

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE TERMOSSIFÕES APLICADO A FORNOS DE COCÇÃO DE PÃES

**Alexandre Kupka** – kupka@labsolar.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Mecânica  
C.P. - 476 – Campus Universitário – Trindade  
88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil

**Marcia B. H. Mantelli** – marcia@labsolar.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Matemática  
Campus Universitário – Trindade  
Florianópolis – SC – Brasil

**Ricardo Assis Penteado** – boto@labsolar.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Mecânica  
C.P. - 476 – Campus Universitário – Trindade  
88040-900 – Florianópolis – SC – Brasil

***Resumo.** O presente artigo visa estudar o comportamento de termossifões aplicado a fornos de cocção, enfatizando a conservação de energia e o melhoramento da qualidade final do produto. Um protótipo simulando uma seção interna de um forno comercial foi construído para a realização do estudo experimental. Termossifões de aço inox/água foram instalados verticalmente nas paredes laterais do protótipo. Devido as ótimas características condutivas dos termossifões, estes melhoraram a distribuição de temperatura dentro do forno, reduzindo o gasto de energia e evitando o mal cozimento dos alimentos. Através deste estudo, deseja-se também substituir a energia elétrica ou GLP por gás natural em fornos de cocção. O gás natural é um combustível menos nocivo à atmosfera que o GLP, já estando disponível na região sul do Brasil com a implantação do gasoduto Brasil/Bolívia. A combustão do gás acontece numa câmara separada. Com isso somente ar aquecido estará em contato com o alimento.*

***Palavras-chave:** Termossifão, fornos de cocção, convecção natural em cavidade.*

### 1. INTRODUÇÃO

Diante da crise energética que assola nosso país, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas visando um melhor aproveitamento dos recursos energéticos existentes, bem como sua diversificação. Bons exemplos são os avanços da tecnologia de cogeração e a construção do gasoduto Brasil/Bolívia, que disponibilizará gás natural boliviano na região centro-sul do

país. Na intenção de se tornarem mais competitivas, as empresas buscam por fontes energéticas mais baratas, processos fabris mais eficientes, aumento de produtividade e melhoria da qualidade do produto final.

A energia elétrica que tem se tornado escassa e cara, é usualmente utilizada como fonte energética em fornos de cocção de pães no Brasil. Uma pesquisa foi iniciada no Núcleo de Controle Térmico de Satélites (NCTS) da Universidade Federal de Santa Catarina, visando a substituição da energia elétrica ou GLP por gás natural nestes fornos, bem como a redução de consumo de gás combustível ou energia elétrica. Assim sendo, faz-se necessário um dispositivo que separe fisicamente, mas não termicamente, as câmaras de cocção e combustão. Este dispositivo deve apresentar características como, excelente condutividade térmica e simplicidade construtiva, de modo a ser viável técnica e economicamente.

Partindo destas características básicas, optou-se pela utilização de termossifões de duas fases. Tal dispositivo consiste de um tubo metálico fechado em ambas as extremidades, sendo previamente limpo, evacuado e carregado com fluido de trabalho. A grande capacidade de transferência de calor dos termossifões deve-se a mudança de fase do fluido de trabalho em seu interior. Assim, calor é injetado no evaporador fazendo seu fluido de trabalho evaporar e subir até o condensador por diferença de pressão, onde calor é rejeitado e o fluido retorna ao evaporador por gravidade, escoando pela parede interna do tubo e fechando o ciclo. Este processo pode ser visto na Fig. 1. Como o fluido de trabalho está sempre saturado no interior do termossifão, independente de sua temperatura de operação, é possível garantir uma temperatura praticamente uniforme em seu condensador. Assim sendo, espera-se atingir os patamares de temperatura necessários para a perfeita cocção do alimento em todo o volume do forno.

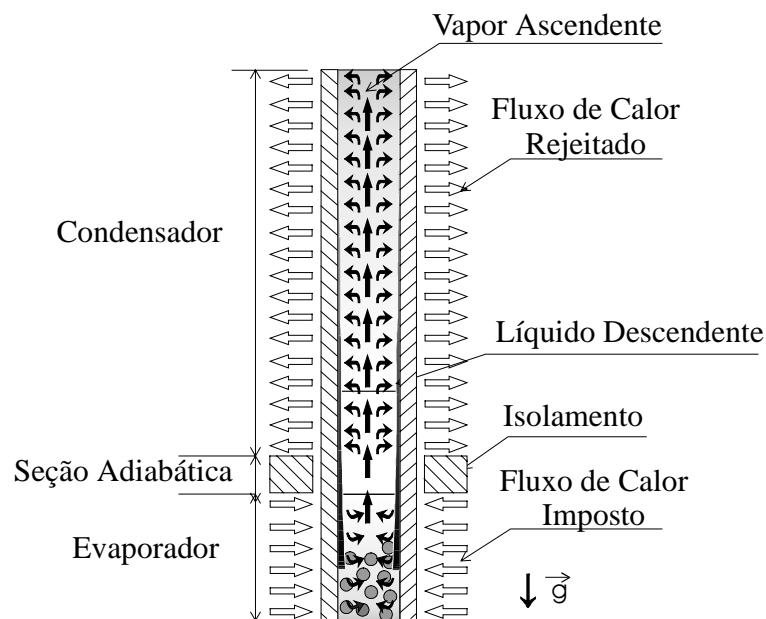


Figura 1 – Descrição do funcionamento do termossifão.

Para facilitar a adaptação dos termossifões em fornos já existentes, uma nova concepção dimensional se fez necessária. A maioria dos termossifões estudados na literatura apresentam comprimentos aproximadamente equivalentes para o evaporador, condensador e seção adiabática. Os termossifões propostos são caracterizados por um grande condensador, uma pequeno evaporador e praticamente a inexistência de seção adiabática. Assim, uma pesquisa preliminar apresentada por Mantelli *et al.* (1999), visou determinar o

comportamento dos termossifões com tais dimensões. Para tal foi montada uma bancada experimental onde foram medidos os coeficientes de transferência de calor do evaporador e do condensador separadamente.

A escolha das correlações que melhor representam o comportamento do termossifão estudado não é uma tarefa trivial devido a complexidade dos fenômenos físicos envolvidos na ebulição e na condensação do filme líquido. Inúmeras correlações são encontradas na literatura para a determinação dos coeficientes de transferência de calor no evaporador e no condensador. A maioria destas correlações para o condensador baseiam-se na teoria de Nusselt, desenvolvida para a condensação de um filme laminar numa placa vertical, conforme mostram Incropera & Witt (1996) e Bejan (1993). Da mesma forma, para estimar o coeficiente de transferência de calor em regime laminar no evaporador, algumas teorias se baseiam na Teoria de Nusselt, como em Faghri, (1995). El-Genk & Saber (1998) propõem outras correlações, dividindo o evaporador em duas regiões: filme líquido e piscina, para três regimes distintos, convecção laminar, ebulição nucleada e a combinação de convecção laminar e ebulição nucleada.

Mantelli *et al.* (1999) mostram que as correlações de El-Genk & Saber (1998) são mais adequadas para estimar o coeficiente de transferência de calor no evaporador, de um termossifão semelhante ao da Fig. 1. Similarmente as correlações de Kaminaga *et al.* (1992), se mostraram as mais adequadas para a determinação do coeficiente de transferência de calor no condensador. Com este estudo, Mantelli *et al.* (1999) comprovou o desempenho de termossifões com tais características dimensionais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mudança de fase como meio de transferência de calor é utilizada desde meados do século passado em fornos de cocção. Uma economia de 25% de combustível em fornos que utilizavam termossifões, quando comparados com os fornos convencionas da época, foi conseguida nos “Fornos Perkins”, como mostram Dunn & Reay (1993). Estes fornos utilizavam termossifões inclinados, quase na posição horizontal, o que prejudica a performance do termossifão, que depende da força da gravidade para operar. Outro problema encontrado neste tipo de equipamento, era a ausência de um controle eficiente da temperatura da câmara de combustão, o que ocasionava uma séria de explosões danificando o equipamento e denegrindo a imagem desta concepção de forno.

Termossifões também foram utilizados recentemente como trocadores de calor, ar-ar, para reaproveitar o calor perdido por gases que fazem a cocção do alimento, de modo a fazer um pré-aquecimento do alimento antes da cocção definitiva, conforme apresentado por Lukitobudi *et al.* (1994). Estes termossifões foram instalados numa indústria, alcançando uma economia de energia 500 GJ/ano, o que representa retorno de investimento em cerca de 3,5 anos.

## 3. BANCADA EXPERIMENTAL

Para a análise experimental, um protótipo simulando a seção interna de um forno comercial foi construído, onde quatro termossifões foram instalados verticalmente em suas paredes laterais. Para poder dimensionar o protótipo, foi feito um breve estudo das dimensões de fornos comerciais. Assim pode-se construir termossifões que se adaptassem às dimensões dos fornos encontrados no comércio. As dimensões da área útil frontal do protótipo são  $a=(1000/2)$ mm de altura e  $b=750$ mm de largura. Na Fig. 2 tem-se um desenho esquemático da bancada de testes.

Primeiramente pretendia-se utilizar a convecção natural como principal mecanismo de troca de calor entre os termossifões e a câmara de cocção. Porém os primeiros testes mostraram ineficiência deste mecanismo de transferência de calor para tal aplicação. Assim, foram instaladas aletas, uma nova resistência inferior e dois ventiladores para provocar ventilação forçada, objetivando homogeneizar a temperatura interna do protótipo.

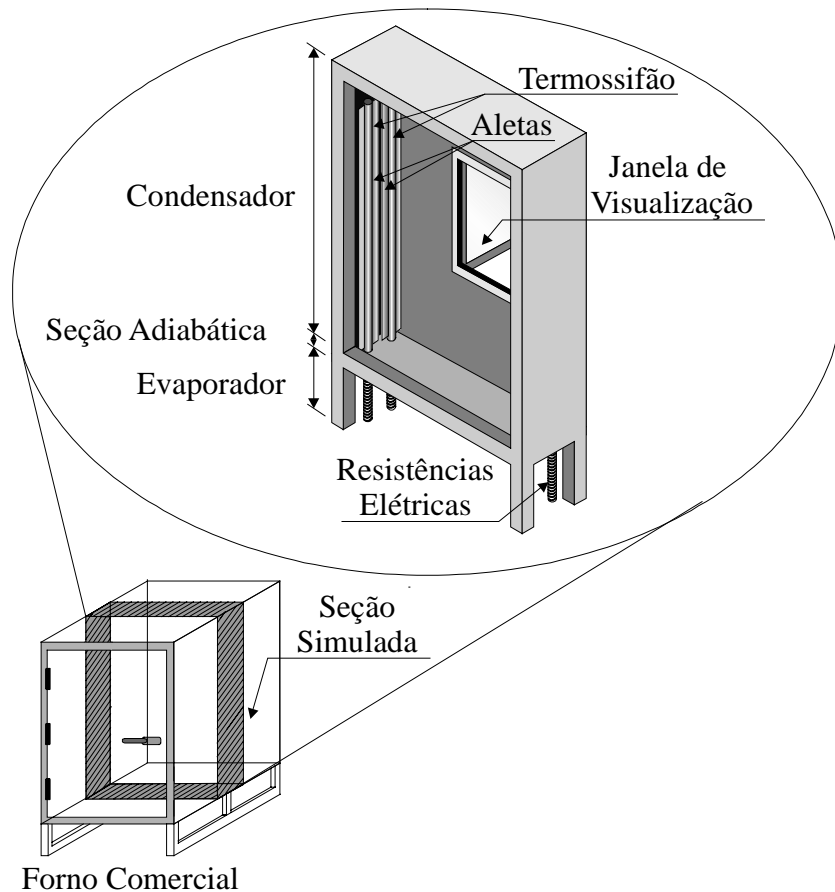


Figura 2 – Detalhamento da bancada experimental.

A configuração escolhida para os termossifões foi aço inox/água, devido a robustez e durabilidade do aço inox, já que os tubos serão expostos a altas pressões, aliado ao fato de que este material é propício para a indústria alimentícia. A água foi escolhida como fluido de trabalho por ser barata, segura e apresentar um bom comportamento em termos de capacidade de transferência de calor para a temperatura de trabalho imposta, de 250 à 300 °C, como mostra Peterson (1994).

Os termossifões tem um comprimento total de 1220mm, onde 1000mm corresponde ao condensador, alojado na câmara de cocção, 200mm correspondem ao evaporador, localizado na câmara de combustão, e os 20mm restantes são da seção adiabática, dimensão esta responsável pela separação física entre as câmaras de combustão e cocção. O calor fornecido aos evaporadores dos termossifões é proveniente de resistências elétricas. O diâmetro externo é de 19,05mm e o interno é 16,05mm. A razão de enchimento foi de 60% do volume do evaporador, cerca de 27ml de água, como indicam El-Genk & Saber, (1998).

Aproximadamente 50 termopares foram instalados ao longo do protótipo, distribuídos sobre os termossifões, paredes e a câmara de cocção. Com estes termopares torna-se possível verificar a distribuição de temperatura do protótipo.

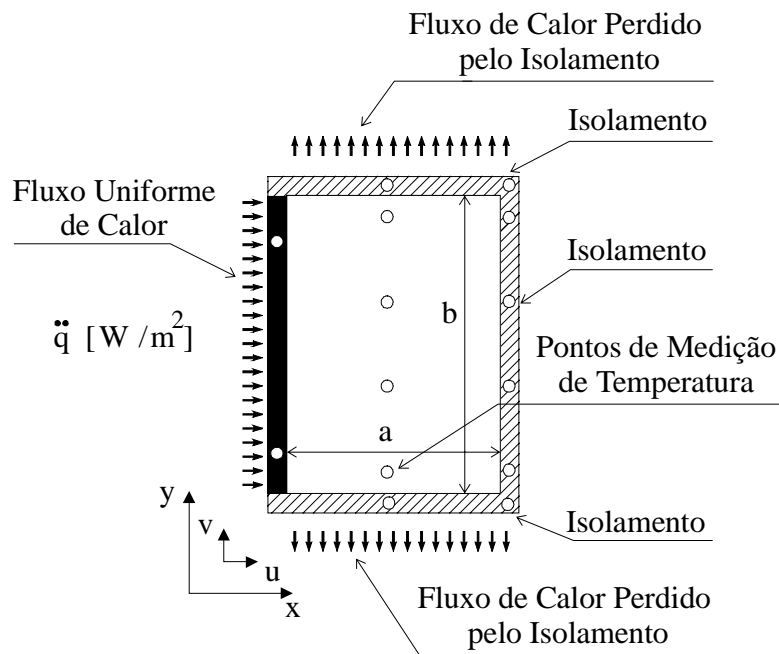


Figura 3 – Modelo físico considerado.

Para tornar o experimento economicamente viável, o protótipo representa uma “fatia” de um forno comercial, considerando adiabáticas as paredes anterior e posterior do protótipo. Devido a simetria do protótipo, a seção central foi considerada adiabática, de forma que o modelo físico apresentado na Fig. 3 pode ser utilizado.

#### 4. TESTES EXPERIMENTAIS

Foram feitas alterações no protótipo ao longo dos quatro testes visando melhorar sua distribuição de temperatura. Para cada configuração foi realizado um teste, onde a potência era aplicada nos evaporadores em intervalos de tempo previamente definidos. A potência era aumentada de 50W em intervalos de 60 minutos, sendo este o tempo considerado necessário para que o regime permanente fosse alcançado. As medições de temperatura eram feitas e armazenadas por um sistema de aquisição acoplado ao protótipo, em intervalos de 5 segundos.

Os testes partiam da temperatura ambiente. Estes tiveram um período de duração diferenciado por medida de segurança, para evitar que a temperatura do evaporador subisse demasiadamente. A temperatura de 260°C no evaporador foi escolhida como parâmetro de parada do teste, visto que a partir desta temperatura, inicia-se a deterioração do isolamento das resistências acopladas aos evaporadores. A duração e a descrição de cada teste é apresentada na Fig. 4 e na Tabela. 1 respectivamente.

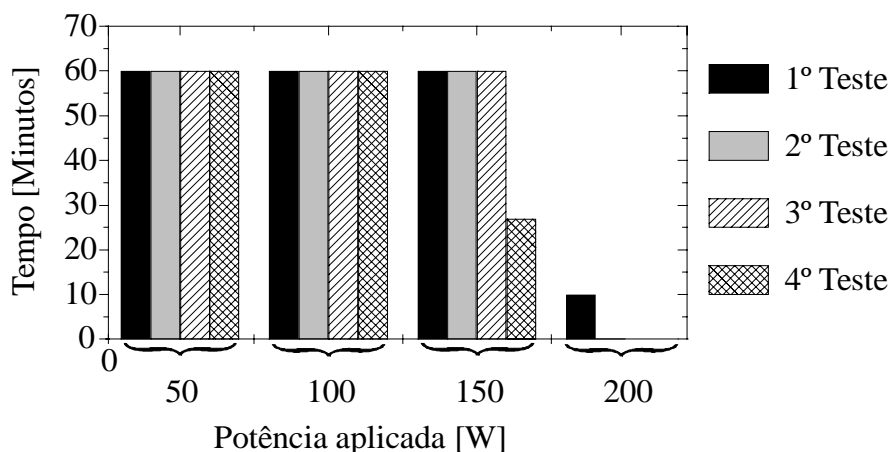


Figura 4 – Duração de cada teste em função da potência aplicada em cada evaporador.

Tabela 1. Descrição dos testes.

	Duração Total [minutos]	Descrição do Teste
1° Teste	190	Termossifões com 4 aletas cada. Protótipo com resistência inferior e com 2 ventiladores.
2° Teste	136	Termossifões com 4 aletas cada. Protótipo com resistência inferior e sem ventiladores.
3° Teste	170	Termossifões com 4 aletas cada. Protótipo sem resistência inferior e sem ventiladores.
4° Teste	147	Termossifões com 2 aletas cada. Protótipo sem resistência inferior e sem ventiladores.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com os dados obtidos pelo sistema de aquisição é possível obter a distribuição de temperatura no interior do forno para os quatro testes, conforme mostra a Fig. 5. Como estes tiveram uma duração diferenciada, optou-se pela plotagem da distribuição de temperatura relativo ao momento de parada do teste mais curto, Teste-02. Assim, pode-se comparar a influência na distribuição de temperatura das modificações feitas no protótipo.

O melhor resultado encontrado é referente ao Teste-1, onde a convecção forçada gera uma distribuição de temperatura mais alta e uniforme. Nos demais gráficos, Testes-2, 3 e 4, a transferência de calor interna é devido à convecção natural entre os condensadores e o ar, difusão de calor através do ar, e as trocas radiativas entre os condensadores, aletas e as paredes internas do forno. Com isso, vê-se a ineficácia destes mecanismos de transferência de calor para a rápida homogeneização da temperatura interna do forno.

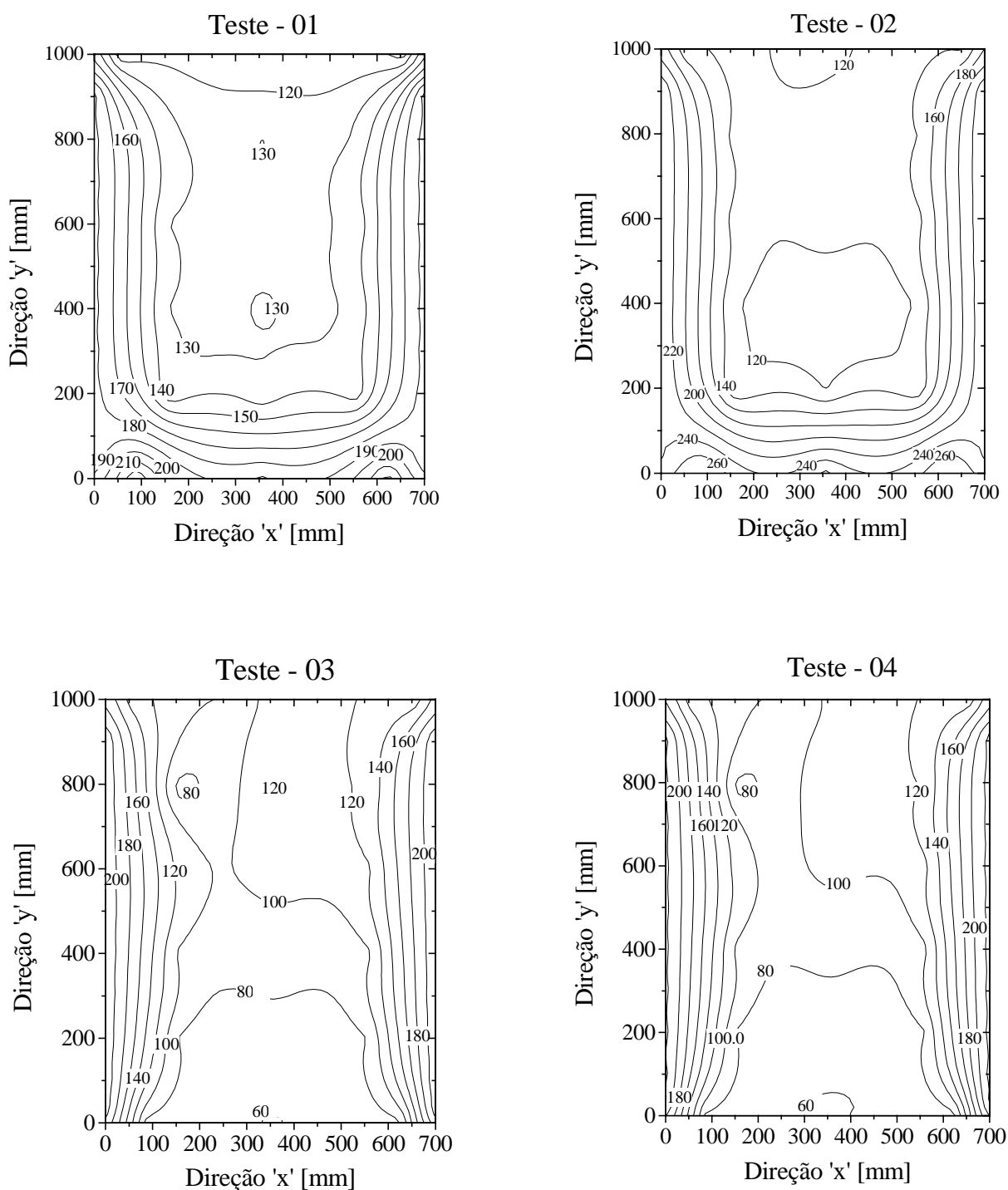


Figura 5 – Distribuição de temperatura no interior do forno, tempo igual a 136 minutos.

Na Fig. 6 e na Fig. 7 mostra-se a variação vertical da temperatura para cada teste no centro do protótipo, sendo que na Fig. 6 as medidas foram tomadas em um tempo igual à 136 minutos, e na Fig. 7, as medidas foram tomadas no instante final de cada teste. Na Fig. 7, a influência da convecção forçada é melhor verificada, quando comparada com a Fig. 6, pois o Teste-1 apresenta temperaturas médias superiores aos demais testes, em cerca de 30°C.

Apesar da melhora na uniformização da temperatura, este gradiente de temperatura ainda pode ser reduzido com a colocação de ventiladores mais potentes. Com esta análise preliminar, pode-se constatar a necessidade do uso da convecção forçada para a uniformização da temperatura interna

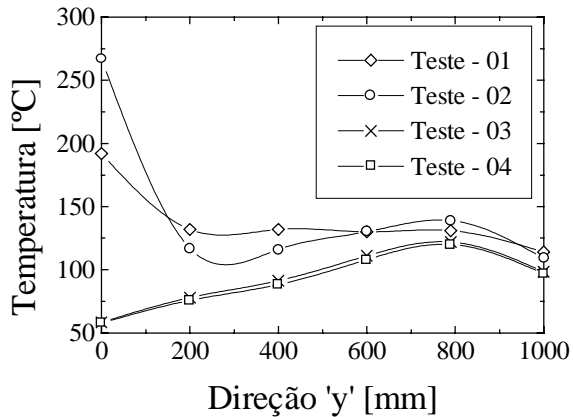


Fig. 6 - Variação vertical da temperatura no centro do protótipo, tempo igual à 136 min.

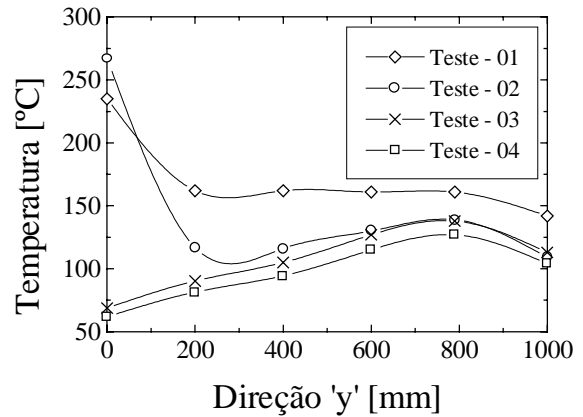


Fig. 7 - Variação vertical da temperatura no centro do protótipo, tempo total do teste.

Note-se que o gradiente de temperatura nos condensadores dos quatro termosifões é muito pequeno, 2 a 3 °C, quando comparado com o gradiente do ar aquecido. A variação média entre as temperaturas do evaporador e do condensador foi de 10 °C. Assim, pode-se concluir que os termosifões são adequados para esta aplicação, pois garantem uma distribuição de temperatura praticamente uniforme na câmara de cocção, restando agora melhorar a transferência de calor dos condensadores para o ambiente de cocção.

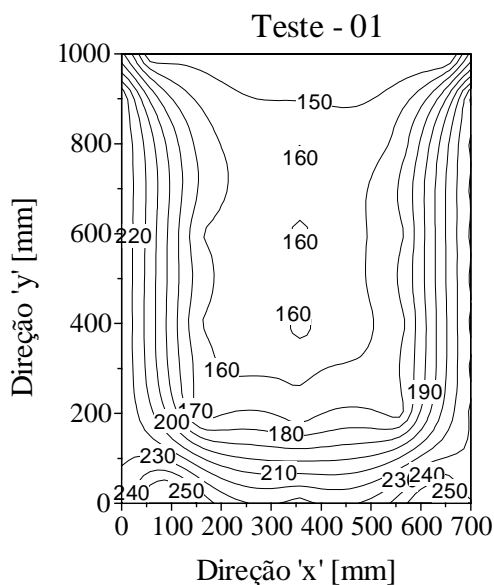


Fig. 8 – Distribuição de temperatura após 190 minutos de teste.

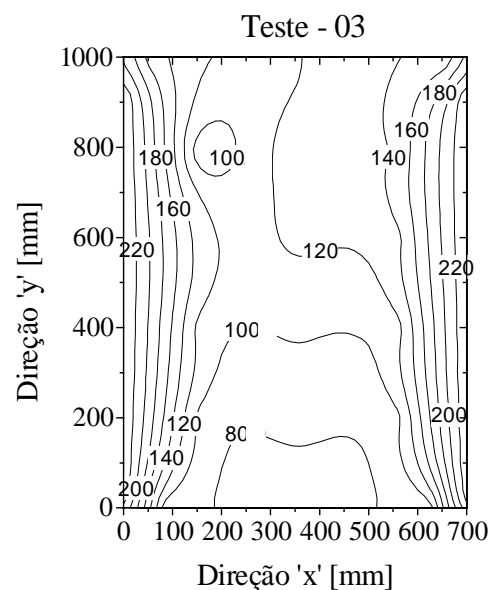


Fig. 9 – Distribuição de temperatura após 170 minutos de teste.



Nas Figs. 8 e 9 são apresentadas as distribuições de temperatura do protótipo no momento de parada dos Testes-1 e 3. Observa-se claramente a importância das resistências inferiores e dos ventiladores na distribuição interna de temperatura, o fator comum entre as duas configurações é a temperatura limite do evaporador. Também é importante observar a pequena influência da difusividade do ar na homogeneização da temperatura interna do protótipo.

## 6. CONCLUSÕES

Estes primeiros testes mostram a eficiência e aplicabilidade dos termosifões a fornos de cocção de pães e também mostram que os esforços futuros devem ser de uniformizar a temperatura interna do forno. A convecção natural entre os condensadores e o ambiente mostrou não ser o principal mecanismo de transferência de calor entre os condensadores e o ar aquecido. A troca radiativa existente entre os condensadores as paredes internas do protótipo e o alimento a ser assado é de extrema importância, devido aos altos níveis de temperatura alcançados pelo condensador.

Como todo o interior do protótipo é de origem metálica, ou seja, baixa absorvidade e grande emissividade, grande parte do calor trocado entre os condensadores e as paredes fica simplesmente em trânsito no interior do forno, sofrendo múltiplas reflexões sendo absorvido pela superfície do alimento, já que o ar pode ser considerado como um meio transparente.

Como consequência destas múltiplas reflexões, as paredes não elevam de forma significativa suas temperaturas, e desta forma contribuem pouco de forma convectiva. Logo, para melhorar a troca radiativa, deve-se cobrir os condensadores com uma tinta de grande emissividade, e as paredes com uma tinta de baixa absorvidade, pois desta forma todas as paredes internas irão refletir o calor proveniente dos condensadores entre si e para o produto na câmara de cocção.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem aos colegas, Milton.M. P. Seifert e Edevaldo.B. Reinaldo, por sua ajuda no projeto, fabricação e montagem do protótipo experimental. Ao bolsista I.C. Lindomeilo J. de Souza por sua dedicação no aprimoramento do mesmo, a todos os professores que contribuíram para realização deste estudo, e também agradecem à CAPES e a Agência Espacial Brasileira (AEB) pelo financiamento do projeto.

## 7. REFERÊNCIAS

- Bejan, A., 1993, Heat Transfer, John Willey & Sons, INC., New York.
- Dunn, P. D. & Reay, D. A., 1993, Heat Pipes, Elsevier Science, New York .
- El-Genk, M. S., e Saber, H. H., 1998, Thermal Conduance of the Evaporator Section of Closed Two-phase Thermosyphons (CTPTs), AIAA/ASME Joint Thermophysic and Heat Transfer Conference, vol. 3, pp. 99-106.
- Faghri, A., 1995, Heat Pipe Science and Technology, Taylor and Francis, Washington.
- Incropera, F.P., De Witt, D. P., 1996, Fundamental of Heat and Mass Transfer, John Willey & Sons, Nova Iorque, 4<sup>th</sup> edição.
- Kaminaga, F., Hashimoto, H., Feroz M.D.C., Goto, K., and Matsumura, K., 1992, Heat Transfer Characteristics of Evaporation and Condesation in Two-Phase Closed Thermosyphons, 8<sup>th</sup> IHPC, Beijing, China.

- Lukitobudi, A. R., Akbarzadeh, A., Johnson, P. W., Hendy, P., 1994, Design, Construction and Testing of a Thermosyphon Heat Exchange for Medium Temperature Heat Recovery in Bakeries, Heat Recovery Systems & CHP, vol.15, n. 5, pp. 481-491.
- Mantelli, M. B. H., Colle, S., Moraes, D. U. C., Carvalho, R. D. M., 1999, Study of Two-Phase Thermosyphons for Bakeries Oven Applications, 33<sup>rd</sup> National Heat Transfer Conference, Albuquerque, New Mexico.
- Peterson, G. P., 1994, An introduction to Heat Pipes - Modeling, Testing and Applications, John Wiley & Sons, INC.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THERMOSYPHONS APPLIED IN BAKERY OVENS**

**Abstract.** *The present paper study thermosyphons applied to bakery ovens with special attention in the energy conservation and the quality of final baked product. A prototype simulating one internal section of a commercial oven was built for the experimental study. Stainless steel/water thermosyphons are installed vertically, close to the two lateral walls of this section. The thermosyphons are very efficient heat exchangers and improves the temperature distribution inside the oven, saving energy and avoiding the product waste by under or overcooking. This research also intends to replace electric power and GLP by natural gas as the energy source, that is available in the South of Brazil, after the recent implantation of the Brazil/Bolivia gas line. The gas combustion happens in a separated chamber, so that, just the heated air are in contact with the bread in the cooking chamber. The final product has better quality and is free from the combustion residues.*

**Key-Words:** Thermosyphon, bakery oven, natural convection in enclosures.