriedades adequadas de operação, porém, podem decompor-se ou dissociar-se, gerando gases não condensáveis, comprometendo a eficiência do termossifão.

Segundo DEVARAKONDA E ANDERSON (2005) [11], lista uma série de potenciais candidatos a fluidos de trabalho: naftaleno, fenol, tolueno, anilina e hidrazina. De acordo com VASILIEV (1988) [15], o naftaleno é um dos agentes de transferência de calor mais promissores para utilizar em termossifões para a faixa de temperatura de 250 a 450°C. A tabela 2.1 compara as propriedades termofísicas da água, do fluido orgânico naftaleno e do mercúrio. [14]

Tabela 2.1 - Propriedades termofísicas da água, naftaleno e mercúrio [14]

		<i>Água</i>	<i>Naftaleno</i>	<i>Mercúrio</i>
Fórmula	-----	H ₂ O	C ₁₀ H ₈	Hg
Massa Molecular	kg/kmol	18	128	200
Temp. crítica	°C	374	475	1476
Pressão crítica	MPa	21,94	3,99	151
Temp. de fusão	°C	0	80	-39
Temp. de ebulição (T _{eb})	°C	100	218	357
Densidade líquido (@ T _{eb})	kg/m ³	958	878 (200°C)	12737
Viscosidade líquido (@ T _{eb})	10 ⁻⁵ N.s/m ²	0,28	37,5 (200°C)	0,881
Calor latente de vaporização (@ T _{eb})	kJ/kg	2258	338	295
Calor na evaporação de 1l/s de líquido	kW	2163	297	3756

2.7 Naftaleno: Propriedades Termofísicas

O naftaleno é um hidrocarboneto aromático (C₁₀H₈) proveniente da produção do petróleo e apresenta-se sob a forma de cristais brancos com um forte odor a alcatrão. O naftaleno, no estado líquido, possui viscosidade muito baixa, a qual decresce consideravelmente com o aumento da temperatura (VASILIEV et al., 1988) [15]. A tabela 2.2 apresenta algumas propriedades termofísicas do naftaleno (ROHSENOW et al.; 1998, PERRY e GREEN, 1997; GOLDSTEIN e CHO, 1997) [16] [17] [18]

Tabela 2.2 - Propriedades termofísicas do naftaleno [16-18]

Peso Molecular (mol)	128,17		
Ponto de fusão (°C)	80,35		
Ponto de evaporação (°C)	217,95		
Temperatura crítica (°C)	475,25		
Pressão crítica (Mpa)	4,05		
Volume Crítico (m ³ /mol)	413 x 10 ⁻⁶		
Ponto Triplo (°C)	80,28		
Densidade do Sólido a 20 °C (kg/m ³)	1175		
Densidade (kg/m ³) (a 100, 150 e 200 °C)	963	922	878
Capacidade de calor específico (kJ/Kg.K) (a 100, 150 e 200 °C)	1,805	1,993	2,139
Condutividade térmica [(W/m ²)/(K/m)] (a 100, 150 e 200 °C)	0,137	0,130	0,123
Viscosidade dinâmica (10 ⁻⁵ N.s/m ²) (a 100, 150 e 200 °C)	77,4	52,0	37,5

A pressão de vapor é um dos principais parâmetros a ser considerado na escolha do fluido de trabalho. Na figura 2.11 observa-se o gráfico da pressão de vapor em função da temperatura de saturação para o naftaleno e água, onde é possível verificar que a pressão de vapor do naftaleno é aproximadamente uma ordem de grandeza inferior à da água, logo mais adequado para operar em termostatos com temperaturas mais elevadas.

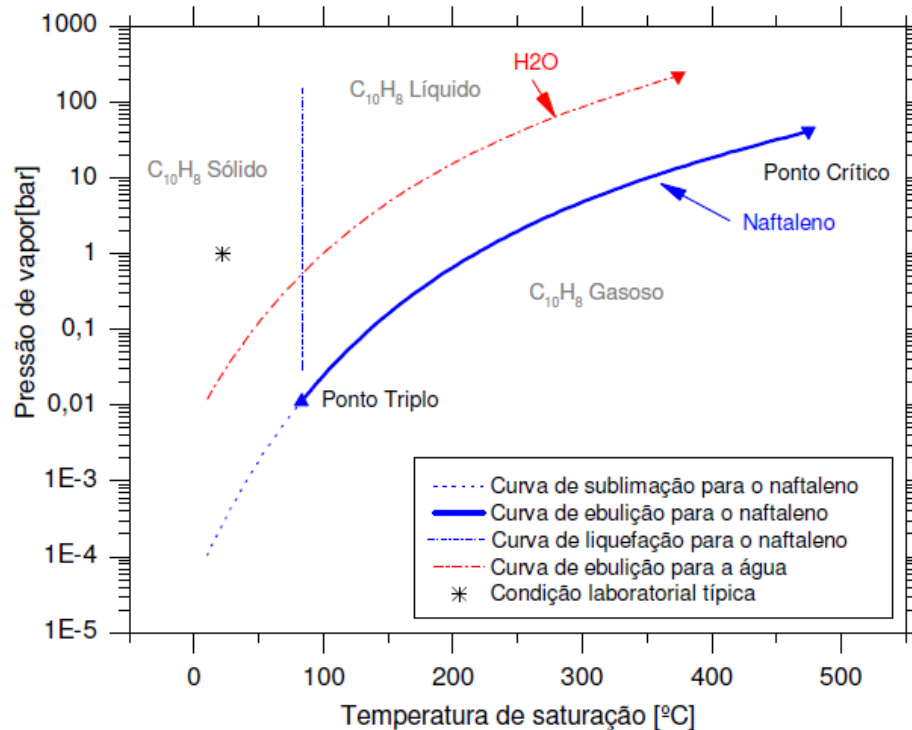


Figura 2.11 - Pressão de vapor versus temperatura do naftaleno e água [8]

2.8 Viabilidade da utilização do Naftaleno como fluido de trabalho

MANTELLI et al., (2006) [10], realizaram um trabalho experimental para avaliar a viabilidade da utilização do naftaleno como fluido de trabalho. Nesse sentido, construíram um termossifão de material vítreo carregado com naftaleno e observaram o seu comportamento para diversas potências térmicas fornecidas na região do evaporador. Observa-se no início de operação do termossifão o efeito “*slug flow*”, ilustrado na figura 2.12 (a). Este efeito consiste no transporte de porções de naftaleno líquido para a região do condensador, em virtude da formação de grandes bolhas, que empurram porções cilíndricas ou “*plugs*” de líquido para cima. Quando este efeito ocorre, causa uma diminuição da quantidade de líquido na piscina na região do evaporador. Outro fator observado, é que durante este efeito, parte do naftaleno líquido encontra uma região mais fria no termossifão, parte superior, onde recristaliza e fica retido.

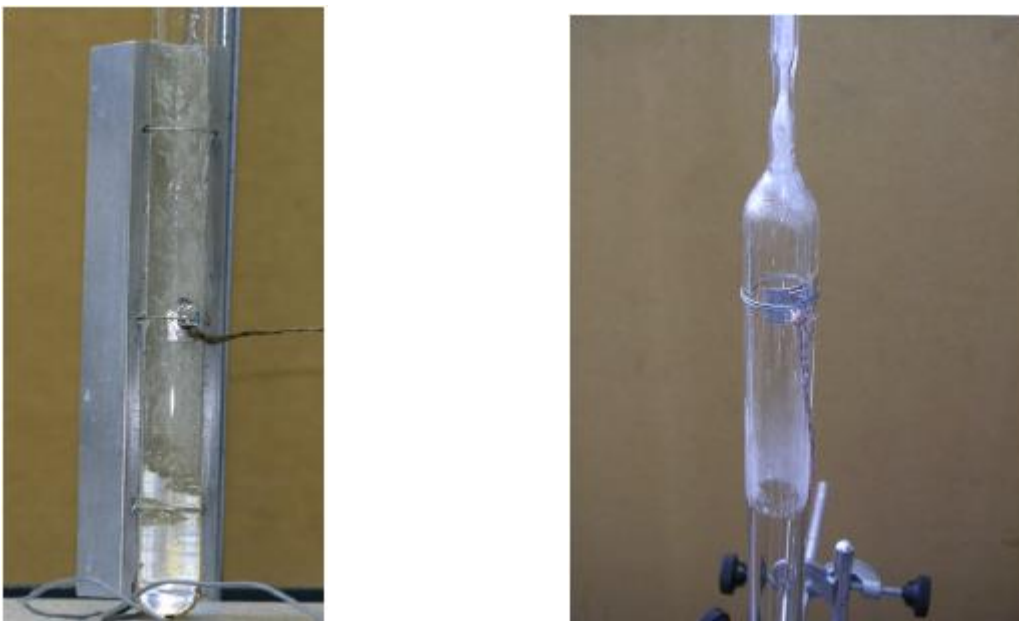


Figura 2.12 - (a) Efeito “*slug flow*” devido à baixa potência fornecida na região do evaporador do termossifão. (b) Recristalização do naftaleno na região do condensador do termossifão [10]

A principal dificuldade encontrada durante os vários ensaios foi o início de operação do termossifão (“*start-up*”). Quando o termossifão arrefece, o naftaleno aglutina-se em cristais diminuindo o contato com a parede do tubo. Assim, o calor recebido pelo tubo não é transferido para o naftaleno cristalizado e dificulta a sua fusão. Nesta experiência, foi necessária a utilização de uma pistola térmica para aquecer a parede do tubo no início de operação, fazendo com que os vapores cristalizados na parede do tubo se fundissem e regressassem até a região do evaporador. O estudo demonstrou a possibilidade da utilização do naftaleno como fluido de trabalho em termossifões. Observou-se que, com um aumento da potência fornecida na região do evaporador, o efeito “*slug flow*” diminui e melhora a eficiência do sistema. O material vítreo utilizado para o tubo limitou a utilização de potências superiores às estudadas, devido a não resistir a pressões elevadas. Assim, a temperatura máxima atingida no termossifão foi inferior a 250°C. O estudo realizado revelou alguns problemas relacionados com a operação de

termossifões de naftaleno como a presença de gases não condensáveis e as características de início de operação.

ANDERSON (2007), [19] realizou um teste de vida útil de 5520 horas com naftaleno, num tubo de aço de baixa liga a uma temperatura de 350°C, onde foi possível observar que o naftaleno não se degradou. Segundo o autor, ficou também comprovada a compatibilidade da utilização do naftaleno em aço inoxidável para testes de longa duração a 320°C, assim como para 380°C durante um curto período.

2.9 Início de operação de um termossifão de naftaleno (“*Start-up*”)

Antes de ser colocado em operação, um termossifão encontra-se em equilíbrio térmico com o ambiente. Quando o termossifão está na temperatura ambiente o fluido de trabalho está, em geral, em uma das três fases: sólida, líquida ou gasosa (supercrítica) e essa fase irá influenciar sensivelmente as características de início de operação. Quando o termossifão de naftaleno começa a ser aquecido passa do seu estado sólido à fase vapor sofrendo o processo de sublimação até atingir a temperatura de 82°C aproximadamente, onde começa a surgir na fase líquida. (ANGELO, 2007) [8].

Uma das principais dificuldades encontradas em testes realizados com termossifões de naftaleno é o início de operação (“*start-up*”). Esta dificuldade deve-se ao facto de à temperatura ambiente o naftaleno encontrar-se na fase sólida, aglomerando-se na parede do condensador, como ilustra a figura 2.13. Esta situação faz diminuir a quantidade de líquido na piscina da região do evaporador. Quando o termossifão arrefece, o naftaleno cristaliza-se e adere à parede do tubo, impossibilitado assim que o calor recebido seja transferido para o naftaleno cristalizado e não permita a sua fusão. (MANTELLI et al.,2006) [10]



Figura 2.13 - Naftaleno recristalizado na região superior do condensador [10]

Para os termossifões que iniciam a sua operação a partir do estado sólido, o limite sónico é facilmente atingido no início de operação do sistema, uma vez que, quando o fluido está no estado sólido, o tubo encontra-se em vácuo, acelerando o vapor gerado até que este atinja a

velocidade sônica. Além dos escoamentos sônicos, a geometria e posição do fluido ainda no estado sólido dentro do tubo é também importante. Esse sólido pode estar em contato com as paredes, estar em blocos no fundo do evaporador ou mesmo aderido às paredes do condensador. (ANGELO, 2007) [8].

2.10 Gases não condensáveis

A presença de gases não condensáveis no interior de termossifões pode acontecer por vários motivos: impurezas no fluido de trabalho; descuido a carregar o fluido de trabalho que pode permitir a entrada de ar no interior do termossifão; microfissuras que podem surgir ao longo do tempo de uso do dispositivo, permitindo vazamentos de ar para o interior do termossifão; reação química entre o fluido de trabalho e a parede do termossifão, produzindo algum tipo de gás. (ESTEVAN, 2010) [20]

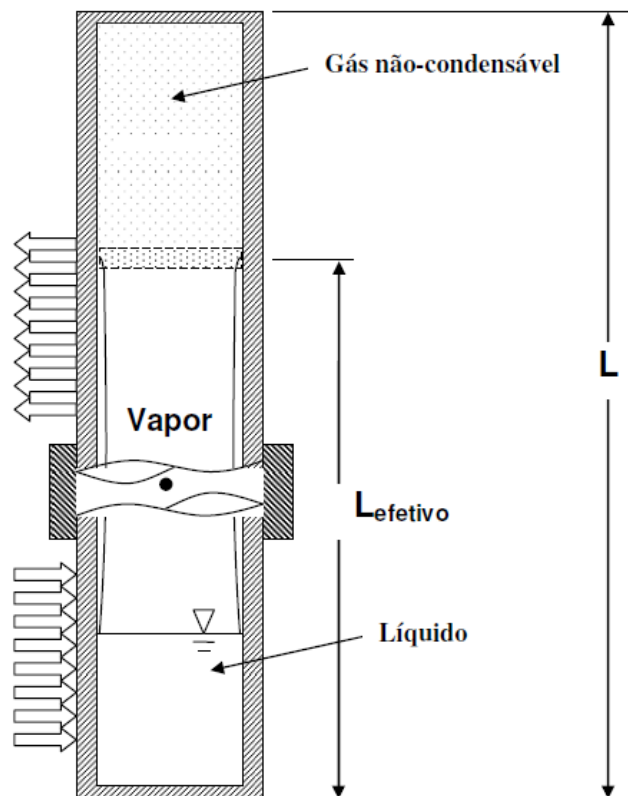


Figura 2.14 - Esquema de um termossifão com gases não-condensáveis [8]

(DUBE et al, 2004) [21] afirmam que, num termossifão inativo à temperatura ambiente, os gases não condensáveis preenchem toda a região do termossifão exceto o espaço ocupado pelo fluido de trabalho. Quando a temperatura do evaporador aumenta e atinge a temperatura de saturação do líquido, a taxa de geração de vapor aumenta significativamente. Este grande fluxo de vapor ascendente proveniente do evaporador empurra os gases não condensáveis para a extremidade superior do tubo onde permanecem acumulados (figura 2.14). A parcela do

condensador ocupado pelo gás não condensável implica na redução da área efetiva de troca térmica do dispositivo com o ambiente externo, gerando assim uma região inativa do termossifão.

(ANGELO,2007) [8], no seu trabalho teórico-experimental, analisou o comportamento térmico de um termossifão bifásico onde utilizou naftaleno como fluido de trabalho. O objetivo foi avaliar a influência de gases não condensáveis no desempenho térmico do dispositivo. Assim, determinou o perfil longitudinal de temperaturas ao longo da parede do tubo para diferentes potências térmicas de aquecimento fornecidas e diferentes quantidades de gases não condensáveis. O projeto experimental construído, ilustrado na figura 2.15, apresenta um conjunto de resistências elétricas instaladas num bloco metálico, na região do evaporador de maneira a possibilitar o controlo da potência de aquecimento. Na região do condensador, foi utilizado um calorímetro para medir a quantidade de calor rejeitada por esta região. O calorímetro utilizado consiste numa camisa de água onde é aplicado um medidor de vazão de fluxo de água e termopares na entrada e saída da camisa de água.

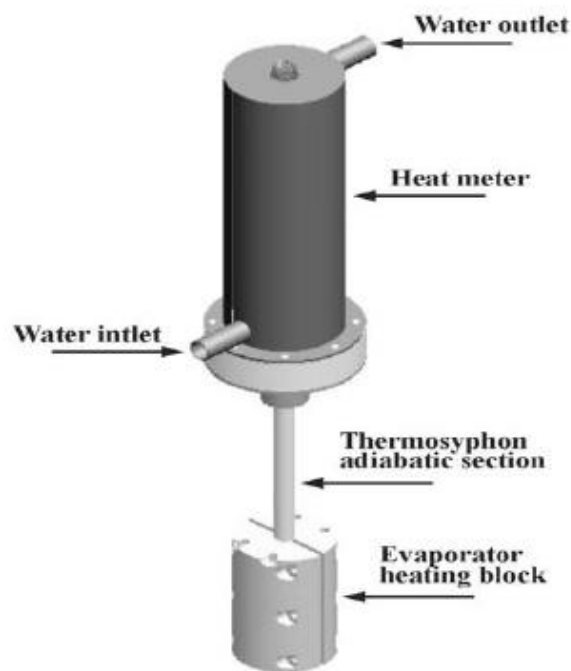


Figura 2.15 - Modelo experimental construído [8]

Para avaliar a influência dos gases não condensáveis no comportamento térmico do termossifão foi utilizado argônio por ser um gás não condensável inerte ao sistema. Foi introduzido no tubo uma quantidade controlada do gás em três pressões diferentes, resultando em três massas de gás diferentes. Através de termopares instalados ao longo do termossifão, obteve-se a distribuição de temperaturas para as diferentes pressões de carregamento do gás e potências de aquecimento testadas. Os resultados para os diferentes ensaios estão ilustrados na figura 2.16.

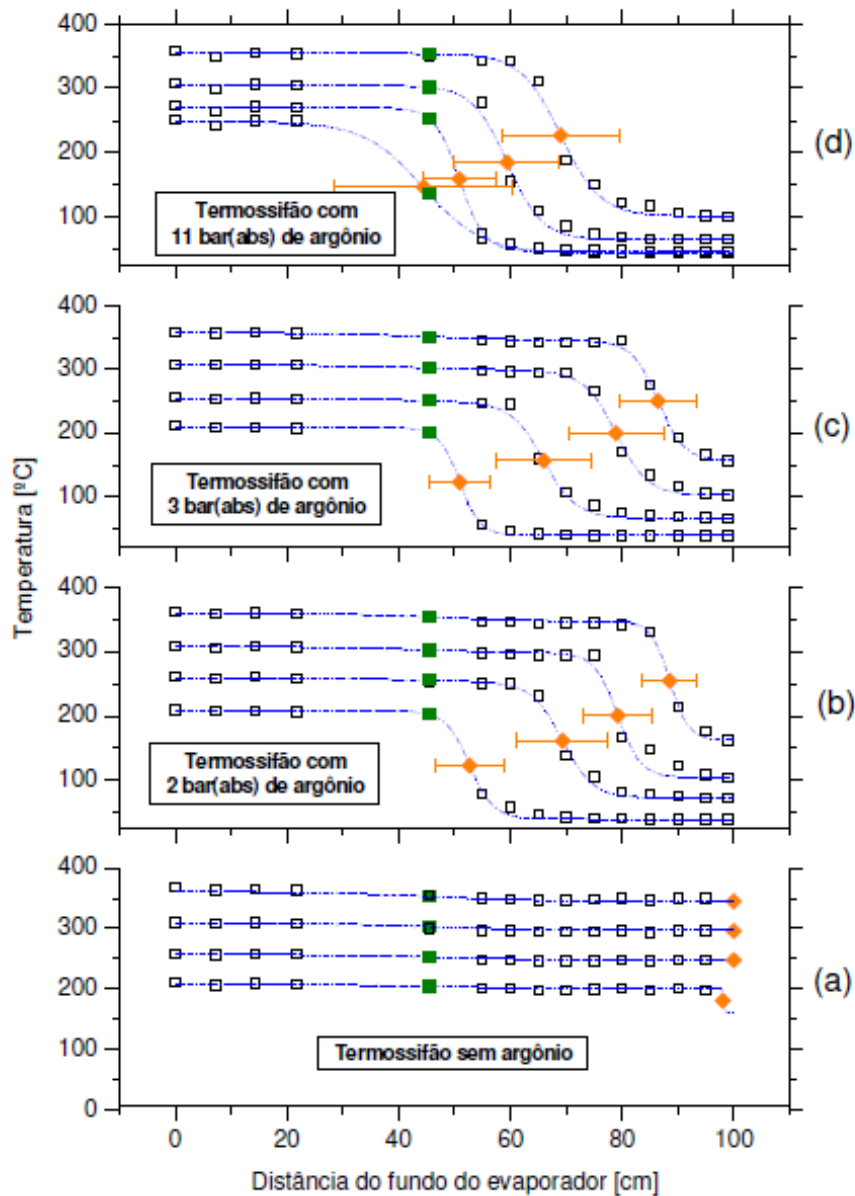


Figura 2.16 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do fundo do evaporador para quatro condições: (a) termossifão sem argônio (b) termossifão com 2 bar de argônio (c) termossifão com 3 bar de argônio (d) termossifão com 11 bar de argônio [8]

Os pontos do gráfico a verde são referentes à posição da seção adiabática do tubo, enquanto os pontos a laranja mostram a posição da interface entre vapor e gás não condensável. Podemos observar que a presença do argônio no interior do termossifão reduz a área de troca térmica efetiva do condensador, o que implica a diminuição da condutância térmica do dispositivo. Verifica-se que para baixa potência de operação os efeitos de difusão molecular tornam-se mais evidentes.

Na figura 2.17 são ilustrados os perfis de temperaturas do termossifão antes e após a purga inicial, ambos sem argônio. Podemos observar a presença significativa de gases não condensáveis no termossifão carregado com naftaleno, mesmo sem a introdução do argônio. Isto pode-se dever a um dos motivos mencionados anteriormente.

Torna-se evidente a necessidade da purga inicial após o carregamento para expelir os gases não condensáveis que se formaram no interior do termossifão.

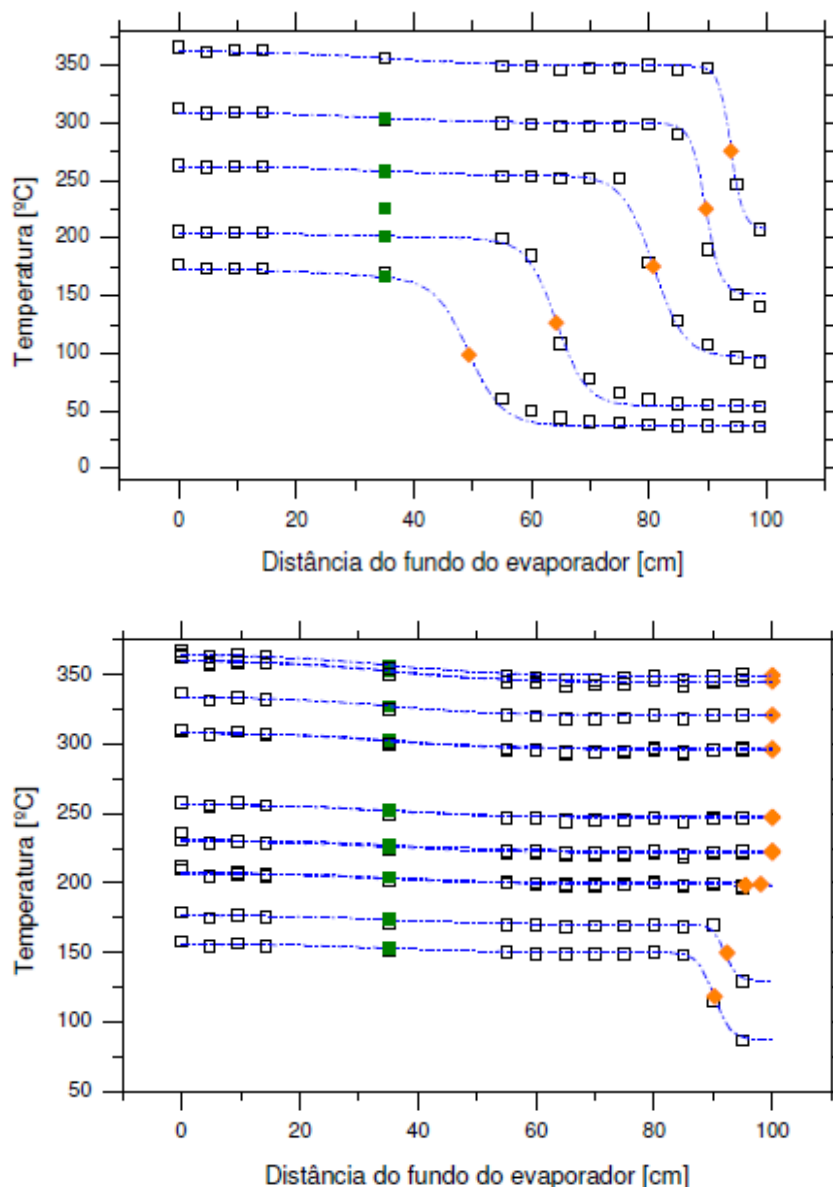


Figura 2.17 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do início do evaporador para o termossifão (a) antes da purga inicial (b) após a purga inicial [8]

No ensaio realizado com a purga e sem argônio, os perfis de temperatura do tubo mostram uniformidade de temperaturas acima de 220°C. Porém, para temperaturas inferiores a esse valor, ocorre a diminuição da temperatura na extremidade do tubo, devido à presença de gases não-condensáveis que não foram expelidos efetivamente na purga inicial.

Conclui-se que a presença de gases não condensáveis influenciam fortemente a resistência interna do termossifão, especialmente a temperaturas mais baixas. Isto ocorre devido ao volume de gases que se acumulam na extremidade superior do termossifão aumentar com a diminuição da pressão interna.

3 Modelo Experimental

Neste capítulo, são descritas as adaptações realizadas no forno para possibilitar a implementação dos termossifões. São também apresentadas as dimensões e as várias etapas da construção das árvores de termossifões. Em seguida, é descrito o carregamento do naftaleno no interior das árvores. Por fim são apresentados os sistemas de aquisição de dados utilizados no trabalho.

3.1 Construção/Adaptação do forno

Para a implementação da tecnologia de termossifões foi utilizado um forno de lastro da Progás®, marca brasileira de fornos, ilustrado na figura 3.1.

Os fornos de lastro podem ser aquecidos por resistências elétricas, queimadores de gás ou lenha. Na parte inferior apresentam o lastro, material de grande massa e inércia térmica, com a propriedade de manter a temperatura da base durante todo o período de confecção. Uma das principais características deste tipo de forno é a ausência de ventiladores ou de qualquer outro dispositivo para movimentação forçada do ar no interior da câmara de cocção.



Figura 3.1 - Forno de lastro da Progás

Na figura 3.2, podemos observar os queimadores que aquecem o lastro de tijolos refratários que por sua vez aquecem a câmara de cocção.



Figura 3.2 - (a) Detalhe dos queimadores originais do forno (b) Lastro de tijolos refratários

Para a implementação dos termossifões foi necessário proceder a várias alterações na estrutura do forno. Inicialmente procedeu-se à desmontagem do forno, desacoplando a câmara de cocção da estrutura que o suporta (figura 3.3).

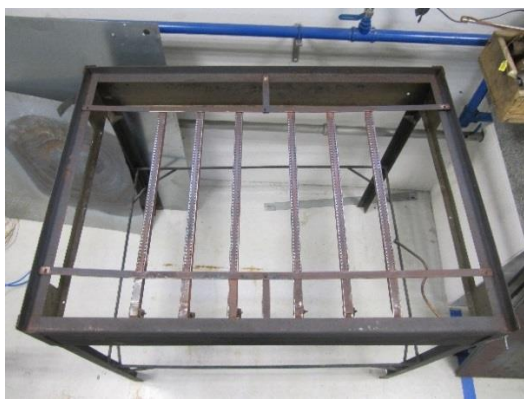


Figura 3.3 - (a) Estrutura de suporte do forno (b) câmara de cocção

Na chapa lateral direita do forno foram feitos dois rasgos onde as árvores entram no interior da câmara de cocção (figura 3.4 (a)).

Aproveitando a estrutura do forno construiu-se uma estrutura auxiliar para suportar as árvores de termossifões e os queimadores (figura 3.4 (b)).



Figura 3.4 - (a) Rasgos na chapa lateral onde entram os termossifões (b) Estrutura construída para suportar as árvores e os queimadores

O objetivo da utilização de duas árvores de termossifões, uma em baixo e outra em cima, é, controlar independentemente a temperatura da superfície inferior e superior do forno. Com

essa finalidade são utilizados dois queimadores do tipo flauta, provenientes de projetos antigos do laboratório, adaptados à dimensão dos evaporadores (figura 3.5).

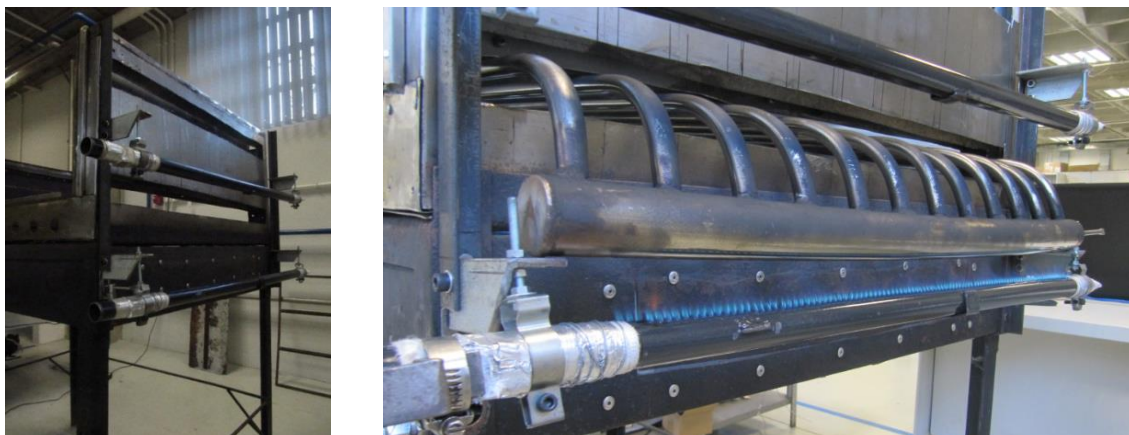


Figura 3.5 - (a) queimadores fixados na estrutura construída (b) queimador em operação

De acordo com o problema apresentado na secção 2.9 do capítulo 2, sobre a recristalização do naftaleno e a necessidade de o fundir, utilizaram-se os queimadores originais do forno para o pré-aquecimento da câmara de cocção onde se encontram os condensadores (figura 3.6 (a)).

Não é a solução ideal pois haverá queima de gás no seu interior, no entanto, para os objetivos do presente trabalho decidiu-se optar por esta solução por ser economicamente mais viável.

Uma das vantagens da aplicação de termossifões é a possibilidade de se projetar a câmara de combustão desacoplada da câmara de cocção. Assim o calor gerado na câmara de combustão pode ser captado e eficientemente conduzido sem que haja a queima de gases no interior do forno.

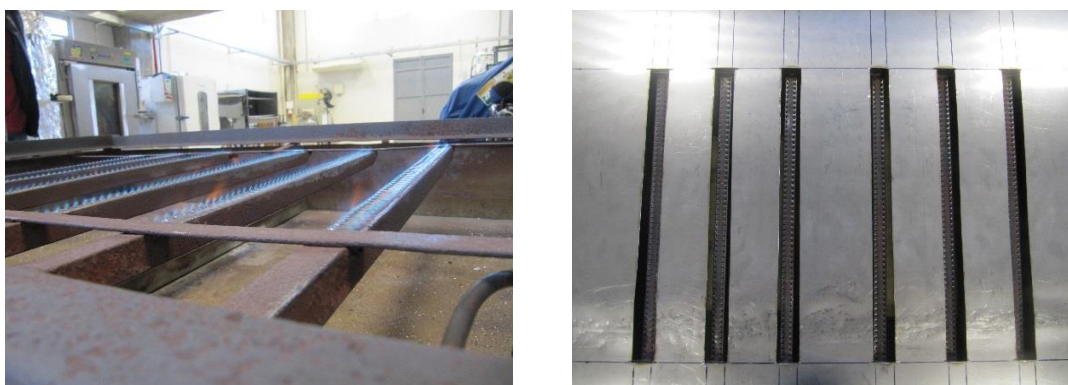


Figura 3.6 - (a) Queimadores originais utilizados para o “start-up” (b) Rasgos na chapa inferior do forno

Para minimizar as perdas de calor projetaram-se duas chapas com rasgos semelhantes que fecham a parte inferior do forno. Uma das chapas é fixada na estrutura do forno e a outra desliza sobre esta, de modo a obterem-se duas posições de operação. O objetivo desta configuração é permitir que, no início de operação (**posição 1**), a chama dos queimadores

aqueça diretamente o ambiente da câmara de cocção, onde estão situados os condensadores. Nesta posição os rasgos de ambas são coincidentes, como ilustra a figura 3.7. Esta posição aberta deve ser mantida até que a temperatura média dos condensadores atinja 300°C. Com esta temperatura garante-se que o naftaleno, antes cristalizado, esteja no seu estado gasoso.

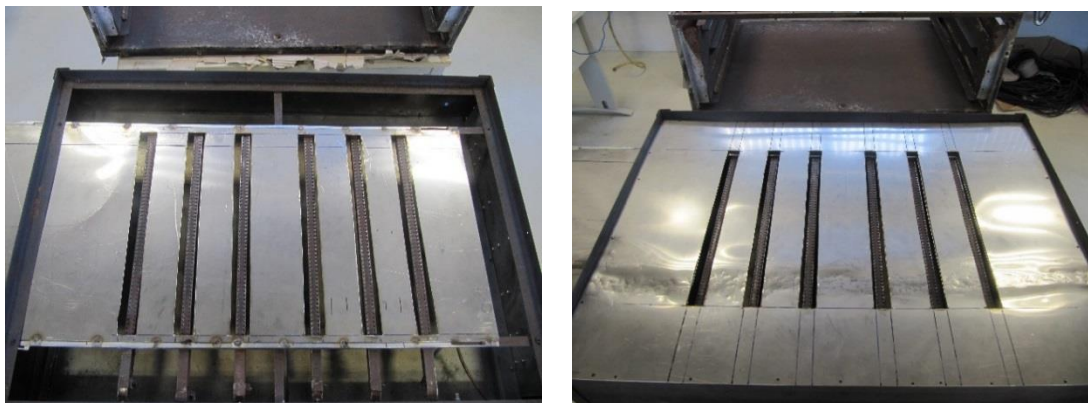


Figura 3.7 - (a) chapa inferior deslizante na posição 1 (b) chapa inferior fixada

Nesse instante, desligam-se os queimadores originais e move-se a chapa para a segunda posição (**posição 2**) como ilustra a figura 3.8, minimizando a perda de calor no interior da câmara de cocção.

Em seguida, aumenta-se a potência dos queimadores situados na câmara de combustão, transferindo o calor da região dos evaporadores para o interior da câmara de cocção.

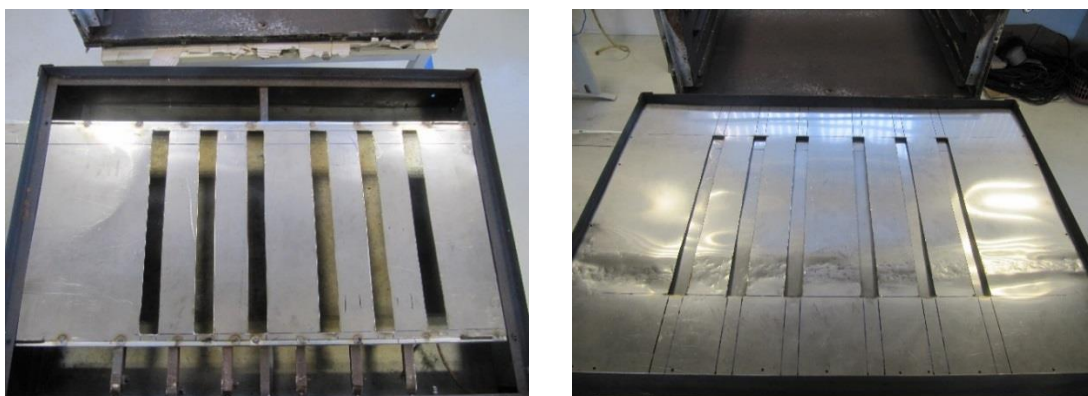


Figura 3.8 - (a) chapa inferior deslizante na posição 2 (b) chapa inferior fixada

3.2 Construção dos termossifões

Os evaporadores dos termossifões foram projetados para ficar fora da câmara da cocção. Os condensadores apresentam um diâmetro menor que os evaporadores e são soldados perpendicularmente a estes, curvados antes da conexão com os evaporadores, deixando-os num nível mais alto como ilustra a figura 3.9.

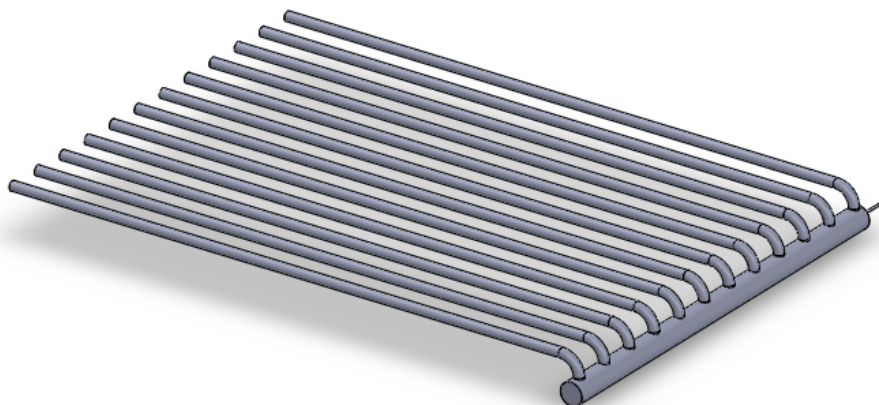


Figura 3.9 - Projeto dos termossifões do tipo árvore construídos

As dimensões e distâncias entre os tubos utilizados, representadas na tabela 3.1, foram baseadas num projeto anterior do LABTUCAL, no qual foi realizado um estudo numérico com o programa CFX-ANSYS, do seu comportamento térmico. Os tubos de aço inoxidável 304 foram projetados para funcionarem com água a temperaturas próximas dos 250°C e por isso, são suficientemente resistentes para se operar com naftaleno às temperaturas requeridas. Para facilitar a evacuação dos termossifões, bem como para permitir a inserção do fluido de trabalho e sua selagem, foi soldado na tampa da parte posterior dos evaporadores um tubo de carregamento, designado de “umbilical”.

Tabela 3.1 - Dimensões dos tubos utilizados

	Diâmetro externo (mm)	Espessura mínima de parede (mm)
Condensadores	15,87 (5/8")	1,5
Evaporador	38,7 (1 1/2")	1,5
Tampa Evaporador	38,7 (1 1/2")	2,0
Umbilical	6,35 (1/4")	1,5

Na construção dos termossifões foi utilizada inicialmente uma serra policorte (figura 3.10 (a)) para cortar os tubos de acordo com o projeto. Os tubos condensadores foram dobrados com

o auxílio de uma calandra (figura 3.10 (b)) e os evaporadores furados com o auxílio de uma fresadora universal.



Figura 3.10 - (a) corte dos tubos (b) calandragem dos tubos condensadores

Após a dobragem dos 24 condensadores (12 para cada árvore) procedeu-se ao esmagamento das extremidades para selar o ambiente de trabalho do naftaleno com o auxílio de uma prensa hidráulica (figura 3.11 (a)) aplicando uma carga de aproximadamente 10 toneladas (figura 3.11 (b)).



Figura 3.11 - (a) esmagamento da ponta dos condensadores com a prensa hidráulica (b) Carga aplicada na prensa hidráulica

Desta forma, com o auxílio de uma máquina de soldar TIG (*tugstein inert gas*), removeu-se o excesso de material e selou-se as extremidades dos condensadores de acordo com a figura 3.12.



Figura 3.12 - (a) Detalhe do esmagamento obtido (b) corte do excesso de material com a máquina de soldar TIG (*tugstein inert gas*)

Após concluir a construção dos dois tubos evaporadores e dos vinte e quatro tubos condensadores, foi realizada uma operação de limpeza dos mesmos. Inicialmente limpavam-se as rebarbas resultantes das operações de corte, furação e soldagem, com o auxílio de uma retificadora manual concluída com uma limpeza química de querosene.

Para completar o processo foi necessário recorrer a técnicos especializados do LABTUCAL que efetuaram o processo fino de soldadura entre os evaporadores e os condensadores. Este processo foi de elevada dificuldade devido à geometria pretendida e ao material constituinte dos tubos.

Após a construção dos termosifões, foi necessário realizar uma operação adicional de nivelamento, devido ao empenamento dos tubos durante a operação de soldagem. Esta operação consistiu em fixar as extremidades dos condensadores a uma barra em L, mantendo-os com as mesmas distâncias entre si, permitindo uma melhor distribuição do calor (figura 3.13).



Figura 3.13 - (a) Nivelamento dos termosifões (b) detalhe da barra em L utilizada para o nivelamento dos tubos

Concluído este processo e instalados os termossifões, o forno tem uma configuração semelhante à apresentada na figura 3.14.

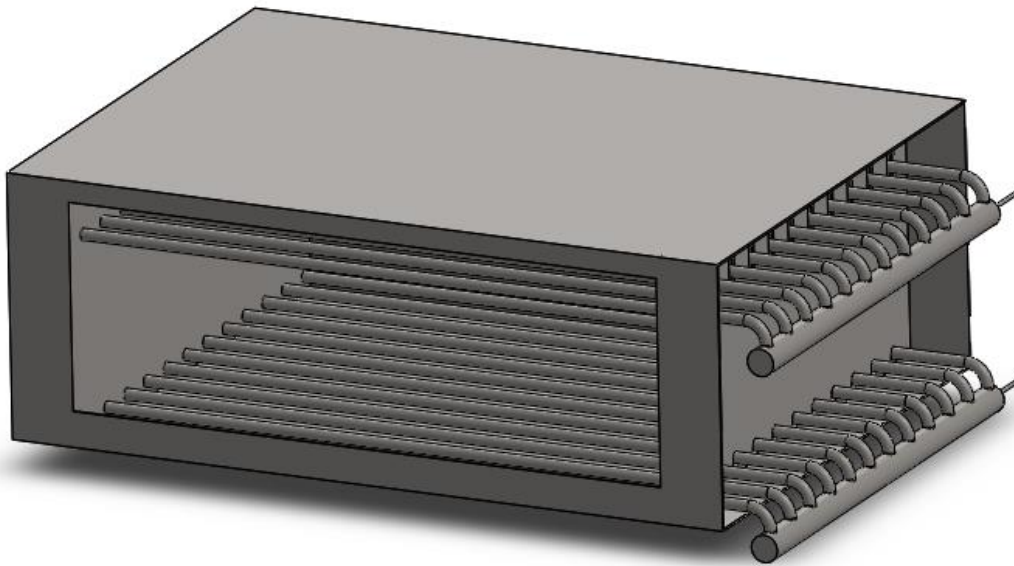


Figura 3.14 - Projeto do forno implementado com a tecnologia de termossifões em árvore

3.3 Carregamento dos termossifões

Após realizadas as operações de soldagem e limpeza, as árvores de termossifões foram submetidas a testes de vazamento, onde se utilizou um equipamento especial para detectar vazamentos (Leak Detector Spectron 5000 da Edwards®). Os tubos foram conectados pelo tubo “umbilical” ao detector de vazamentos, como ilustra a figura 3.15, que tem um sistema de sucção que coloca em depressão o dispositivo a ser testado. Em seguida, para detectar algum tipo de vazamento, borrija-se gás hélio nas paredes externas dos tubos e o espectrómetro de massa do equipamento analisa se os tubos estão bem selados. Para a caracterização de um tubo perfeitamente estanque a indicação da taxa de fuga do detector de vazamentos deverá ser aproximadamente de $1 \times 10^{-9} \text{ mbar.l/s}$.



Figura 3.15 - (a) Equipamento para detetar vazamentos (Leak Detector Spectron 5000 Edwards ©)
 (b) Detalhe do tubo umbilical ligado ao tubo de sucção do equipamento

Garantida a estanqueidade das árvores de termossifões, procedeu-se ao respetivo processo de carregamento do fluido de trabalho. Este processo apresenta alguma complexidade devido às características do naftaleno. À temperatura ambiente, o naftaleno encontra-se no estado sólido, sendo por isso necessário aquecê-lo previamente para que seja possível introduzi-lo no interior dos tubos. O carregamento foi realizado com o naftaleno à temperatura de 90°C. Para manter essa temperatura, foram utilizadas resistências elétricas. O naftaleno utilizado tinha um grau de pureza de aproximadamente 98,5%.

Inicialmente, o fator de enchimento foi de 50% do volume interno do evaporador, equivalente a 1,5 kg. Assim, o naftaleno foi sugado para dentro dos termossifões pelo tubo “umbilical”.

Em seguida, foi necessário purgar as árvores para expelir os gases não condensáveis. Este processo foi realizado num forno convector a uma temperatura aproximada de 220°C (Teb naftaleno=218°C). O tubo “umbilical” foi posicionado na zona superior, permitindo assim que por impulsão os gases não condensáveis se alojem na sua vizinhança. Garantida esta condição, abre-se o tubo umbilical para libertar os gases não desejados, isolando o naftaleno dentro dos termossifões. O início da saída do naftaleno é identificado pela sua coloração branca. Quando tal acontece, efetua-se a selagem do tubo. Este processo consiste em esmagar o tubo utilizando uma prensa hidráulica. Em seguida corta-se o excesso de material usando uma máquina de soldadura TIG (*tugsten inert gas*), como ilustra a figura 3.16.



Figura 3.16 - Etapas do procedimento de selagem do tubo [1]

3.4 Sistema de aquisição de temperaturas

Para monitorar a temperatura do ar no interior do forno, foram utilizados 32 termopares fisicamente suportados por duas malhas de arame, A e B, de acordo com as figuras 3.17 e 3.18. Os termopares utilizados são do tipo K (cromel/alumel) da marca Ohmega®.

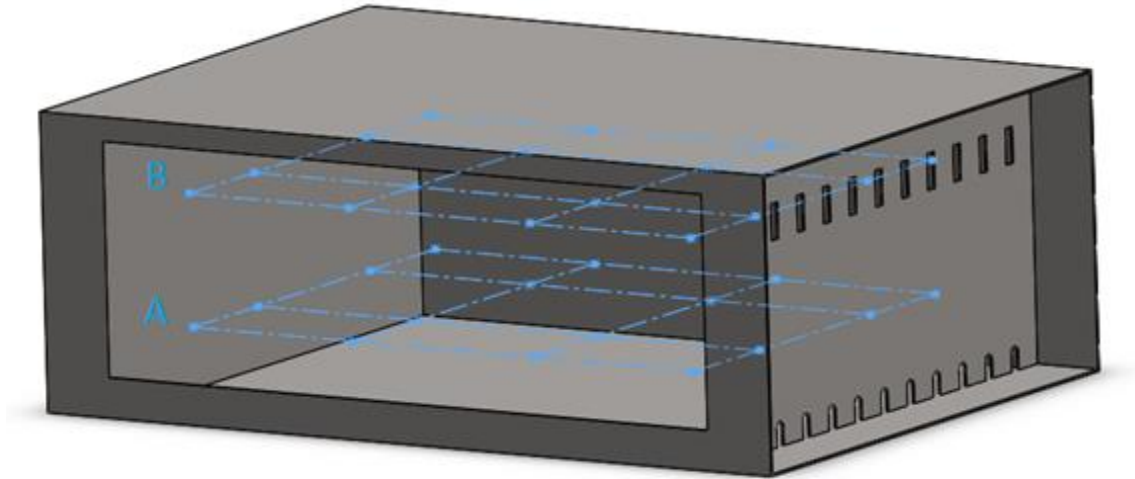


Figura 3.17 - Posicionamento dos termopares no interior da câmara de cocção (malha A e B)

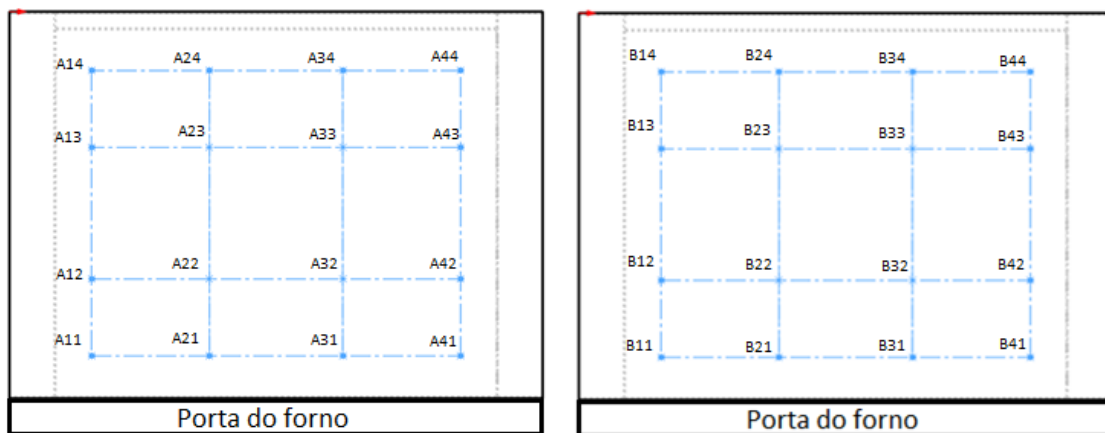


Figura 3.18 - Posicionamento dos termopares nas malhas (a) A, inferior e (b) B, superior

Aplicaram-se também 18 termopares do mesmo tipo no evaporador e condensadores de cada árvore (figuras 3.19 e 3.20).

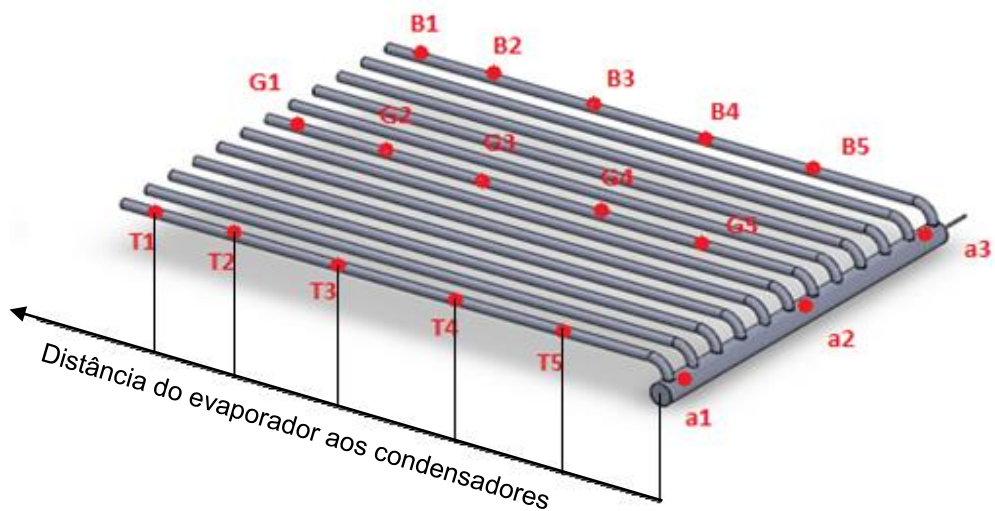


Figura 3.19 - Localização e denominação dos termopares na árvore A

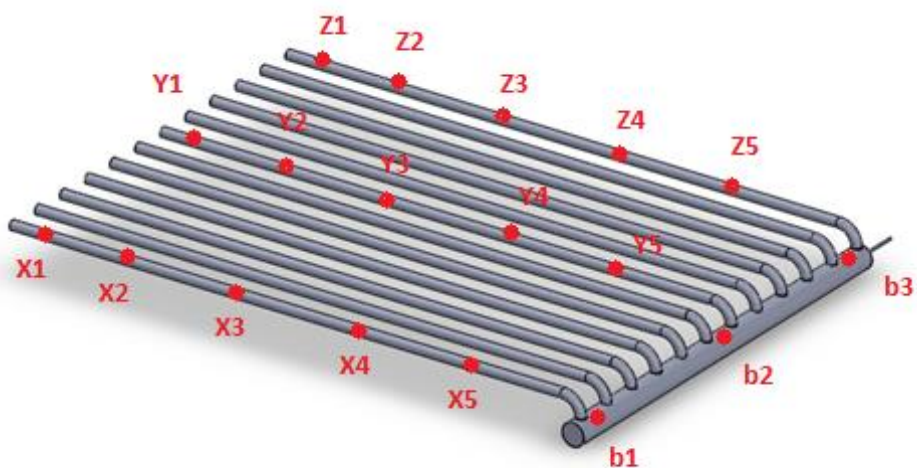


Figura 3.20 - Localização e denominação dos termopares na árvore B

A aquisição de temperaturas foi efetuada com um condicionador de sinal CR1000 da marca Campbell®. O varrimento pelos (32+18+18) canais foi efetuado recorrendo a 3 multiplexadores AM25T, também da marca Campbell®.

Os sinais provenientes do condicionador foram digitalizados através de uma placa de aquisição de dados instalada num computador. Os respetivos ficheiros contendo a evolução temporal das temperaturas foram importadas para o programa Excel para posterior análise.

Utilizando-se os 32 valores das temperaturas no interior do forno, desenvolveu-se um programa em MATLAB que através de um esquema de interpolação cruzada, estima-se a distribuição de temperaturas no interior do forno, o que permite a representação gráfica da mesma. Embora o esquema utilizado não seja completamente realista (essencialmente nas

regiões de elevado gradiente térmico) a visualização do campo de temperaturas permite tirar importantes conclusões, ainda que globais.

Na figura 3.21, apresenta-se um exemplo de uma distribuição de temperaturas no interior do forno. Globalmente é possível identificar zonas de maior gradiente térmico.

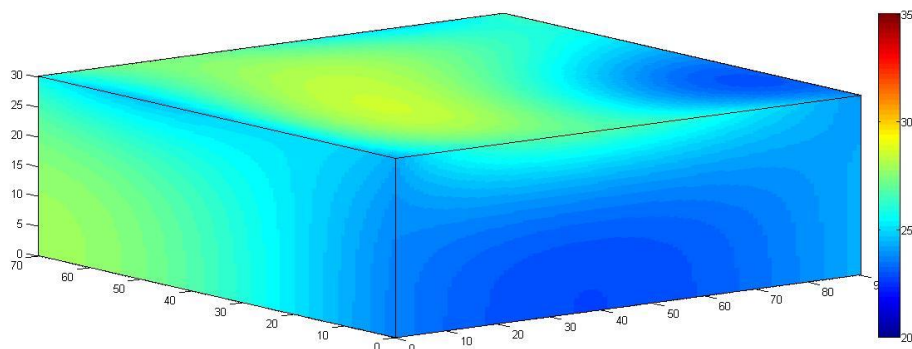


Figura 3.21 - Exemplo da distribuição de temperaturas obtida pelo programa desenvolvido

Foi também possível aferir a evolução da temperatura ao longo dos termossifões, utilizando uma câmara termográfica da marca FLIR®, como será apresentado em seguida na secção 3.5.

3.5 Otimização térmica dos termossifões

Construídas as árvores, procedeu-se ao estudo térmico dos termossifões com vista à sua otimização quando instalados no forno. Para isso, analisou-se o comportamento das árvores, tendo-se realizado testes colocando apenas uma árvore no interior do forno. Deste modo, evitou-se a interação entre as duas árvores. Foram testados dois fatores de carregamento de naftaleno e duas inclinações diferentes, medindo as temperaturas ao longo dos termossifões que idealmente deve ser constante.

3.5.1 1º Fator de carregamento de Naftaleno: 50%

Inicialmente considerou-se que um fator de carregamento de 50% do volume do evaporador, equivalente a aproximadamente 1,5 kg de naftaleno e aferiu-se sobre a homogeneidade de temperatura variando o ângulo de inclinação dos termossifões.

Efetuar-se dois testes, um próximo da horizontal (mas suficientemente inclinado para garantir o retorno da fase líquida) e outro próximo de 10°. Através da câmara termográfica, obteve-se a distribuição de temperaturas, representada na figura 3.22.

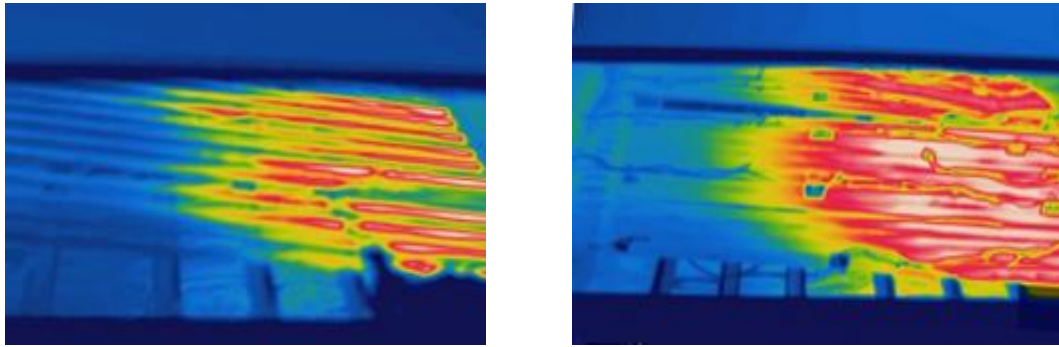


Figura 3.22 - Distribuição de temperaturas nos termossifões (a) inclinados a 10° (b) inclinados a 2°

Observando a figura 3.22, conclui-se que o aumento da inclinação, a região de altas temperaturas reduz-se, o que implica uma menor zona útil no forno. Assim, a árvore foi instalada com uma inclinação de aproximadamente 2° .

Decidida a inclinação, mediu-se a variação de temperatura ao longo de um termossifão, utilizando os termopares representados na figura 3.23.

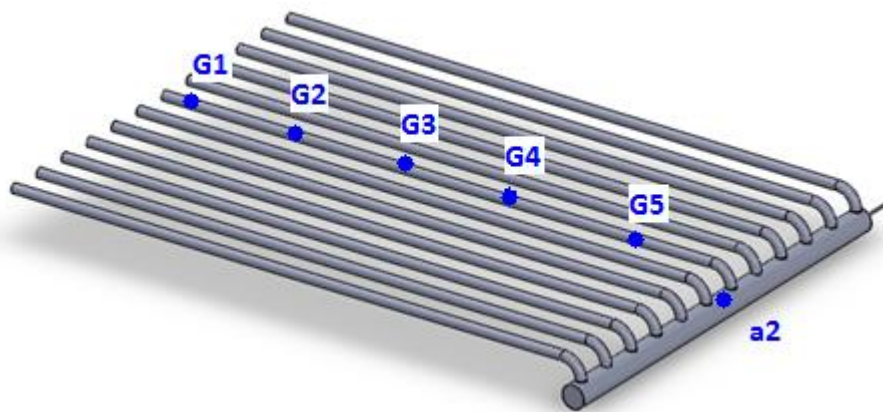


Figura 3.23 - Disposição dos termopares na árvore A

Para a situação de regime permanente, representa-se na figura 3.24, o respetivo perfil de temperaturas para o termossifão identificado pela letra G.

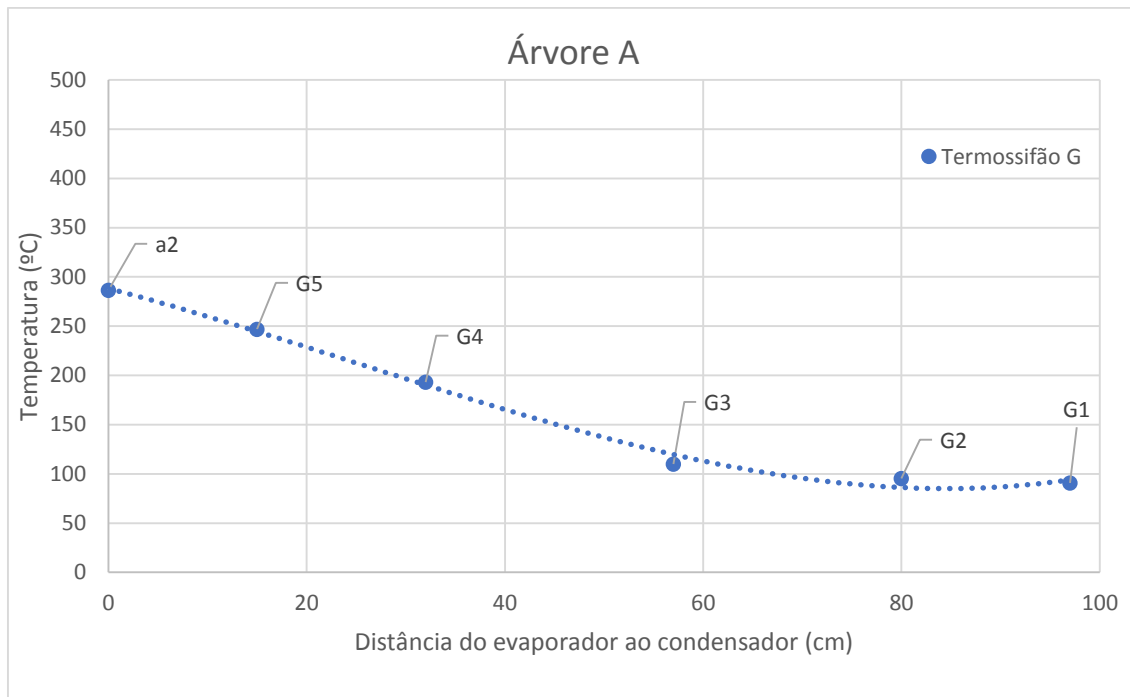


Figura 3.24 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador ao condensador

Na figura é possível identificar que a temperatura diminui muito desde o evaporador, atingindo rapidamente temperaturas inferiores às requeridas para a confecção. O teste realizado revelou assim um fraco desempenho térmico da árvore A. Assumiu-se que o problema poderia ser solucionado aumentando a quantidade de naftaleno introduzido no sistema pois os 50% utilizados revelaram-se insuficientes para transmitir o calor desde o evaporador até à extremidade dos condensadores.

Foi realizado um teste semelhante para a árvore B, tendo-se evidentemente chegado à mesma conclusão. Desta forma, optou-se por introduzir mais 25% do volume do evaporador de naftaleno no interior das árvores.

3.5.2 2º Fator de carregamento de Naftaleno: 75%

Após a introdução de mais 25 % do volume do evaporador em naftaleno, totalizando aproximadamente 2,25 kg no interior dos termossifões, realizou-se a respetiva purga das árvores e analisou-se o seu desempenho térmico utilizando todos os termopares, como representado nas figuras 3.19 e 3.20.

Para o regime permanente, representa-se na figura 3.25, os perfis de temperaturas para os termossifões T, G e B da árvore A.

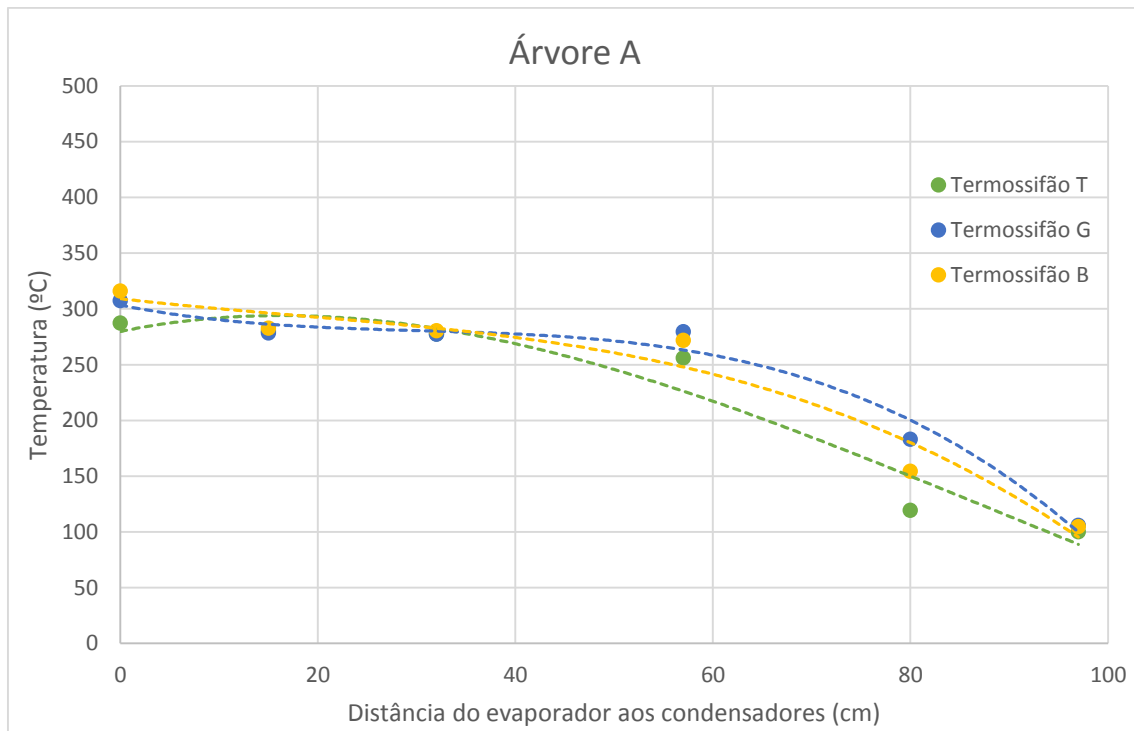


Figura 3.25 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A para uma baixa potência térmica fornecida

O resultado obtido permite identificar uma melhoria significativa do desempenho térmico com o novo fator de carregamento de naftaleno. A temperatura mantém-se constante até aproximadamente metade do comprimento dos condensadores. No entanto na outra metade a temperatura desce abaixo da temperatura de confecção requerida.

O ensaio correspondente para a árvore B permitiu retirar uma conclusão idêntica não sendo por isso aqui apresentado.

A queda de temperatura evidenciada a partir de aproximadamente metade do comprimento dos condensadores, pode-se dever a dois efeitos:

- Potência fornecida ao evaporador insuficiente, o que provoca que a temperatura não alcance a temperatura de ebulição do naftaleno.
- Presença de gases não condensáveis que se acumulam na extremidade do termossifão.

Antes de realizar nova purga para tentar retirar os gases não condensáveis, decidiu-se aumentar a potência térmica fornecida e avaliar o desempenho térmico.

Representam-se na figura 3.26, os perfis de temperaturas para a árvore A para a nova potência térmica fornecida.

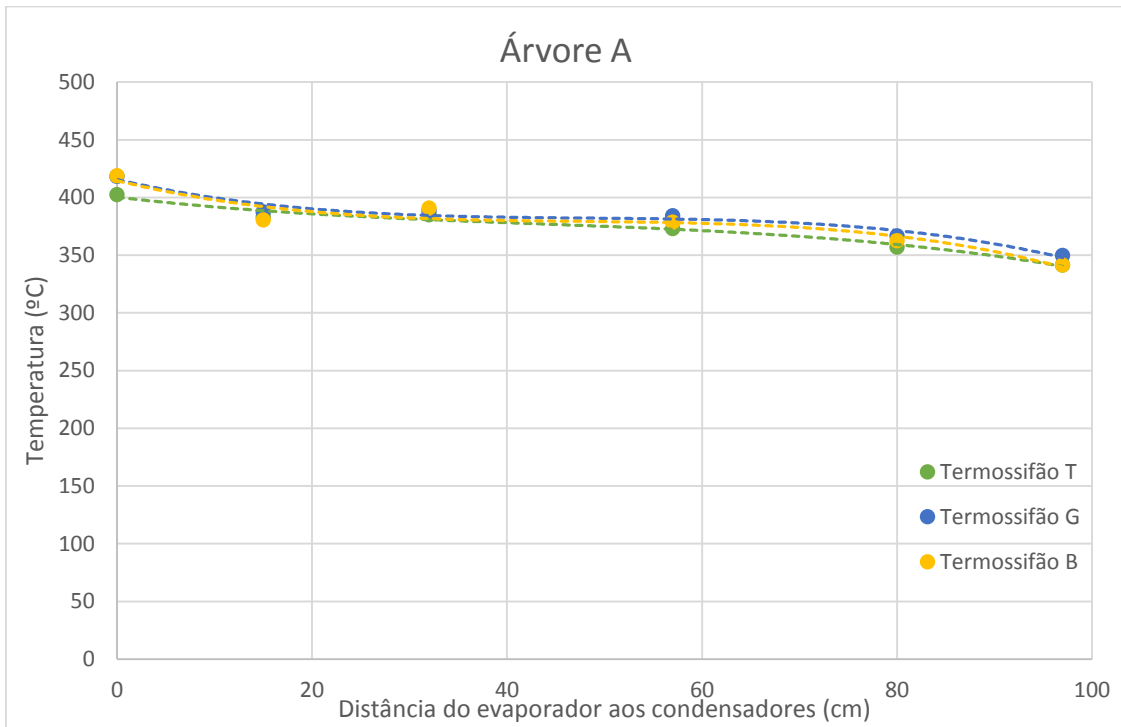


Figura 3.26 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A para uma alta potência térmica fornecida

De acordo com a figura 3.26, a região dos termosifões correspondente ao interior do forno, apresenta um baixo gradiente térmico (a temperatura varia aproximadamente 40°C). Esta homogeneidade de temperaturas garante à partida, uma distribuição de temperaturas no forno satisfatória do ponto de vista da confecção dos pastéis de nata.

Otimizada a árvore A procedeu-se de forma análoga para a árvore B.

Representam-se na figura 3.27, os perfis de temperaturas para a árvore B.

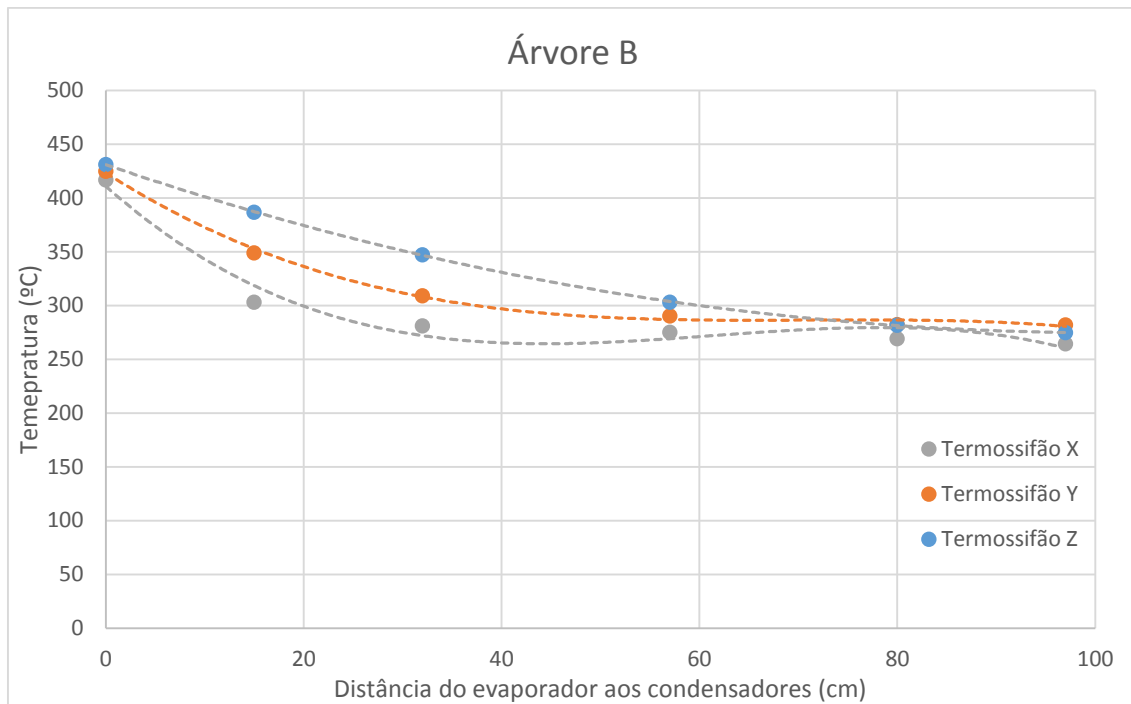


Figura 3.27 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore B (potência superior)

O desempenho da árvore B apresenta diferenças não negligenciáveis relativamente à árvore A. A temperatura inicialmente reduz-se estabilizando a partir de metade do comprimento dos termosifões. Durante o processo de fabrico desta árvore, ficou a convicção que a sua purga não teria sido tão eficiente quanto a da árvore A.

Não obstante a árvore B apresentar um comportamento térmico diferente do previsto, optou-se por instalá-la na zona superior do forno. No que à confecção dos pastéis de nata diz respeito, esta decisão nada compromete. Na prática utiliza-se uma temperatura inferior na parte superior do forno relativamente à sua base, para se obter melhores resultados do ponto de vista da confecção. O recheio é cozido em contato com a massa e forminha de metal na parte inferior do pastel e diretamente em contato com atmosfera aquecida na sua parte superior. Assim, as fontes de calor inferior e superior não devem irradiar a mesma potência térmica.

4 Metodologia Experimental e Resultados Obtidos

Para alcançar o objetivo principal deste estudo, implementar termossifões num forno para confeccionar pastéis de nata, é necessário comparar os resultados obtidos com o forno na configuração original e final. Desta forma, efetuaram-se testes com as configurações original e final do forno. O forno na sua configuração final foi inicialmente testado sem carga para se conhecer o seu comportamento térmico.

4.1 Forno na configuração original

O teste iniciou-se com o forno vazio, à temperatura ambiente, medindo a evolução das temperaturas nos 32 termopares, durante as fases de aquecimento, colocação dos tabuleiros, confecção dos pastéis e retirada dos mesmos.

O procedimento experimental consistiu:

1º Iniciou-se a aquisição de temperaturas.

2º Ligaram-se os queimadores

3º Através do sistema de aquisição de temperatura, detectou-se quando o forno atingiu a temperatura máxima (regime permanente).

4º Introdução de 2 tabuleiros cada um com 35 pastéis.

5º Quando um dos pastéis apresentou visualmente um aspeto não comercializável¹, retiraram-se os tabuleiros, dando por finalizado o ensaio.

A figura 4.1 mostra a evolução da temperatura nos diversos termopares da malha A e B.

¹ Nota de rodapé: Escolheu-se este critério para aferir a qualidade pois o aumento de tempo de cozedura conduz inequivocamente a um maior número de pastéis demasiadamente queimados.

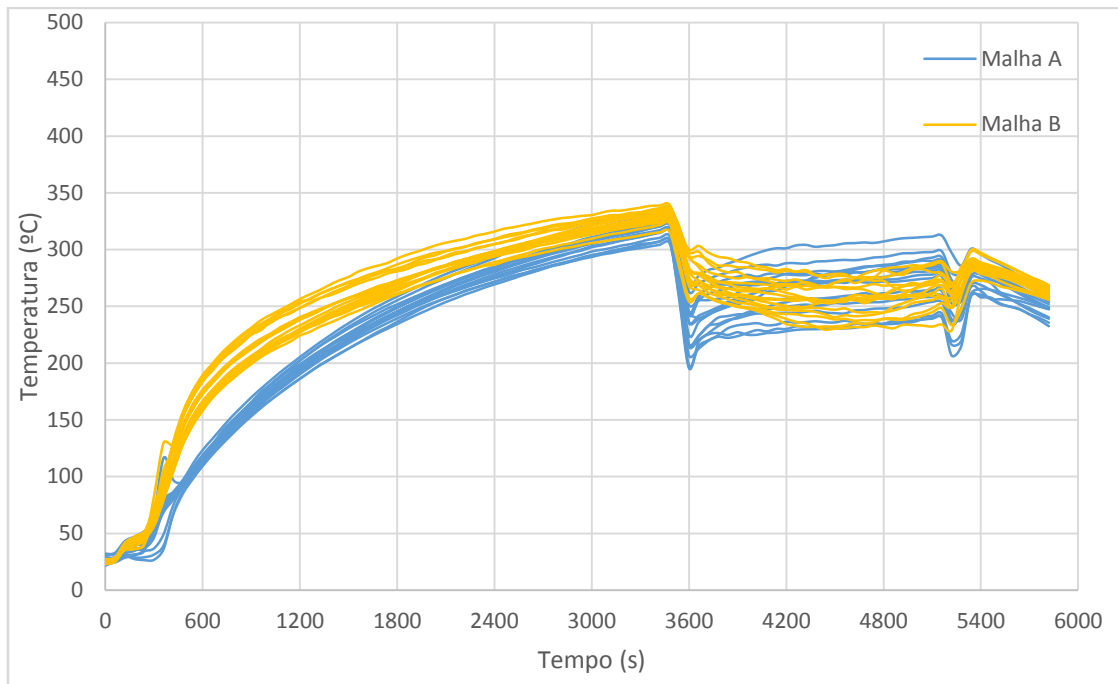


Figura 4.1 - Evolução temporal da temperatura interna do forno

A rampa de aquecimento demorou cerca de 3500 segundos para atingir a temperatura média de 320°C. Nesse instante são colocados os pastéis de nata no forno e observa-se uma queda acentuada da temperatura. O processo de cocção teve a duração de cerca de 1500 segundos (25 min) e foi possível observar um comportamento diferente para as zonas inferior e superior (malhas A e B). Enquanto as temperaturas da malha A foram aumentando durante a cocção, em B foram diminuindo. A temperatura no interior do forno durante a cocção não voltou a atingir a temperatura máxima do pré-aquecimento.

A evolução entre cada um dos termopares de cada malha foi globalmente idêntica. Desta forma optou-se por calcular a média das temperaturas nas zonas inferior e superior do forno. Estes resultados são apresentados na figura 4.2.

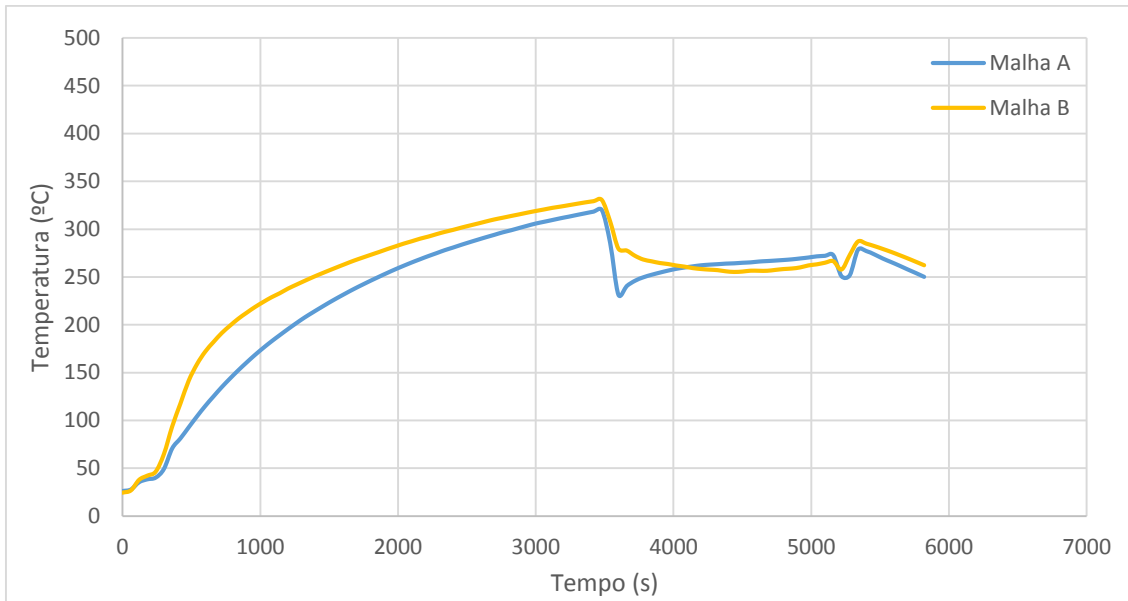


Figura 4.2 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno

Através do programa de interpolação cruzada desenvolvido em MATLAB, exposto na secção 3.4, obteve-se a distribuição espacial de temperatura na câmara de cocção. Nas figuras 4.2 e 4.3 representam-se os gradientes de temperatura nos instantes $t=3000s$ e $t=4200s$, correspondentes à temperatura máxima estabilizada durante o aquecimento antes da introdução dos tabuleiros e durante a confecção.

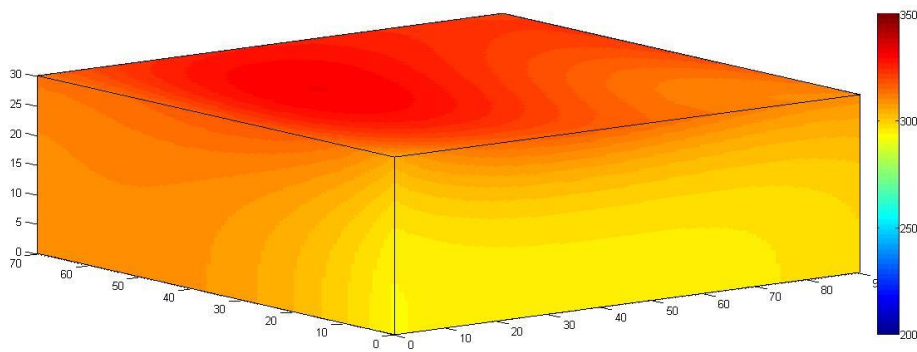


Figura 4.3 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção no instante $t=3000s$

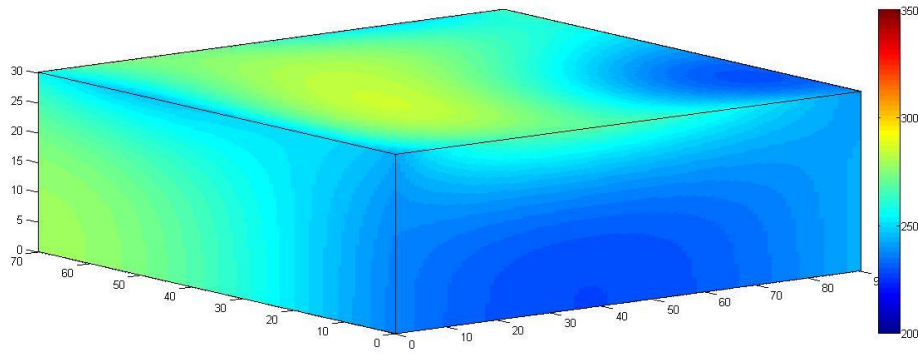


Figura 4.4 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção no instante $t=4200s$

Em ambas as situações, verifica-se uma maior concentração de calor na região superior da câmara de cocção. Embora este resultado seja natural, devido à impulsão dos gases mais quentes, não é a desejada que corresponde a uma maior disponibilidade térmica na zona da carga.

Relativamente aos pastéis, representa-se na figura 4.5 o seu aspeto antes e após a confecção. Os dois pastéis assinalados carbonizaram por falta de recheio, devendo ser ignorados.

Observe-se a coerência entre as figuras 4.5 (b) e a distribuição de temperaturas das figuras 4.3 e 4.4. A zona correspondente aos pastéis mais queimados é coerente com a região de maior temperatura.



Figura 4.5 - (a) Disposição dos pastéis nos tabuleiros (b) Resultado obtido

Durante todo este processo mediu-se o consumo de GLP por variação da massa inicial e final da respetiva botija, tendo-se obtido o valor de 1.5Kg.

4.2 Forno na configuração final

4.2.1 Forno sem carga

Antes de proceder aos ensaios com o forno carregado, achou-se prudente estudar o seu comportamento térmico sem carga. Após a otimização isolada de cada árvore, o forno foi montado na sua configuração final, não existindo portanto nenhuma experiência relativa ao seu funcionamento. Neste sentido, adotou-se o seguinte procedimento experimental:

1º Iniciou-se a aquisição de temperaturas

2º Ligaram-se todos os queimadores (os originais e os aplicados aos evaporadores) a uma baixa potência térmica.

3º Quando as temperaturas de todos os termopares posicionados nas árvores foram superiores a 250°C, desligaram-se os queimadores originais e aumentou-se a potência dos queimadores aplicados aos evaporadores.

4º Aguardou-se que o forno entrasse em regime permanente, registrando a respetiva temperatura.

A figura 4.6 mostra a evolução da temperatura no interior do forno para este teste.

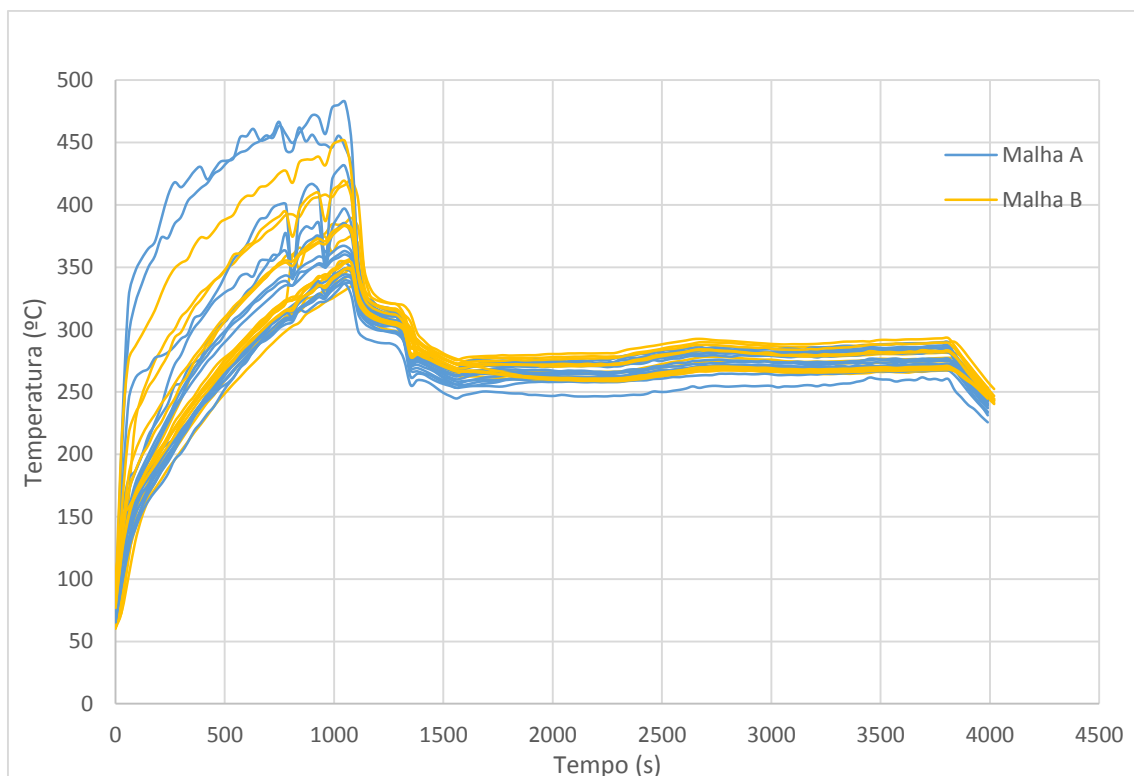


Figura 4.6 - Evolução temporal da temperatura interna do forno

A evolução entre cada um dos termopares de cada malha foi globalmente idêntica. Desta forma, optou-se novamente por calcular a média das temperaturas nas zonas inferior e superior do forno, representado na figura 4.7.

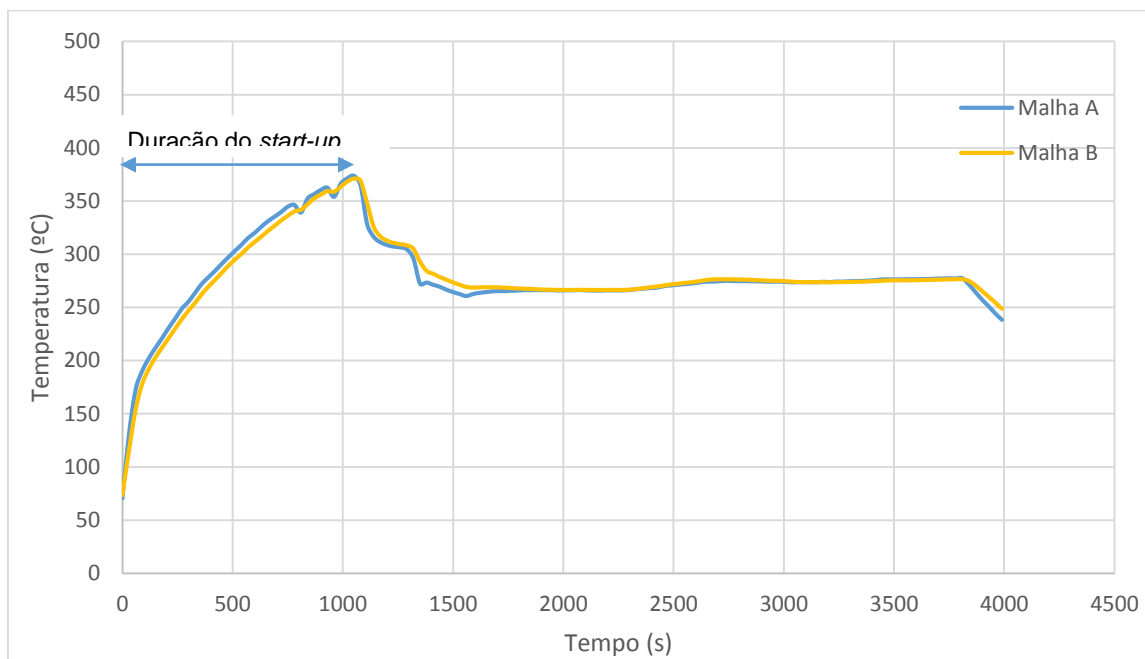


Figura 4.7 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno

O “start up” teve a duração de aproximadamente 1000 segundos (17 minutos). Neste período utilizaram-se os queimadores originais para fundir o naftaleno presente nos condensadores. Chegado à temperatura de 250°C ($T_{eb}(\text{naftaleno})= 218^{\circ}\text{C}$), aumentou-se a potência dos queimadores aplicados nos evaporadores e desligaram-se os queimadores originais. A partir deste instante, a única fonte de calor no interior do forno são os termossifões.

A temperatura no interior do forno estabiliza aproximadamente em 280°C, temperatura próxima da exigida para confeccionar os pastéis. No entanto, esta temperatura deveria ser de 300°C, pelo que nos ensaios com o forno carregado se aumentou a potência dos queimadores de flauta.

Para regime permanente, representa-se nas figuras 4.8 e 4.9 o comportamento térmico das árvores A e B.

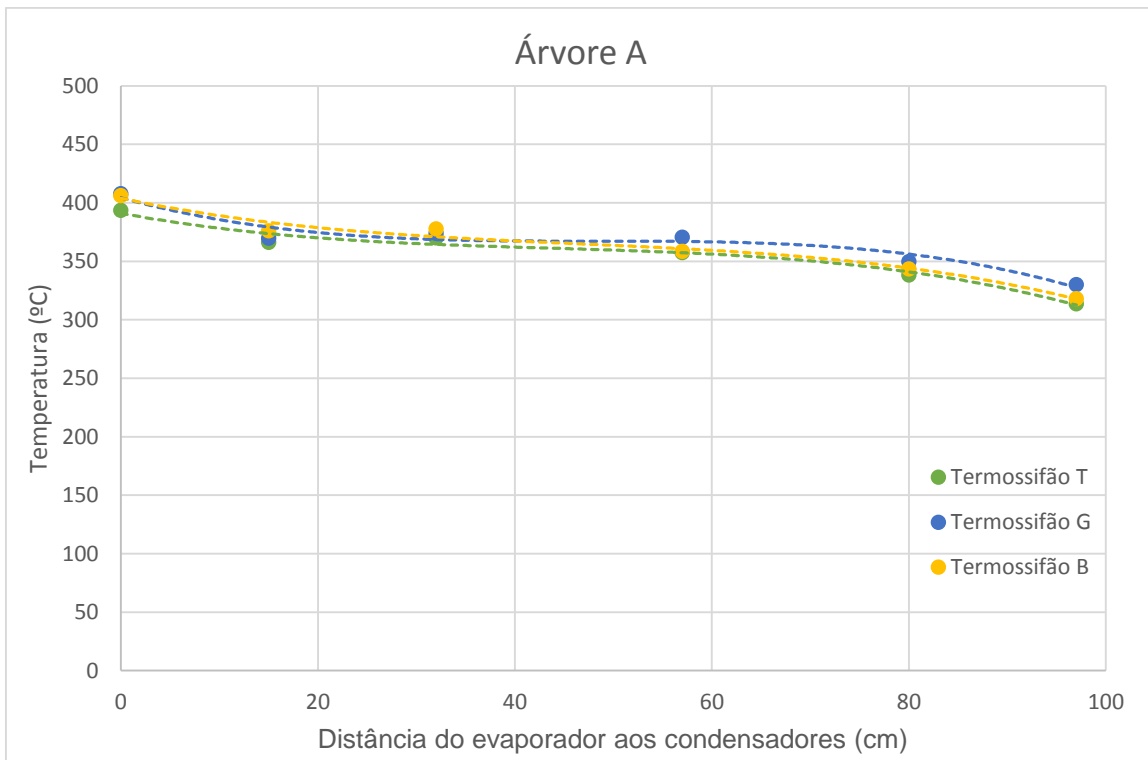


Figura 4.8 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A (t=3000s)

O comportamento térmico da árvore A, ilustrado na figura 4.8, instalada no forno na sua configuração final é semelhante ao obtido isoladamente (figura 3.26), revelando a performance desejada.

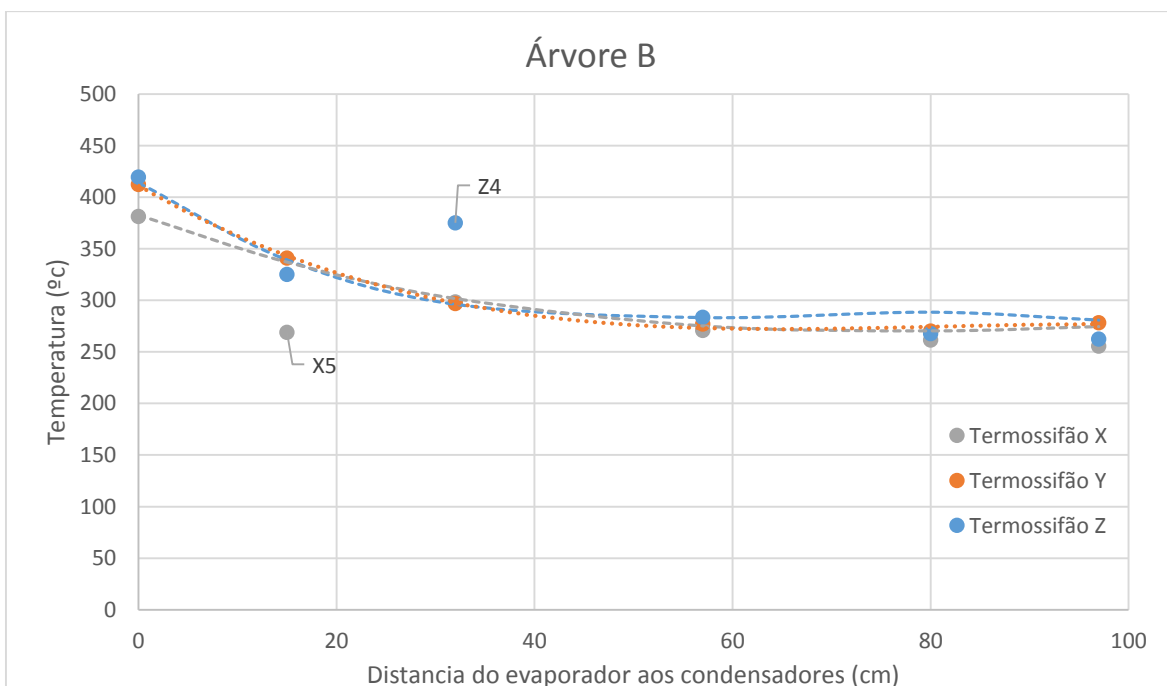


Figura 4.9 - Temperatura da parede externa do tubo em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore B (t=3000s)

O gradiente de temperatura na árvore B, ilustrado na figura 4.9, é também coerente ao obtido isoladamente (figura 3.27), apresentando as mesmas deficiências. As temperaturas relativas aos termopares X5 e Z4, não se revelaram coerentes. Na verdade, quando se retirou a árvore do forno, verificou-se que estes não estavam aderentes à mesma, registando assim a temperatura do ar na sua vizinhança. Não obstante, foi possível obter o perfil de temperaturas dos termossifões, aplicando uma regressão polinomial de ordem 3, aos dados obtidos (curvas a tracejado das figuras 4.8 e 4.9).

Através do programa de interpolação cruzada, obteve-se a distribuição de temperaturas no interior da câmara de cocção em regime permanente. O número, dimensão e distribuição dos termossifões no interior do forno, confere a homogeneidade de temperatura necessária para uma equilibrada confecção. A pequena heterogeneidade observada, parte direita do gráfico da figura 4.10, que corresponde à interface das câmaras de cocção e combustão, deve-se certamente ao fraco isolamento térmico entre ambas.

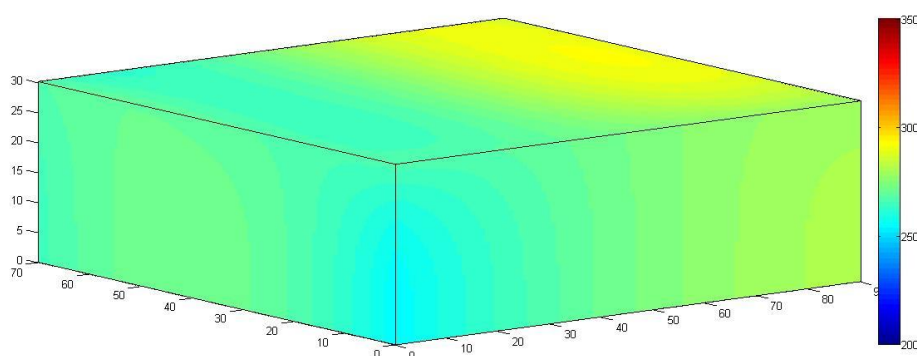


Figura 4.10 - Distribuição de temperatura interna do forno ($t=3000s$)

O teste sem carga permitiu garantir as condições de utilização do forno na sua configuração final para a confecção dos pastéis de nata, a que se dedica a próxima secção.

4.2.2 Forno carregado

Tendo o forno evoluído para uma configuração e desempenho que permitem a sua utilização na confecção dos pastéis, foi realizado um teste final comparativo com o realizado com a configuração original. Com este teste pretendeu-se validar a tecnologia nesta aplicação.

O procedimento experimental adotado foi:

1º Inicia-se a aquisição de temperaturas

2º Ligam-se todos os queimadores (os originais e os aplicados aos evaporadores) a uma baixa potência térmica (figura 4.11).

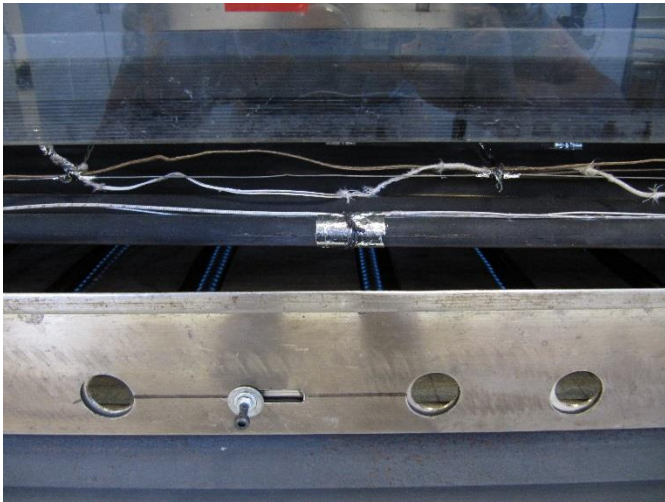


Figura 4.11 - Detalhe dos queimadores em operação a baixa potência (a) originais (b) na câmara de combustão

3º Quando a temperatura de todos os termopares posicionados nas árvores foi superior a 250°C, desligaram-se os queimadores originais e aumentou-se a potência dos queimadores aplicados (figura 4.12).

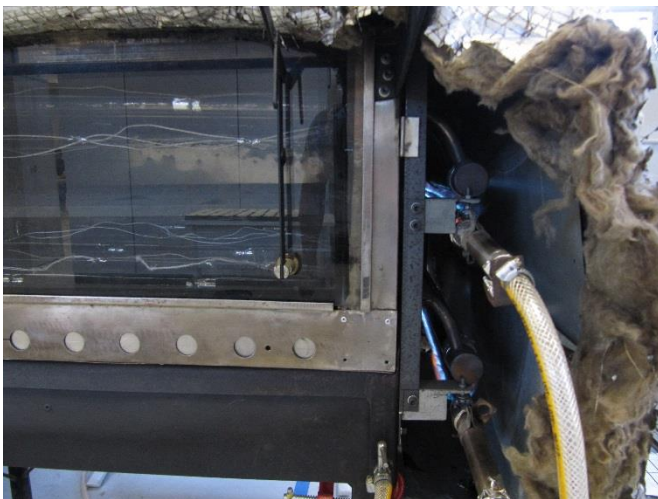


Figura 4.12 - Detalhe dos queimadores em operação a alta potência (a) originais (b) na câmara de combustão

4º Aguarda-se que o forno entre em regime permanente.

5º Introduzem-se os tabuleiros no interior do forno.

6º Quando um dos pastéis de cada tabuleiro apresentou visualmente um aspeto não comercializável retirou-se o respetivo tabuleiro.

A figura 4.13 mostra a evolução da temperatura no interior do forno para este teste.

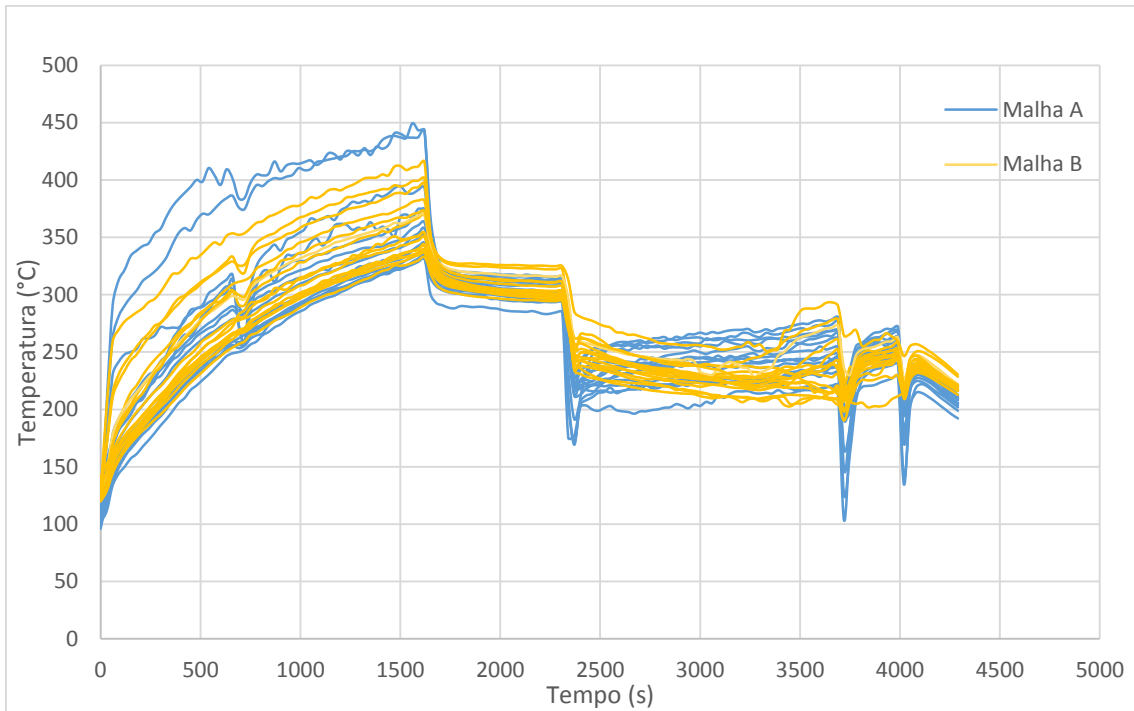


Figura 4.13 - Evolução temporal da temperatura interna do forno

A evolução entre cada um dos termopares de cada malha foi globalmente idêntica. Desta forma, optou-se novamente por calcular a média das temperaturas nas zonas inferior e superior do forno, representado na figura 4.14.

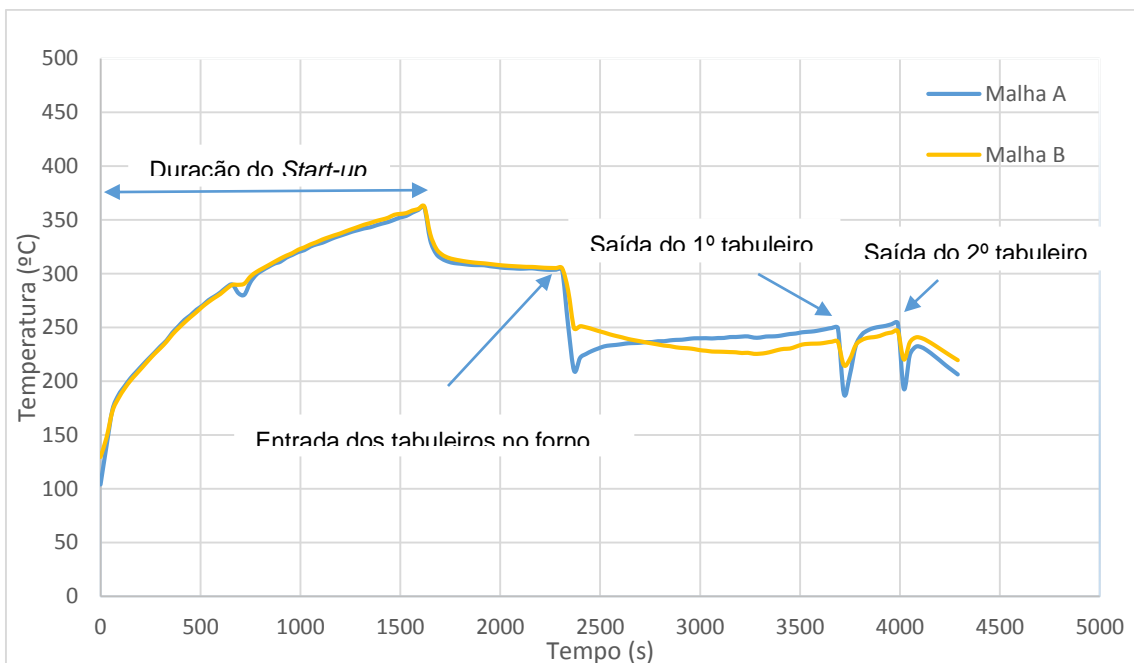


Figura 4.14 - Evolução temporal da temperatura média interna do forno

O “*start up*” teve a duração de aproximadamente 1500 segundos (25 minutos). Após este processo, a temperatura no interior do forno estabilizou aproximadamente nos 300°C. Os tabuleiros foram introduzidos no forno. A evolução das temperaturas nas malhas A e B foi semelhante ao obtido no teste com o forno original (figura 4.1), ou seja, a temperatura na malha inferior aumentou durante a cocção e a da malha superior diminuiu.

Note-se que devido à região do forno mais próxima à câmara de combustão estar a uma temperatura superior, foi necessário retirar primeiro o tabuleiro de pastéis situado nessa região. O segundo tabuleiro foi retirado aproximadamente 270 segundos (4,5 minutos) depois. Estes eventos estão ilustrados na parte final do gráfico onde se observa duas quedas acentuadas da temperatura no interior do forno. Pode-se verificar uma rápida recuperação da temperatura do forno após retirar o primeiro tabuleiro devido às características dos termossifões que têm uma grande capacidade de difusão do calor. Note-se que a temperatura no regime permanente é de 300°C devido ao aumento da potência térmica fornecida aos evaporadores. Esta temperatura tem já o valor desejado para a confecção de qualidade dos pastéis.

As distribuições de temperatura nas árvores A e B para um instante relevante durante a confecção ($t=3110s$) são representadas nas figuras 4.15 e 4.16.

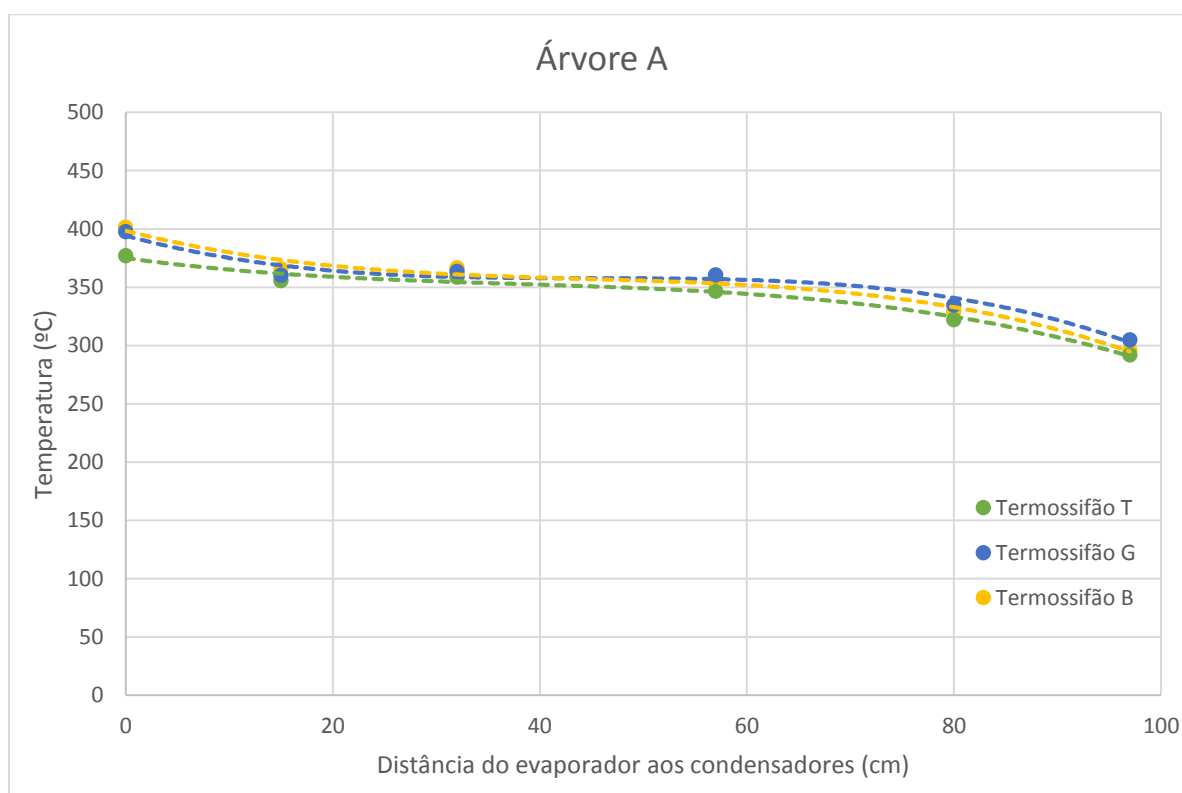


Figura 4.15 - Temperatura da parede externa dos termossifões em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore A no meio do processo de confecção ($t=3110s$)

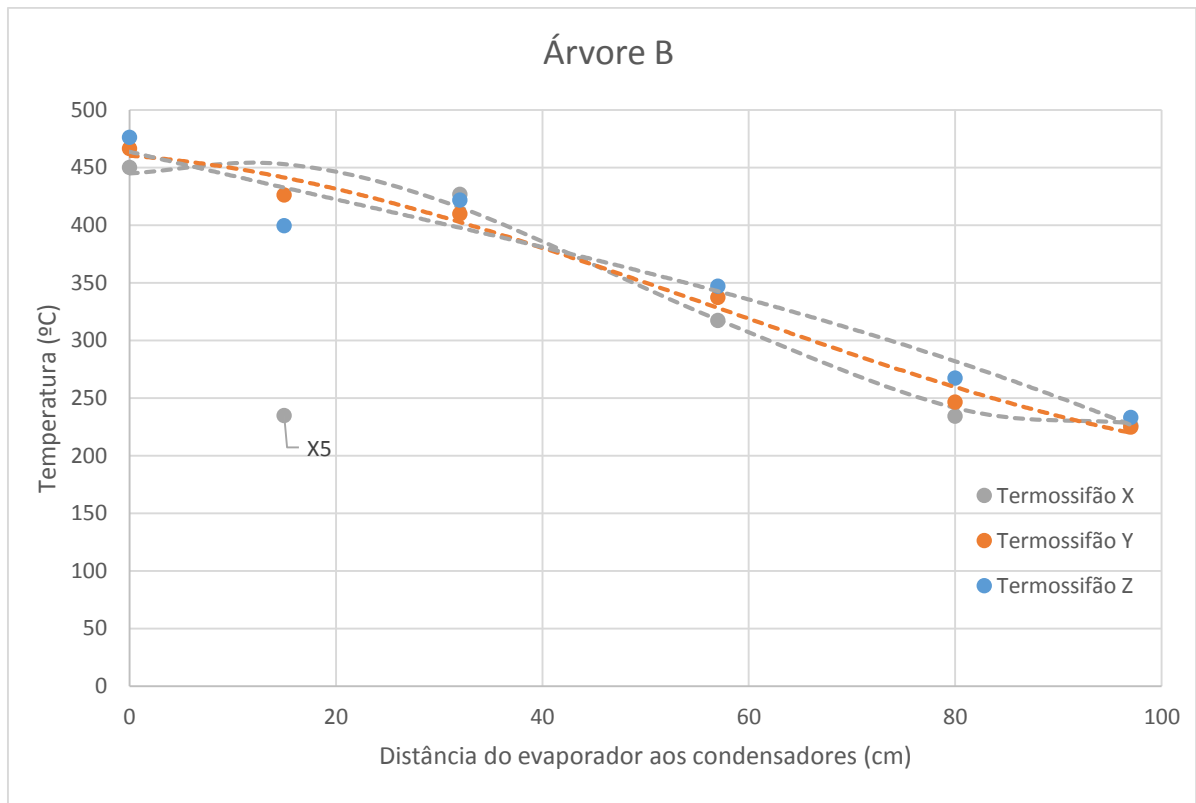


Figura 4.16 - Temperatura da parede externa dos termossifões em função da distância do evaporador aos condensadores para a árvore B no meio do processo de confecção ($t=3110$ s)

Não se considerou o termopar X5 pelas razões já apresentadas.

A árvore A mantém uma notável homogeneidade de temperatura em valores superiores a 300°C , obedecendo assim ao valor aconselhado para a confecção dos pastéis. A árvore B, pelo contrário, apresenta heterogeneidade na temperatura mantendo-se, no entanto, sempre superior a 250°C .

A distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção no instante $t=3110$ s (meio do processo) é representada na figura 4.17.

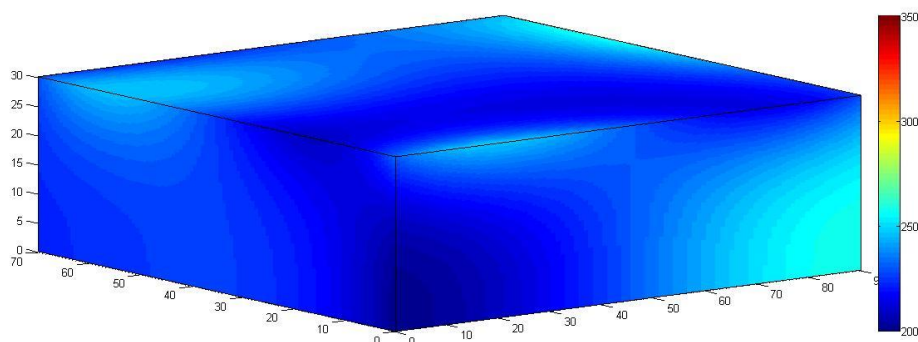


Figura 4.17 - Distribuição de temperatura no interior da câmara de cocção a meio do processo de confecção ($t=3110$ s)

Por comparação com a figura 4.5, relativa aos testes com o forno na configuração original, observa-se uma maior homogeneidade de temperatura, embora a temperatura máxima seja inferior.

Relativamente aos pastéis, representa-se na figura 4.18, o seu aspeto antes e após a confecção.



Figura 4.18 - (a) Disposição dos pastéis nos tabuleiros (b) Resultado obtido (configuração final do forno)

5 Conclusões e Sugestões

Com a execução deste trabalho, foi possível constatar que a utilização de naftaleno como fluido de trabalho em termosifões, pode ser uma boa alternativa para fornos onde se pretenda operar a temperaturas superiores a 300°C. Os resultados obtidos com o forno implementado com os termosifões mostrou uma melhor distribuição de temperaturas no interior da câmara de cocção em relação à sua versão original. Seria muito interessante realizar novos ensaios para diferentes fatores de carregamento de naftaleno com o objetivo a se chegar a um fator de carregamento ideal.

Foi possível constatar um deficiente isolamento térmico do forno, o que permitiu que o calor gerado pelos queimadores e conduzido eficientemente até à câmara de cocção se perdesse facilmente. Ainda assim, é possível observar uma clara melhoria no desempenho térmico do forno implementado com os termosifões em relação ao forno original, comprovado com o resultado obtido da confecção dos pastéis de nata, ilustrado na figura 4.18. Apesar da potência térmica ser ainda insuficiente, os resultados mostraram uma maior homogeneidade da temperatura no interior do forno. A potência máxima obtida foi limitada pela utilização de queimadores que não foram projetados para este trabalho. Como tal, não foi também possível a otimização do consumo de gás durante a confecção dos produtos.

Por observação, detectaram-se quais os pastéis que por deficiência de confecção não eram suscetíveis de comercialização. A comparação com os ensaios com o forno na configuração final permitiram realizar o estudo proposto.

Como sugestões para trabalhos futuros proponho:

- Melhorar o isolamento térmico das câmaras de combustão e cocção para evitar perdas de calor;
- Projetar resistências elétricas em bloco na região dos evaporadores para se poder controlar eficientemente a potência térmica nessa região e observar os resultados obtidos para cada potência fornecida. Com isto seria possível conhecer as potências térmicas necessárias para se obter as temperaturas requeridas no interior do forno. Esta importante informação possibilitaria projetar devidamente queimadores para sua utilização.
- Purgar eficientemente as árvores de termosifões;
- Testar outros fatores de carregamento de naftaleno no interior dos termosifões
- Desenvolver correlações para o cálculo de limites de operação para termosifões em árvore.

6 Referências Bibliográficas

- [1] MANTELLI, M. **Introdução a termossifões e suas aplicações**, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2012
- [2] PIORO, L. S. e I. L. PIORO. **Industrial two-phase thermosyphons**. New York. 1997
- [3] KOSOY, B, “**Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**”, Ed. John Wiley & Sons, 2004
- [4] BEJAN, A. **Convective Heat Transfer**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1995
- [5] MANTELLI, M. et al. **Termossifões em árvore aplicados a fornos e cocção de pães: Maior eficiência energética**. 1º Seminário da Rede gás e energia, 2006, Rio de Janeiro, 2006.
- [6] MANTELLI, M. B. H., R. D. M. CARVALHO, S. COLLE e D. U. C. MORAES. **Study of Closed Two-Phase Thermosyphons for Bakery Oven Applications**. 33th National Heat Transfer Conference. Albuquerque, New México, 1999.
- [7] INCROPERA e DEWITT. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. São Paulo: LTC. 2003
- [8] ANGELO, W. **Caracterização térmica de um termossifão bifásico de naftaleno**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007
- [9] MANTELLI et al. **Tree Configuration Thermosyphon Study**, AIAA 38th Thermophysics Conference, Toronto (2005)
- [10] MANTELLI et al. Estudo da Viabilidade do Uso de Naftaleno como Fluido de Trabalho em Termossifões. In: 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006, 2006, Curitiba.
- [11] DEVARAKONDA, A. e W. G. ANDERSON. **Thermo-Physical Properties of Intermediate Temperature Heat Pipe Fluids**. Space Technology and Applications International Forum (STAIF–2005). Albuquerque, New Mexico, February 13–17, 2005,
- [12] DEVARAKONDA, A., OLMINSKY, J. K., 2004, “**An Evaluation of Halides and Other Substances as Potential Heat Pipe Fluids**”, 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, Providence, Rhode Island.
- [13] PETERSON, G. P. **An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994
- [14] MANTELLI, M. et al. **Tecnologia de termossifões aplicada a trocadores de calor de alta temperatura**. 1º Seminário da Rede gás e energia, 2006, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] L.L. VASILIEV, G.M. VOLOKHOV, A. S. GIGEVICH, M. I. RABETSKII, “**Heat pipes based on Naphthalene**”, *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Vol. 54, No.6, pp.934- 938, 1988.
- [16] ROHSENOW, HARTNETT, CHO, “**Handbook of Heat Transfer**”, 3 ed., 1998.
- [17] PERRY, H. R., GREEN, D.W. “**Perry’s Chemical Engineers` Handbook**”, 1997, Ed. McGrawHill, New York, 7ed.
- [18] GOLDSTEIN, R. J., CHO, H. H., 1995, “**A Review of mass transfer measurements Using naphthalene sublimation**”, *Experimental Thermal and Fluid Science* , Vol. 10, pp. 416 434.
- [19] W. ANDERSON, **Intermediate temperature fluids for heat pipes and loop heat pipes**, in: Proceedings of the International Energy Conversion Engineering Conference, St. Louis, MO, 2007.

[20] TAVARES, E, **Análise térmica de uma câmara de vapor com vistas a aplicação em unidades de destilação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010

[21] DUBE, V., AKBARZADEH, A., ANDREWS, J., **“The Effects of Non-condensable Gases on the Performance of Loop Thermosyphon Heat Exchangers**. Applied Thermal Engineering, 2004

