

1º Seminário da **1. Rede Gás & Energia**

TERMOSSIFÕES EM ÁRVORE APLICADOS A FORNOS DE COCÇÃO DE PÃES: MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Mantelli, M.B.H.¹, Milanez, F. H.², Martins, G. J. M.³, Zimmermman, R.⁴, Nuereberg S⁵
Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica - LABTUCAL
Campus Universitário - Trindade - Florianópolis - SC - CEP: 88040-900

marcia@emc.ufsc.br¹, milanez@labtucal.ufsc.br², gerald@labtucal.ufsc.br³, zimmermman@labtucal.ufsc.br⁴,
charles@labtucal.ufsc.br⁵

RESUMO

Historicamente, as padarias têm sido grandes consumidoras de gás no Brasil, perdendo apenas para a indústria em geral e para o consumo doméstico. Porém, com o aumento do custo do gás GLP, muitas padarias substituíram o gás pela eletricidade ou ultimamente, pela lenha. Estas duas fontes de energia apresentam grandes problemas tanto econômicos como ecológicos ao país. Com financiamento do CENPES/Petrobrás e da FINEP, o Laboratório de Tubos de Calor (LABTUCAL) tem trabalhado no desenvolvimento de fornos de cocção de pães, visando à substituição da energia elétrica para o gás natural, ao mesmo tempo em que busca uma maior eficiência energética do equipamento. Em uma primeira fase de desenvolvimento, um kit de feixes de tubos termossifões foi adaptado a um forno elétrico do mercado.

O sucesso deste primeiro empreendimento levou o LABTUCAL a melhorias no equipamento. Hoje o feixe de tubos foi substituído por apenas dois tubos em formato de árvore instalados próximos as paredes laterais internas do forno já construído para abrigar este dispositivo. Como resultado, obtém-se uma distribuição de temperaturas na cavidade de cocção extremamente uniforme, garantindo grande controle da qualidade do produto, e ao mesmo tempo uma economia de energia de até 50% de gás, quando comparado com fornos do mercado. Esta tecnologia também permite, com o auxílio do ventilador, uma maior flexibilidade ao forno, que é capaz de assar produtos que demandam grande radiação térmica como pizzas e aqueles cujo processo de aquecimento e cocção é mais lento, por convecção.

Palavras-chave: forno de cocção a gás, termossifão bifásico tipo árvore, economia energética

ABSTRACT

Historically, bakery cooking have been big gas consumers in Brazil, second only to Industry and home cooking and heating. However, rising gas costs led bakery owners to switch to electricity and firewood. These two conceptions bring big economic and environmental problems. With the funding of CENPES/Petrobras and FINEP, the Heat Pipe Laboratory of Federal University of Santa Catarina has been developing bakery ovens operating with natural gas. The aim is to obtain a more efficient product. In the first phase of the project, it was developed a kit to convert electric bakery ovens to operate with gas. The system employs de two-phase thermosyphon technology to transfer the heat from a combustion chamber to the cooking chamber.

Given the success obtained with the conversion kit, it was decides to extend the development to a new product. This new oven would be factory-equipped with thermosyphons. Furthermore, new developments were made to the concept so it is even more efficient than the first prototype. Instead of using several conventional two-phase thermosyphon spread on the oven side walls, the new prototype used two tree configuration thermosyphons. This new approach leads to an extremely uniform temperature distribution inside the oven cooking chamber. The new oven leads to a energy consumption up to 50% less than commercial available ovens. Combined with fan speed control, the thermosyphon technology also permits to cook different type of meals, such as pizza, which need more thermal radiation, and other type of food that need more convection, such as bread.

Keywords: bakery oven, tree configuration thermosyphon, energy savings

1º Seminário da 1. Rede Gás & Energia

1.0 INTRODUÇÃO

O Laboratório de Tubos de Calor – LABTUCAL, vem desde 2001 desenvolvendo fornos de cocção que se utilizam da tecnologia de termossifões bifásicos com financiamento do Centro de Pesquisa da Companhia de Petróleo Brasileiro CENPES/PETROBRAS. Este tema já rendeu um prêmio internacional pelo desenvolvimento de kit para conversão de fornos elétricos de padaria para gás (Mantelli et al. [1]), recebido no 7th International Heat Pipe Symposium em Jeju na Coréia do Sul em 2003. Este kit foi desenvolvido utilizando a tecnologia de termossifões bifásicos. Os termossifões estão revestindo as paredes laterais e têm o evaporador inclinado com relação à horizontal. A tecnologia de termossifões bifásicos já é utilizada há várias décadas nos países do extremo oriente, como China, Coréia e Japão, além de Rússia e Estados Unidos da América.

Dentro da cadeia de consumo do GLP/gás natural, o setor de panificação ocupa o 3º lugar em consumo. O presente texto aborda a utilização de termossifões bifásicos em árvore para promover a condução do calor para dentro da câmara de cocção com maior desempenho energético. Para isto foi construído e testado um forno de panificação para 8 bandejas utilizando termossifões em árvore. Este forno se constitui num aprimoramento do primeiro protótipo de forno de cocção, em que eram utilizados termossifões convencionais.

2.0 FORNO DE COCÇÃO PARA PÃES

O foco deste trabalho é a otimização do conjunto evaporadores-câmara de combustão para que se possa obter uma redução do consumo de gás. Outro objetivo é promover a interação com a indústria de fornos de padaria através do desenvolvimento de um protótipo de forno em conjunto com um fabricante, de modo que este possa comercializar o produto ao final do desenvolvimento.

Na concepção adotada para o primeiro protótipo do forno foram utilizados 20 termossifões convencionais em paralelo. Era necessário um queimador para cada evaporador, o que fazia com que houvesse uma pequena diferença de temperatura entre os condensadores de diferentes termossifões. Além disso, o projeto mecânico era mais complexo devido à necessidade de se ter um

queimador para cada evaporador, o que significa uma fabricação mais cara.

A concepção usada neste novo projeto é a configuração de termossifões em árvore. O termossifão em árvore é mostrado na Fig. 1. Ele consiste de um tubo horizontal (evaporador) e vários tubos verticais (condensadores) conectados ao evaporador. Tem-se desta forma vários tubos condensadores em paralelo ligados a um único evaporador. A principal vantagem desta configuração é utilização de um único evaporador horizontal para todos os condensadores, o que possibilita a utilização de um único queimador para todo o conjunto evaporador/condensadores. Mantelli et al. [2] testaram a concepção de termossifão em árvore com quatro condensadores e mostraram que quando o coeficiente de transferência de calor externo do condensador é baixo, como por exemplo em fornos de cocção onde a troca de calor entre o condensador e o ar se dá por convecção, o vapor se espalha igualmente entre todos os condensadores. Isso faz com que a temperatura dos condensadores seja praticamente uniforme nas condições de operação do termossifão no forno.



Fig.1. Termossifão em árvore

1º Seminário da 1. Rede Gás & Energia

O posicionamento do termossifão em árvore no forno é mostrado nas figuras 2 e 3. Visualmente, ele é semelhante ao primeiro protótipo, com os condensadores verticais dentro da câmara de cocção. São utilizados 2 termossifões em árvore, instalados próximos às paredes laterais. Os evaporadores ficam dentro da câmara de combustão, que por sua vez está imediatamente sob a câmara de cocção. Os detalhes da câmara de combustão, bem como dos queimadores serão apresentados posteriormente.

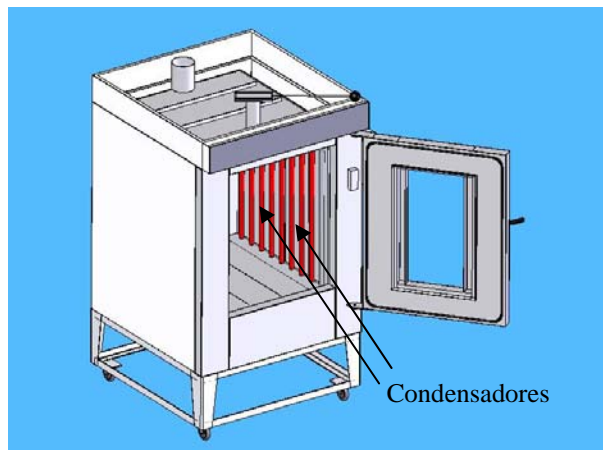


Fig. 1. Forno com termossifões em árvore



Fig. 3. Vista dos termossifões dentro da câmara de cocção

O projeto térmico do forno foi feito de acordo com a metodologia de modelamento dos mecanismos de transferência de calor dentro de fornos de cocção domésticos assistidos por

termossifões bifásicos desenvolvido por Milanez e Mantelli [3]. Após o projeto térmico do forno, ou seja, dimensionamento e posicionamento dos termossifões e queimadores, foi elaborado um projeto mecânico detalhado para fabricação.



Fig. 3. Vista dos termossifões dentro da câmara de cocção

2.1. FABRICAÇÃO DO FORNO

A construção do forno se deu na ????.

O forno foi construído com chapas de aço carbono e de aço inoxidável 304 com espessuras variando de 0,1 a 0,5 mm. Os termossifões foram construídos de aço inoxidável 304 de acordo com o projeto térmico elaborado pelo grupo. A escolha pelo aço inox foi feita após consulta a fabricantes de fornos. Apesar de mais caro, a maior resistência mecânica no aço inox, quando comparado com aço carbono normal se traduz em paredes mais finas dos tubos, o que por sua vez significa uma menor inércia térmica. Além disso, o aspecto visual é mais atraente, devido à ausência de óxidos nas superfícies, o que contribui para uma melhor higiene do produto.

As dimensões dos tubos usados na fabricação dos termossifões são descritas na Tab. 1. As espessuras das paredes dos tubos foram dimensionadas com base no procedimento de dimensionamento de tubos de pressão empregados pela Petrobrás. A câmara de cocção foi construída com as dimensões 600 mm de largura, 700 mm de altura e 600 mm de profundidade a fim de ter espaço suficiente para receber o suporte de 8 bandejas tamanho padrão para panificação.

1º Seminário da 1. Rede Gás & Energia

O início da construção deu-se pela câmara de cocção. Depois de completas a câmara de cocção e a estrutura do forno, foram realizados os furos, 9 de cada lado, para a inserção dos termossifões, conforme mostrado na Fig. 4. Nesta região ocorre a combustão do gás. Os gases quentes aquecem os evaporadores do termossifão. A exaustão se dá por dentro de uma parede dupla nos fundos da câmara de combustão. O escoamento de gases quentes aquecerem a parede dos fundos da câmara de cocção e aumentando a eficiência do equipamento.

Tabela 1. Espessura de parede das tampas e dos tubos usados nos termossifões

| | Evaporador | Condensador |
|---------------------------------|------------|-------------|
| Número de peças | 2 | 18 |
| Espessura de parede (mm) | 3,2 | 2,2 |
| Comprimento (mm) | 800 | 780 |
| Diâmetro (in) | 1,5 | 1,0 |



Fig. 4. Vista inferior do forno, com espaço para a instalação dos termossifões e câmara de combustão.

2.3. QUEIMADORES

Para baratear o custo construtivo, foi adotado um sistema de dois queimadores do tipo flauta, com seus sistemas de injeção de gás e controles de chama independentes mostrados na Fig. 5.



Fig. 5. Fotografia do queimador tipo flauta instalado no forno (Queimador Esquerdo)

O projeto dos queimadores foi realizado a partir de uma planilha de cálculo baseada na metodologia apresentada por Clifford [4]. Como os valores obtidos para o diâmetro da garganta e diâmetro interno do tubo são muito próximos foi inserido um Venturi em cada queimador.

3.0 TESTES DE DESEMPENHO DO FORNO

Foi analisado o comportamento térmico do forno para duas situações diferentes: vazio e carregado com pães do tipo francês em processo de cocção. Também são apresentados os resultados de um estudo experimental do comportamento térmico do forno para algumas variáveis de processo, como a geometria da câmara de combustão, para que se conseguir a melhor curva de aquecimento possível do forno. Além disso, foi feito um levantamento do consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) do forno durante a cocção.

3.1. METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os testes foram realizados objetivando conseguir a melhor configuração dos parâmetros de processo para garantir o menor tempo de aquecimento, menor tempo de retomada e menor consumo de gás. O forno foi instrumentado com vários termopares do tipo K nos termossifões na câmara de cocção para monitorar a temperatura do ar. Os dados de temperatura foram adquiridos em

1º Seminário da 1. Rede Gás & Energia

intervalos de 10 segundos por meio de um sistema de aquisição de dados AGILENT Benchlink Data Logger 34970. Com o forno instrumentado, ele foi ligado a partir do equilíbrio em temperatura ambiente. Quando a temperatura do mostrador do forno atinge 180°C, a porta era aberta por aproximadamente 5 minutos e fechada novamente. Esse procedimento tem o objetivo de simular as condições de fornadas sucessivas empregadas nas padarias, conforme será apresentado posteriormente.

3.2. ENSAIOS COM O FORNO SEM CARGA

Os primeiros testes foram realizados com o forno vazio (sem carga) para verificar a rampa inicial de aquecimento. Quando a temperatura média da câmara atinge 230 °C, o fluxo de gás é interrompido para evitar sobre-aquecimento dos termossifões, Vale lembrar que a temperatura média de cocção é normalmente inferior a 200 °C.

A rampa de aquecimento leva cerca de 72 min para atingir 230 °C, conforme mostrado na Fig.

6. Nota-se ainda que a temperatura dos termossifões ficam aproximadamente 17 °C acima da temperatura da câmara.

3.3. TESTES COM CARGA

O segundo tipo de teste realizado consistiu da cocção de pães seguindo o procedimento padrão adotado nas padarias. Uma pesquisa realizada entre os panificadores indicou um procedimento bastante simples adotado pela maioria dos padeiros. O forno é ligado e espera-se até que se atinja a temperatura de 180 °C. Neste instante a porta do forno é aberta e os pães crus são colocados no interior do forno já previamente crescidos. O pão é considerado assado quando tiver uma coloração adequada, o que corresponde a aproximadamente 25 min após ter sido colocado no forno. A Fig. 7 mostra o aspecto visual dos pães após a cocção. Este controle é feito visualmente, utilizando a luz interna do forno.

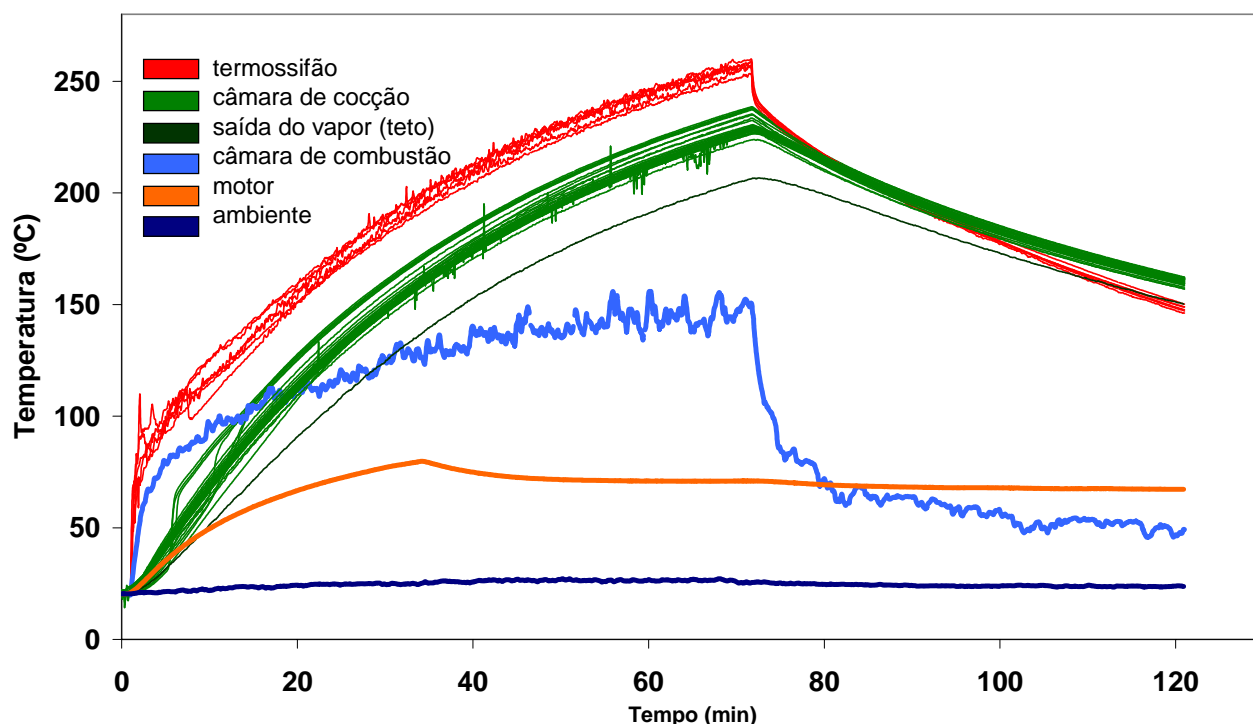


Fig. 6. Temperatura interna do forno para os testes realizados sem carga.

1º Seminário da **2. Rede Gás & Energia**

TERMOSSIFÕES EM ÁRVORE APLICADOS A FORNOS DE COCÇÃO DE PÃES:
MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A massa foi adquirida de fornecedores especializados, sendo que os pães já chegaram ao laboratório em seu formato final, já crescidos, e prontos para serem assados. No início do teste, todo o forno se encontra na mesma temperatura ambiente, por volta de 25 °C.



Fig. 7. Fotografia mostrando a homogeneidade da cocção dos pães durante o processo.

A Fig. 8 mostra as curvas de temperatura em função do tempo para duas fornadas consecutivas. No momento em que os pães são colocados dentro da câmara de cocção, percebe-se uma queda em todas as temperaturas devido à abertura da porta, tempos de 3700 seg e 5200 seg. É importante observar que, na verdade, o forno está longe de atingir o regime permanente, o que significa que se mais tempo fosse dado, mais alta seria a temperatura do forno.

As temperaturas nos condensadores não variam consideravelmente de um lado para o outro, o que também pode ser confirmado pela coloração uniforme dos produtos obtidos.

A rampa de aquecimento levou cerca 3700 seg para atingir 210 °C. Neste instante a porta foi aberta para inserir os pães crus. A porta foi então

fechada para a cocção, que durou aproximadamente 25 min (1500 seg). Durante a cocção, as temperaturas ficaram mais baixas que antes da introdução dos pães porque o processo de cocção absorve parte do calor. A recuperação de temperatura (elevação da temperatura após a retirada dos pães) foi de 26 min. A temperatura do termossifão ficou aproximadamente 30 °C acima da temperatura da câmara durante todo o processo.

Observa-se uma distribuição de coloração bem uniforme, mostrando que não houve pontos muito quentes nem muito frios (Fig. 7). Além de pães do tipo francês, foram assados no forno outros produtos, como pizzas, e diversos tipos de salgadinhos. No entanto, como a aquisição de dados não foi efetuada, pode-se apenas fazer uma análise qualitativa do desempenho do forno, no que diz respeito à uniformidade de coloração dos produtos assados.

Para verificar se essa alteração ocasionou alguma mudança no comportamento do forno, o teste de aquecimento padrão foi repetido para comparação com os resultados padrões do forno original. O procedimento do teste adotado é: aquecimento do forno até a temperatura de 180 °C no mostrador, abertura da porta do forno por cinco minutos e posterior fechamento da porta até a recuperação da temperatura de 180 °C.

3.4. TESTES COM VARIAÇÃO DA VENTILAÇÃO

Os fornos de padaria são equipados com ventiladores radiais normalmente posicionados na parede dos fundos. O objetivo principal do ventilador em fornos comerciais é auxiliar os processos de homogeneização da temperatura dentro da câmara de cocção. No forno com termossifões, a homogeneização é obtida automaticamente pelos termossifões. Mas os testes indicaram que mesmo para o termossifão, o ventilador é bastante desejável para acelerar o processo de cocção. Isso ocorre porque, como o termossifões homogeneizam muito bem o ar na cavidade, não existem correntes de convecção. Isso prejudica a troca de calor entre o ar e os pães, aumentando em muito o tempo de cocção, o que é indesejável. Optou-se então executar um estudo de influência da velocidade de rotação do ventilador no tempo e qualidade de cocção.

1º Seminário da 3. Rede Gás & Energia

TERMOSSIFÕES EM ÁRVORE APLICADOS A FORNOS DE COZÇÃO DE PÃES:
MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

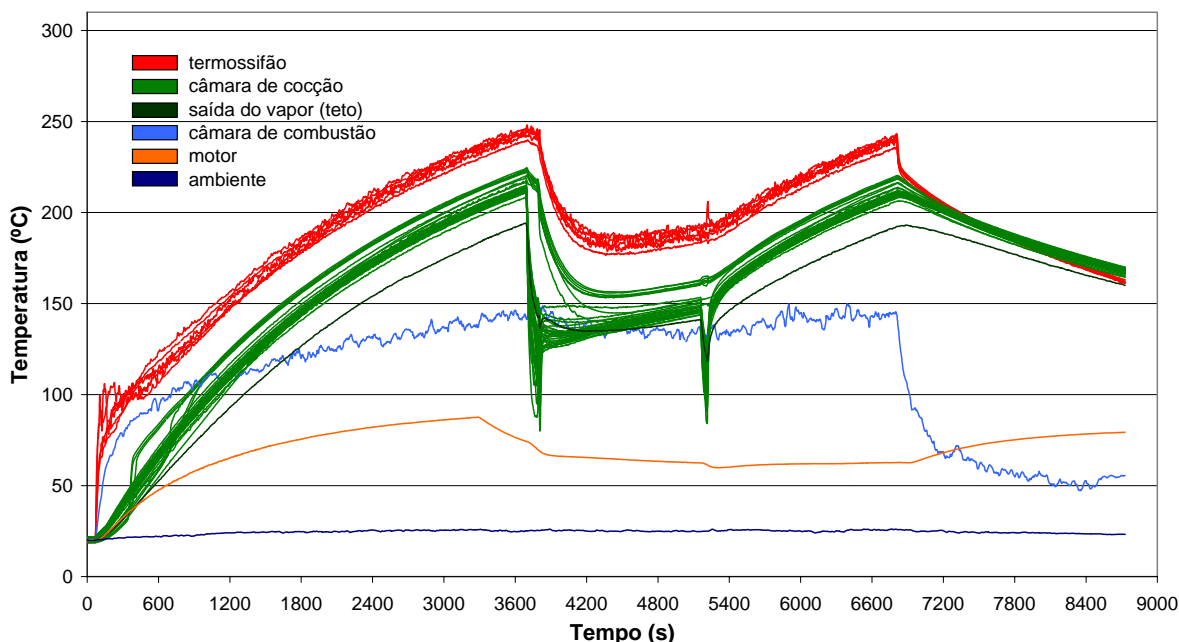


Fig. 8. Temperatura interna do forno para os testes com carga (pães franceses)

As leis das máquinas de fluxo indicam que a rotação é diretamente proporcional à velocidade de saída do ar das pás. Sendo assim, os testes foram realizados para os seguintes valores de rotação: 100, 75, 50, 25 e 0 % da rotação nominal. A rotação nominal do ventilador é de 1650 r.p.m. e o diâmetro é de 350 mm.

Como o motor instalado é um motor monofásico de 1 cv, o uso de um inversor de frequência foi descartado para o controle da rotação. Para testes utilizou-se o redutor de tensão Variak de 5 kW. Observou-se que, como esperado, a rotação diminui diretamente com o corte da tensão, porém aumenta excessivamente a corrente no motor, fazendo-se necessário o uso de refrigeração forçada no mesmo, para evitar o superaquecimento.

A Tab. 2 traz os resultados dos testes realizados com o forno vazio. A redução da rotação do ventilador aumenta tanto o tempo da rampa de aquecimento quanto a temperatura média dos termossifões. Isso ocorre porque o coeficiente de troca de calor por convecção interno na cavidade do forno diminui por consequência da diminuição da velocidade média do ar.

A Tab. 3 mostra os testes do forno com carga de pães franceses. Semelhantemente aos

testes em vazio, a diminuição da ventilação interna do forno aumenta o tempo da rampa de aquecimento inicial e aumenta a temperatura do termossifão. Além disso, o tempo de cocção aumenta consideravelmente com a redução da velocidade de ventilação. Isso também é explicado pelo fato de que quanto menor a agitação do ar dentro da câmara de cocção, menor a transferência de calor. O tempo de recuperação de temperatura aumenta levemente com a diminuição da rotação, exceto para o ventilador desligado, que apresentou o menor tempo de recuperação do ventilador. Isso pode ser explicado pelo fato de que os termossifões estão bastante aquecidos no momento que a porta é aberta. Assim, quando a porta é fechada novamente o calor armazenado nos termossifões é transferido para o ar da câmara.

Tabela 2. Resultados dos testes com forno vazio

| Rotação em relação a nominal (%) | 100 | 75 | 50 | 0 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Tempo da rampa até 230 °C (min) | 72 | 78 | 93 | 101 |
| Temperatura do termossifão (°C) | 247 | 250 | 254 | 300 |

1º Seminário da 3. Rede Gás & Energia

TERMOSSIFÕES EM ÁRVORE APLICADOS A FORNOS DE COZÇÃO DE PÃES:
MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Tabela 3. Resultados dos testes com carga

| Rotação em relação a nominal (%) | 100 | 75 | 50 | 0 |
|----------------------------------|-----|-----|----|----|
| Tempo da rampa até 210 °C (min) | 60 | 63 | 22 | 26 |
| Temperatura do termossifão (°C) | 240 | 244 | 26 | 28 |
| Cocção (min) | 22 | 26 | 31 | 30 |
| Recuperação (min) | 26 | 28 | 50 | 21 |

3.5. CONSUMO DE GÁS

O consumo de GLP do forno foi medido com balança marca URANO, modelo 25/5, onde um botijão cheio foi pesado antes de dar a partida e após o desligamento do forno.

A figura 9 mostra o consumo de gás em função do tempo de teste com o forno carregado. O consumo médio foi de aproximadamente 0,76 kg/h ou 0,21 g/s. Observa-se também que o consumo varia consideravelmente, principalmente no final do teste.

4. CONCLUSÕES

O forno a gás com termossifões em árvore se mostrou superior ao primeiro protótipo, que utilizava termossifões convencionais. As vantagens são principalmente o menor o custo final do produto em relação ao modelo anterior e a maior simplicidade do sistema. Ao invés de 20 termossifões independentes com um queimador para cada termossifão, o novo protótipo utiliza somente 2 queimadores com um injetor, um sistema de acendimento e um sistema de controle da chama para os dois termossifões em árvore. O protótipo anterior utilizava 20 queimadores com 20 injetores de gás e 20 acendedores.

Tanto para os testes sem carga, quanto para os testes com carga, os termossifões em árvore mantiveram a homogeneidade térmica. A qualidade dos pães independe do nível de ventilação utilizado. A ventilação mais eficiente diminui o tempo necessário para a homogeneização da câmara de combustão e principalmente, diminui tempo de cocção. A diminuição da velocidade do ventilador economiza energia elétrica, porém aumenta o consumo de gás, tornando a cocção mais cara. Fazendo um

balanço energético entre consumo do gás e da eletricidade para o motor, observa-se que a redução da velocidade do ventilador não se justifica, pois a ordem de grandeza do consumo de gás é da ordem de 10 kW enquanto que a do motor do ventilador é de 1 cv, ou seja, 750 W aproximadamente.

O consumo de gás do forno a gás com termossifões em árvore foi menor que os disponíveis no mercado: 0,76 kg/h do forno com termossifões contra 1,6 Kg/h para os fornos convencionais.

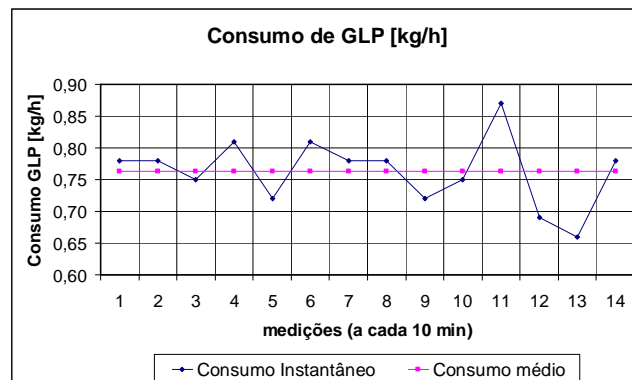


Fig. 9. Consumo de GLP do forno

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mantelli, M. B. H., Lopes, A., Martins, G. J., Zimmerman, R., Baungartner, R. e Landa, H. G., "Thermosiphon kit for conversion of electrical bakery ovens to gas," Proceedings of the 7th International Heat Pipe Symposium, Jeju, Korea, 2003.
- [2] Mantelli, M. B. H., Milanez, F. H. e Mielitz, G., "Tree Configuration Thermosiphon Study," 38th AIAA Thermophysics Conference, Toronto, June 6-9, 2005.
- [3] Milanez, F. H., e Mantelli, M. B. H., "Analytical Model for Thermal Performance Analysis of an Enclosure Heated by Aligned Thermosyphons", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 20, No. 2, pg. 267-275, 2005.
- [4] Clifford E.A., B.S. LP-Gas Service & Installation Handbook: Practical Guide to LP-Gas Utilization, Fourth Edition, Harbrace Publications, Inc, 1969, Minnesota.