

UTILIZAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR EM SECADORAS DE ROUPAS

Alessandro Bontempi

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia.
Rua Imaculada da Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brasil, CEP 80215-901
bontempi@hotmail.com

Luís Mauro Moura

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia.
Rua Imaculada da Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brasil, CEP 80215-901
Luis.Moura@pucpr.br

Ivan Azevedo Cardoso

ivanac@brturbo.com

Resumo. *Apresenta-se neste trabalho resultados obtidos com a instalação de dois trocadores de calor em uma secadora de tecidos industrial a tambor de 12kg de capacidade de tecido seco e potência total de consumo de 10 kW. A finalidade dos trocadores é o pré-aquecimento do ar de entrada, utilizando o ar de saída do tambor de secagem. Um dos trocadores é fabricado em tubos de cobre e aletas de alumínio. O segundo trocador de calor foi construído experimentalmente em placas de policarbonato. Investiga-se a influência das condições ambientais na taxa de evaporação para vazões variadas. Levantam-se curvas de eficiência de secagem para o secador normal com diferentes configurações de carga e tecidos e também com a utilização dos trocadores de calor descritos. Demonstra-se que a redução na potência de consumo total da secadora pode atingir até 6,5% com a utilização do trocador em policarbonato, contra 2,5% do trocador tubo-aletado. Por fim é feita uma análise da taxa de extração de umidade.*

Palavras chave: secadoras industriais, lavanderias, eficiência de secagem, recuperação de energia, trocadores de calor compactos.

1. Introdução

O principal objetivo de qualquer processo de secagem é a obtenção de um produto seco de qualidade desejada a um custo mínimo e com uma produtividade máxima, bem como a otimização desses fatores de forma consistente (Oktay & Hepbasli, 2002). Na maioria dos países industrializados a energia utilizada na secagem contabiliza cerca de 7 – 15% da energia industrial do país, geralmente com eficiência energética baixa (Oktay & Hepbasli, 2002). Bansal (1997) rela que o processo de secagem consome até 70% do total de dispêndios energéticos empregado na manufatura de produtos de madeira e 50% do total de consumo energético despendido na confecção de tecidos têxteis acabados.

Em escala comercial as secadoras que fazem uso de resistores para aquecimento do ar, em sua maioria são utilizadas na secagem de têxteis, e concentram-se em residenciais e hospitais e em secadoras de lavanderias comerciais.

Na secagem doméstica de têxteis, Conde (1997) relata que de toda a energia elétrica gasta na Suíça em 1997, cerca de 0,5 % foi utilizada em lavanderias para secagem de tecidos (Conde, 1997).

Já a nível nacional, as instituições hospitalares, grandes usuários de secadoras de tecidos, devido à necessidade da lavagem diária dos enxovais, têm um consumo de energia elétrica mensal, **por leito**, estimado em 170 kWh com secadoras de tecidos, o que agrava o elevado custo de tais instituições, que em grande parte já vivenciam um difícil quadro financeiro. Os projetos de secadoras de roupas atualmente comercializadas não atendem às exigências de redução de consumo de energia impostas pela escassez energética nacional, além de comprometerem uma significativa parcela da receita dos hospitais. Portanto, tais exemplos indicam claramente a razão pela qual a maioria dos estudos focaliza o potencial de economia em processos de secagem.

Pesquisadores como Lambert (1991) e Conde (1997) tiveram como foco os secadores de tecidos a tambor, propondo estratégias para redução do consumo energético de tais secadoras. Lambert (1991) propôs a recirculação parcial do ar quente expelido, e concluiu uma melhora de 8% na eficiência da secadora se 75 % do ar fosse recirculado novamente. Conde (1997), trabalhou com instalação de trocadores de calor compactos ar-ar, e concluiu que até 20% da energia que acompanha o ar de saída poderia ser recuperada para aquecimento do ar de entrada.

O desenvolvimento de secadoras nacionais mais eficientes implica em aproveitar melhor da energia consumida, evitando altos investimentos em geração de energia ou em importação de secadoras eficientes, e melhorando também a economia associada à preservação do meio ambiente. É nesse contexto que se realizou neste trabalho um estudo teórico e experimental da recuperação de parte do calor do ar que sai do tambor de secagem com a utilização de trocadores de calor. São utilizados dois tipos de trocadores de calor, o tubo aletado e o tipo “plate-fin”. Este último foi construído de placas de policarbonato modelo Lexan[®] Thermoclear[®] da General Electric Plastics.

2. Configuração de Ensaio

Nos ensaios experimentais observa-se o comportamento da secadora levantando as informações necessárias antes e depois das modificações. Os ensaios foram realizados com três tipos de tecidos em duas configurações de carga: com cargas parciais de 5 kg e cargas completas de 12 kg. Os tecidos utilizados para secagem foram:

- algodão tipo lençol: ensaio com cargas de 5 kg e cargas de 12 kg;
- algodão tipo jeans: ensaio com cargas de 12 kg;
- tecido 100% poliéster: ensaio com carga de 12 kg.

3. Secadora antes das modificações e instrumentação utilizada

Um esquema simplificado da secadora antes da instalação dos trocadores de calor é mostrado na Fig. 1. O ar ambiente é capturado pelo ventilador e injetado nos resistores de aquecimento. Após ser aquecido, o ar é levado para dentro do tambor de secagem através do tambor. Um motor elétrico rotaciona o tambor. O ar escapa para fora do tambor também leva consigo uma quantidade de fiapos que se desprendem da roupa durante a secagem. A gaveta é limpa a cada ensaio, evitando variações na vazão devido ao acúmulo. Um tubo de PVC de 200mm de diâmetro e dois cotovelos, foi utilizado para conduzir o ar quente e úmido de saída da secadora até a janela do laboratório, evitando o aumento da temperatura e umidade ambiente.

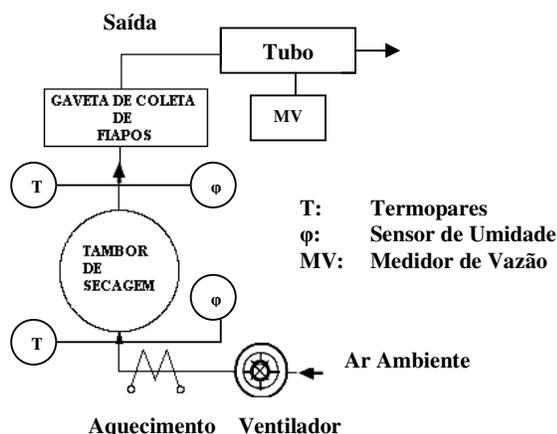


Figura 1. Esquema simplificado da secadora antes das modificações mostrando o caminho percorrido pelo ar.

A potência total de consumo da secadora é formada pela soma das potências parciais dos resistores de aquecimento, do motor de rolagem do tambor e do ventilador. Medidas utilizando um alicate amperimétrico foram realizadas na entrada elétrica geral da secadora, quando está operava com carga completa de 12kg de roupa. Nenhuma diferença na corrente foi observada para cargas de 5kg.

4. Taxa específica de extração de umidade - MER

A eficiência energética de secadoras é tipicamente expressa usando-se um parâmetro chamado taxa específica de extração de umidade - MER. A taxa MER é definida como a energia gasta em um ciclo de secagem para remover uma certa quantidade de água do tecido (Bansal, 2001). A taxa é calculada pela Eq. 1, onde W_t é a potência gasta e Δt o tempo de secagem.

$$MER = \frac{W_t \cdot \Delta t}{\text{massa de água removida do tecido}} \quad (1)$$

5. Eficiência de Secagem

A equação de eficiência de secagem foi utilizada por pesquisadores como Conde, 1997, e Deans, 2001. Segundo Conde (1997), o processo de secagem ocorre de forma aproximadamente adiabática e a quantidade máxima de água que pode ser transportada pelo ar secante está termodinamicamente limitada à temperatura de bulbo úmido do ar que

entra no tambor de secagem com a umidade relativa de 100% , representada pelo termo $\omega_{[Tbu,i]}$. A eficiência de um processo de secagem é calculada como:

$$\eta_s = \frac{\omega_{out} - \omega_{in}}{\omega_{[Tbu,i]} - \omega_{in}} \quad (2)$$

onde:

ω_{in} = umidade específica de entrada [kg_w/kg_{ms}]

ω_{out} = umidade específica de saída [kg_w/kg_{ms}]

$\omega_{[Tbu,i]}$ = máxima umidade específica: com 100% de umidade relativa á temperatura de bulbo úmido de entrada.

6. Resultados dos ensaios antes da instalação dos trocadores de calor

Antes da instalação dos trocadores de calor na secadora, parâmetros de referência como taxa de evaporação da água do tecido para diferentes vazões de ar, eficiência de secagem, e taxa específica de extração de umidade são analisados nesta primeira fase, assim como a influência das condições ambientais de temperatura e umidade relativa na taxa de evaporação.

6.1 Taxa de evaporação da água do tecido

Como um dos objetivos é o estudo do comportamento da taxa de evaporação em condições ambientais variadas, optou-se pelo balanço de massa simples, sendo utilizados para os cálculos os dados experimentais, já que estes podem ser facilmente medidos. O balanço é aferido pela quantidade de água na roupa molhada, que foi previamente pesada antes da secagem. Fazendo um balanço de massa no tambor de secagem a massa evaporada pode ser calculada como:

$$\dot{m}_{evap} = \dot{m}[\omega_s - \omega_E] \quad (3)$$

onde:

\dot{m}_{evap} = massa de água evaporada [kg_w/s]

ω_e , ω_s = umidades específicas de entrada e saída no tambor de secagem [kg_w / kg_{AS}]

\dot{m} = vazão de ar [kg/s]

Para investigarmos a influência da vazão de ar na secagem, o motor do ventilador foi substituído e um inversor de frequência foi instalado. A Fig. 2 apresenta o resultado da taxa de evaporação para três vazões diferentes: o dobro da vazão original, a vazão original, e 75% da vazão original. Para as três vazões de ar, as condições do ambiente são praticamente constantes, as cargas e o tipo de tecido a serem secos são os mesmos, assim como a quantidade inicial de água no tecido.

No ensaio com o dobro da vazão, a taxa de evaporação atingiu em regime permanente, valores em torno a 9 % maiores que a vazão original, o que diminuiu o tempo de secagem em cerca de 10 %. Porém o aumento da velocidade do ar causou no início da secagem, uma piora na taxa de evaporação, devido a menor temperatura de operação do ar secante. Apesar do aumento de 492 W no consumo da secadora ao impormos o dobro da vazão de ar , a taxa específica de extração de umidade diminuiu de 2,6 para 2,43 kWh/kg de água removida, devido justamente a maior velocidade na evaporação o que reduz o tempo de secagem. Uma outra observação importante está na temperatura de entrada do ar no tambor de secagem para esta vazão. Elas foram bem mais baixas o que certamente reduz as perdas de calor em função de um menor aquecimento da secadora.

Com a vazão reduzida para 75% do valor original a potência de ventilação diminuiu em 91 W. Apesar do maior aquecimento do ar, devido ao maior tempo de permanência do ar nos resistores de aquecimento, a taxa de evaporação sofreu redução em quase todo o período, tendo um leve aumento no final da secagem. Apesar desta vazão propiciar uma redução na potência do ventilador e conseqüentemente no consumo da secadora, a taxa específica de extração de umidade permaneceu praticamente estável, devido ao maior tempo para secagem, não apresentando nenhuma vantagem energética. Uma outra desvantagem em reduzirmos a vazão de ar é o aumento da temperatura do ar secante especialmente no período final da secagem o que pode danificar alguns tipos de tecidos.

Outro fator importante a ser analisado é a influência da umidade relativa do ambiente na taxa de evaporação. Na Fig. 3, observa-se a taxa de evaporação na secagem de duas cargas de 5 kg de algodão ensaiadas com a mesma temperatura ambiente, mas umidades relativas diferentes. O ensaio 1 foi realizado com umidade relativa de 34% enquanto que no ensaio 2 a umidade relativa é de 55 %. Um menor valor da umidade absoluta no ar diminui sua pressão parcial aumentando o potencial evaporativo, o que mostra que a taxa de evaporação é substancialmente influenciada

pela umidade ambiente. Uma vez que para não danificarmos os tecidos, a temperatura do ar secante deve ser limitada. Como era de se esperar, a Fig. 3 demonstra também que a quantidade de umidade do ar ambiente deve ser mantida tão baixa quanto possível.

Na Fig. 4 apresenta-se a taxa de evaporação duas cargas de 12 kg. A taxa de evaporação atingiu valores substancialmente maiores que para carga de 5 Kg o que indica que a uma relação entre a área da roupas a serem secas e a taxa de secagem para as mesmas temperaturas e vazão de ar. Outra observação importante diz respeito às diferenças de temperatura e umidade dos ensaios 3 e 4, Fig.5. Para o ensaio 4 a temperatura ambiente foi 10% mais alta e a umidade relativa 25% mais baixa do que no ensaio 3, o que causou uma diferença de 12 % no tempo total e secagem devido a maior velocidade na evaporação da água do tecido e influenciando no consumo energético da secadora.

6.2 Resultados da eficiência de secagem para diferentes tecidos

As diferenças de umidade absoluta na entrada e saída do tambor de secagem servem para cálculo da eficiência de secagem. A Eq. 3 utilizada por Conde, calcula a eficiência no processo de secagem, onde as condições ambiente são bastante próximas, o que permite analisar a eficiência de secagem em termos de quantidade de carga e tipo de tecido. A Fig. 5 mostra que a eficiência de secagem aumenta com a quantidade de tecido no tambor. Para a carga de 12 kg a eficiência de secagem é maior do que para a cargas de 5 kg do mesmo algodão, indicando que o volume do tambor constitui um parâmetro importante para otimização da secadora quando consideramos o volume por quilo de tecido.

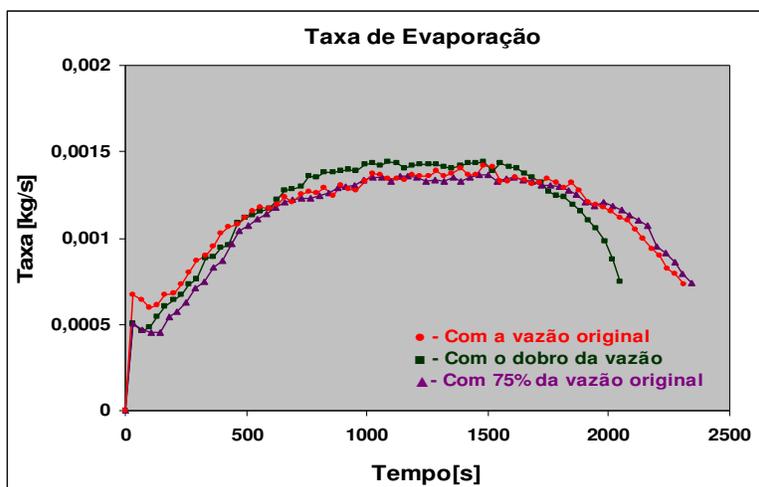


Figura 2. Taxa de evaporação para diferentes vazões. Secagem de cargas 5 kg de algodão tipo lençol.

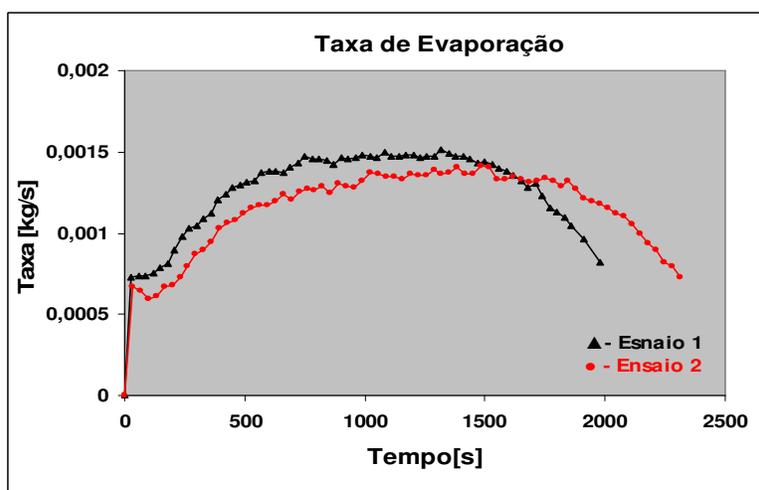


Figura 3. Taxa de evaporação para cargas de 5kg de algodão.

A eficiência de secagem para tecidos diferentes também é analisada. Na Fig. 5 observa-se que a eficiência de secagem do tecido jeans é reduzida em função da baixa capacidade da água de migrar por capilaridade do interior do

tecido para superfície. Isto aumenta o tempo de secagem e a energia específica de consumo da secadora, aumentando também as perdas de energia devido ao maior aquecimento da secadora. Em tecidos onde a capacidade de migração da água é limitada, o tempo de secagem é bastante superior o que leva o tecido a atingir temperaturas próximas a temperatura de deterioração, especialmente no final da secagem. No tecido jeans, observou-se no final da secagem, um aumento de 15 % na temperatura de saída do tambor em relação à mesma carga de algodão.

7. Secadora após as modificações e trocadores de calor utilizados

Dois trocadores de calor foram alternadamente instalados na secadora. Essa instalação foi realizada de tal maneira que pudessem ser retirados e substituídos, para o ensaio de ambos. Para isso mudanças na secadora se fizeram necessárias. As principais características da mudança da secadora são as seguintes:

- O trocador de calor foi posicionado na saída do tambor de secagem;
- Devido à perda de carga, o motor do ventilador foi substituído por outro com o dobro da rotação máxima, e um inversor de frequência instalado, variando assim a rotação até o valor original da vazão;
- O ventilador aspira o ar ambiente que passa através das aletas do trocador e empurra o ar para fora do tambor de secagem, passando pelos tubos ou placas do trocador. A Fig. 6 apresenta o esquema do caminho pelo ar;
- Teve-se o cuidado de vedar o trocador de calor para que não houvesse vazamento, o que acarretaria em erros nas leituras dos termopares de entrada e saída do trocador.

7.1 Trocador de calor tipo tubo aletado

Os trocadores de calor tubo aletados são geralmente utilizados onde um dos fluidos do escoamento é um gás e por isso desejamos uma grande área de transferência de calor devido ao baixo coeficiente de convecção dos gases. Estes trocadores foram extensamente estudados por Kays e London (1984), que propuseram correlações da transferência de calor em termos do fator de Colburn e do número de Reynolds, para diversas configurações de miolo. Uma dessas configurações, 8.0-3/3T, foi instalada na secadora. Está configuração de superfície foi escolhida por ser a mais comum em trocadores tubo aletados disponível no mercado brasileiro. O ar quente, úmido, e carregado de fiapos que sai do tambor de secagem passa através dos tubos do trocador minimizando o problema de entupimento, enquanto que o ar ambiente de entrada passa através das aletas do trocador.

A Fig. 7 apresenta o trocador tubo aletado utilizado na secadora.

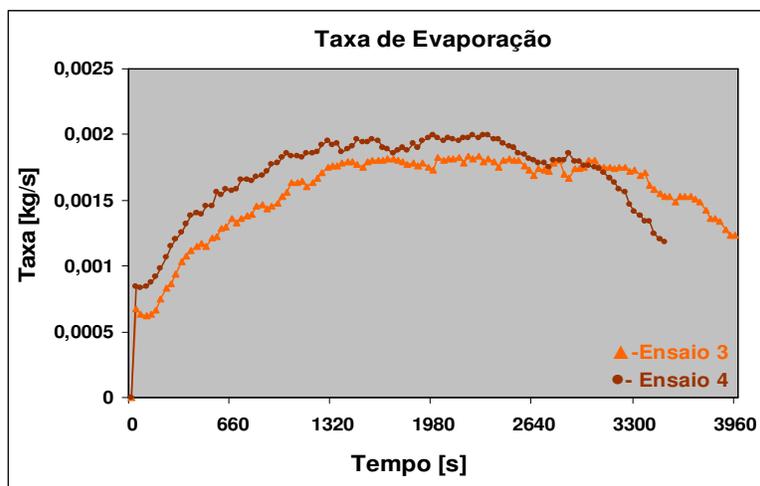


Figura 4. Taxa de Evaporação para cargas de 12 kg de algodão.

7.2 Trocador de calor em policarbonato

Um dos trocadores de calor utilizado na secadora foi construído no laboratório de Ciências Térmicas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Este é constituído de placas de parede dupla em policarbonato, modelo Lexan® Thermoclear® da General Electric Plastics. A Fig. 8 apresenta as placas utilizadas. Essas placas de policarbonato são bastantes resistentes mecânica e termicamente, podendo suportar temperaturas de até 115°C. A condutividade térmica das placas de policarbonato é naturalmente muito inferior á do alumínio, mas sua influência sobre a troca de calor é mínima (Conde, 2003). Segundo Conde (2003), a diferença na performance global de troca térmica entre trocadores

construídos com placas Lexan® e trocadores em alumínio está próxima a 1%. Através de uma planilha de cálculo e utilizando os valores da condutividade térmica do alumínio e em seguida do policarbonato, essa diferença foi confirmada.

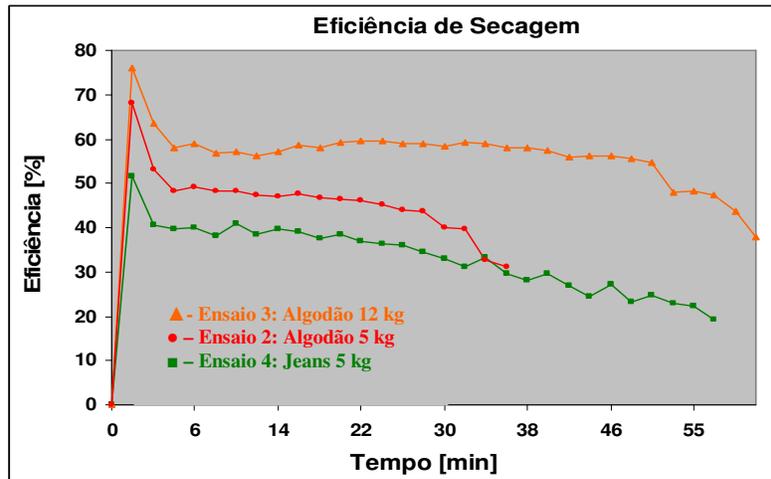


Figura 5. Eficiência de secagem para três diferentes tecidos.

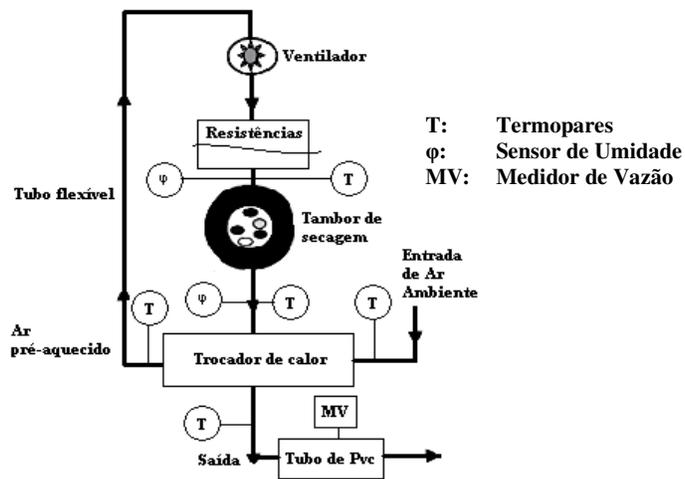


Figura 6. Alterações na secadora e esquema de circulação do ar após as modificações.

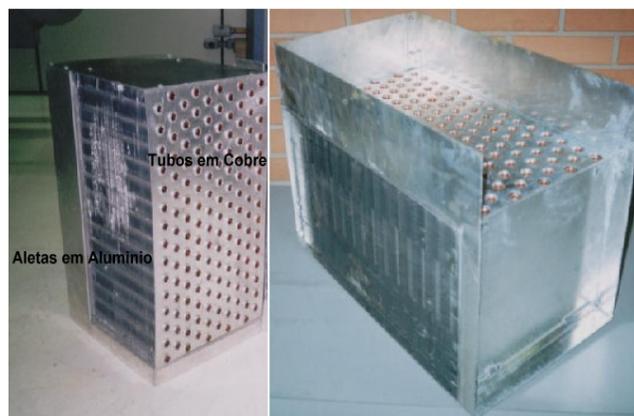


Figura 7. Trocador de calor tubo aletado utilizado na secadora.

As placas de policarbonato são montadas paralelamente umas as outras, formando em um dos lados do trocador uma “colméia” de aletas e do outro canais de passagem dor ar entre as placas. O ar quente e carregado de fiapos passa entre as placas e o ar ambiente é succionado pelo ventilador, passando através das aletas. Uma das vantagens da utilização deste tipo trocador são justamente as áreas de transferência de calor tanto do fluido quente, quanto do frio. Em comparação ao trocador tubo aletado, para as mesmas dimensões de volume, o trocador de policarbonato possui do lado do fluido quente, quase o dobro de área de troca térmica, Tab. 1. Uma estrutura de cantoneiras em metal foi construída para sustentar as placas e fixar o trocador na secadora. A Fig. 9 apresenta a montagem final do trocador em policarbonato.

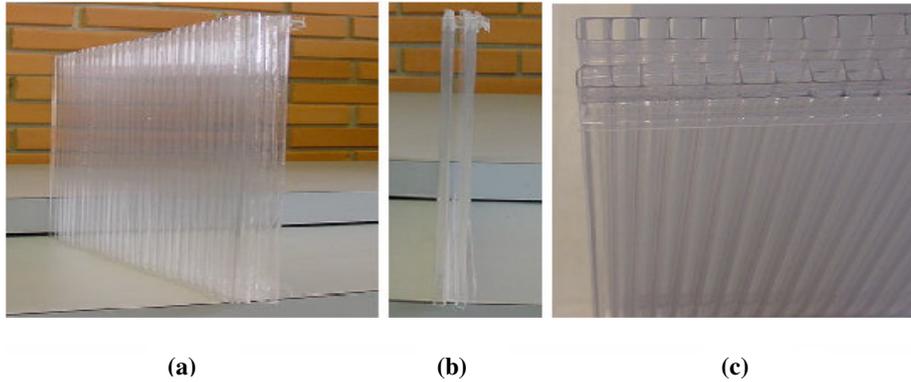


Figura 8. Configuração de montagem. (a) Montagem paralela das placas. (b) canal formado entre as placas, onde escoo o ar quente carregado de fiapos. (c) colméia de aletas onde escoo o ar limpo.



Figura 9. Montagem final do trocador de calor em policarbonato.

Tabela 1. Características do trocador de calor em policarbonato e comparação de áreas de troca térmica em relação ao tubo aletado.

Trocador em Policarbonato	Trocador Tubo Aletado
Área de transferência para o fluido quente (lado das placas): 2,465 m²	Área de transferência para o fluido quente (lado dos tubos): 1,35m²
AMBOS OS TROCADORES POSSUEM AS MESMAS DIMENSÕES EXTERNAS	

7.3 Aumento da potência de ventilação devido a perda de carga

A utilização de trocadores de calor gera perdas de carga e conseqüentemente, para se manter a mesma vazão de ar, a potência do ventilador deve ser aumentada. O consumo da secadora **antes** das modificações, ou seja, em seu modo original de fábrica, e **depois** da instalação de **cada trocador** de calor é apresentada na Tab. 2.

A potência total de consumo da secadora antes de qualquer alteração é de 10,256 kW. Com a instalação do trocador tubo-aletado a potência total de consumo passou a ser 10,622 kW, onde destes 366 W são utilizados no aumento da potência do ventilador para bombeamento do ar. Para o trocador em policarbonato a potência total de consumo da secadora aumentou para 10,382 kW, onde 126,2 W são utilizados no aumento da potência do ventilador.

Tabela 2. Potência total de consumo da secadora **antes** das modificações e **depois** da instalação dos trocadores de calor.

	Potência total de consumo antes das modificações na secadora [W]	Potência total de consumo depois das modificações na secadora [W]	
		Com o trocador Tubo Aletado	Com o trocador em Policarbonato
	Potência média: 10256 W	Potência média: 10621,9 W	Potência média: 10382,2 W

8. Potência Térmica Recuperada e Potência Líquida

A potência térmica recuperada trata-se do ganho de temperatura do fluido frio no trocador de calor, sem levar em consideração a potência elétrica que foi acrescentada ao ventilador para mantermos a mesma vazão. O valor da potência térmica recuperada é calculado pela equação do calor sensível, como:

$$\dot{P}_R = \dot{m}C_p(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (4)$$

onde:

\dot{m} = vazão de ar [kg/s]

C_p = calor específico do ar úmido [J/(kg.K)], calculado pela média das propriedades do ar na entrada e saída do trocador.

$T_{c,o}$ = Temperatura de saída do fluido frio [K]

$T_{c,i}$ = Temperatura de entrada do fluido frio [K]

Conforme foi descrito, para mantermos a mesma vazão é necessário um aumento de potência no ventilador. A recuperação líquida de potência gerada pelos trocadores é calculada subtraindo-se o aumento de potência imposta ao ventilador.

$$\dot{P}_L = \dot{P}_R - \dot{P}_V \quad (5)$$

onde:

\dot{P}_L = Potência líquida gerada pelo trocador [W]

\dot{P}_R = Potência térmica recuperada pelo trocador [W]

\dot{P}_V = Potência gasta a mais pelo ventilador para vencer a perda de carga [W]

8.1 Resultados dos ensaios com a utilização dos trocadores de calor

Para o trocador de calor em policarbonato os ganhos de temperatura são acentuadamente mais vantajosos que o trocador tubo-aletado, devido a maior área de troca térmica do trocador em policarbonato. A Fig. 9 ilustra o aquecimento do ar fresco de entrada em ambos os trocadores de calor. Em regime permanente pode-se considerar um aquecimento médio de 6°C para o policarbonato contra 4°C do trocador tubo-aletado. Outra vantagem da utilização do

trocador em policarbonato diz respeito à perda de carga. A potência aplicada a mais no ventilador para o trocador em policarbonato é de 126,2 W contra 365,9 W do tubo-aletado. A menor potência aplicada ao ventilador associada ao maior ganho de temperatura, faz com que o trocador em policarbonato seja energeticamente mais vantajoso. A Fig. 10 mostra a recuperação de potência líquida em cada um dos trocadores, já descontado a potência aplicada a mais ao ventilador, conforme Eq. 5.

Inicialmente, como se observa na Fig.10, o ganho de temperatura não é suficiente para compensar a potência gasta a mais pelo ventilador, porém após 465 segundos do início da secagem para o trocador tubo-aletado e 185 segundos para o trocador em policarbonato a potência líquida recuperada torna-se positiva. Em regime permanente a economia líquida média do trocador em policarbonato é de 635W, contra 240W do trocador tubo-aletado, o que representa respectivamente 6,3 e 2,4 % da potência total de consumo da secadora.

Também foi analisada a eficiência de secagem para ambos os trocadores de calor em diferentes condições de temperatura ambiente e umidade relativa e comparada com a eficiência de secagem sem a utilização dos trocadores. Os ensaios são numerados na Fig. 11 como 2, 5 e 6. A Tab. 3 resume as condições climáticas de cada ensaio. Foram utilizadas cargas de 5 kg de algodão para os três ensaios e a quantidade inicial de água no tecido era a mesma.

Inicialmente é maior a eficiência do trocador tubo-aletado, devido a maior temperatura ambiente e menor umidade relativa, Tab. 3. Durante a secagem os trocadores melhoram gradativamente o ganho de temperatura, aumentando conseqüentemente a taxa de evaporação da água do tecido e a eficiência de secagem. No final do período de regime permanente, quando a taxa de evaporação da água do tecido é menor, a eficiência de secagem assume o comportamento de regressão.

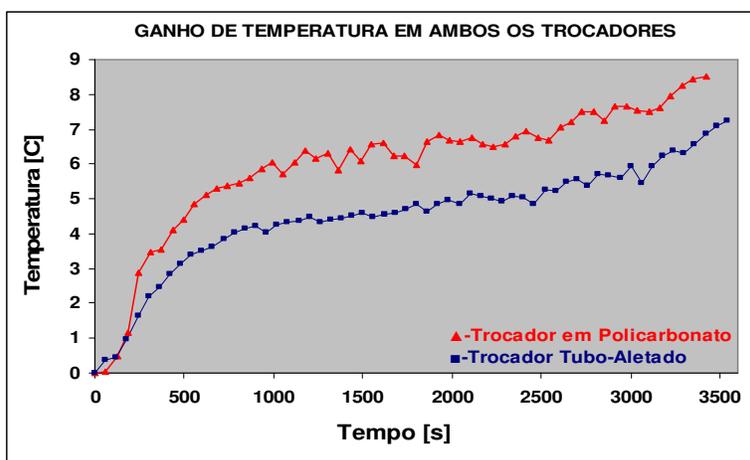


Figura 9. Ganho de temperatura para ambos os trocadores instalados na secadora. Secagem de cargas de 12kg de algodão. As condições de ensaios, assim como as climáticas são as mesmas para os dois trocadores.

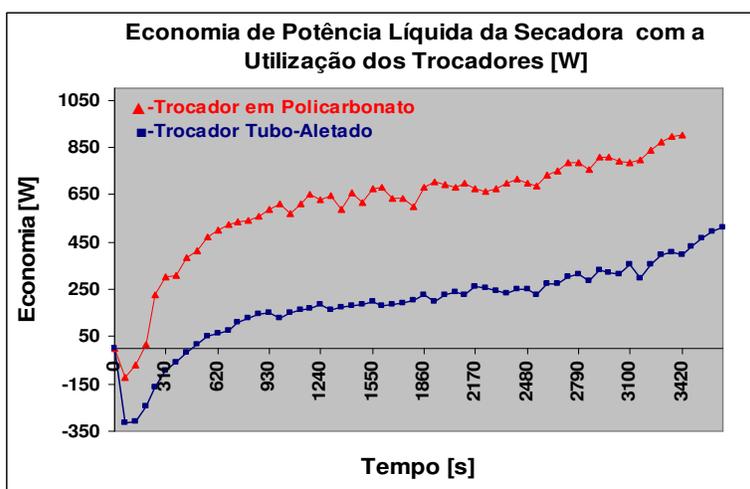


Figura 10. Diferença entre \dot{P}_R e \dot{P}_V com a utilização dos trocadores durante a secagem de cargas 12 kg de algodão.

Tabela 3. Condições ambiente dos ensaios 2, 5 e 6.

	Número do Ensaio	Temperatura Ambiente [°C]	Umidade R. Ambiente [%]
Sem modificações na secadora	2	22,5	65
Com TC tubo-aletado	5	23	56
Com TC em policarbonato	6	22,7	63

Apesar de termos piores condições ambiente para o ensaio com o trocador em policarbonato, ensaio 6, ele torna-se mais eficiente na secagem por ter um melhor ganho de temperatura, demonstrando ter maior eficiência na secagem em relação ao trocador tubo-aletado.

Em termos de eficiência de secagem é pequena a diferença entre os trocadores tubo-aletado e polipropileno. Porém se comparamos a eficiência de secagem entre os ensaios 2 e 6 (2-sem modificações, 6-com trocador em polipropileno), onde as condições ambiente são próximas, podemos estimar uma melhora de 15% na eficiência de secagem, utilizando o trocador em polipropileno. Para uma análise de eficiência energética deve-se utilizar a taxa específica de extração de umidade, MER, onde a potência aplicada ao ventilador é considerada.

9. Taxa específica de extração de umidade – MER: parâmetros de secagem

Com o objetivo de verificar a eficiência energética da secadora, a taxa específica de extração de umidade, MER, é analisada antes e depois das modificações na secadora. Como já foi observada, a eficiência de secagem aumenta com o aumento das cargas de tecido. Isto também se aplica para a taxa específica de extração de umidade, onde as cargas de algodão tipo lençol de 12 kg, possuem o MER substancialmente mais baixo que para cargas de 5 kg do mesmo tecido.

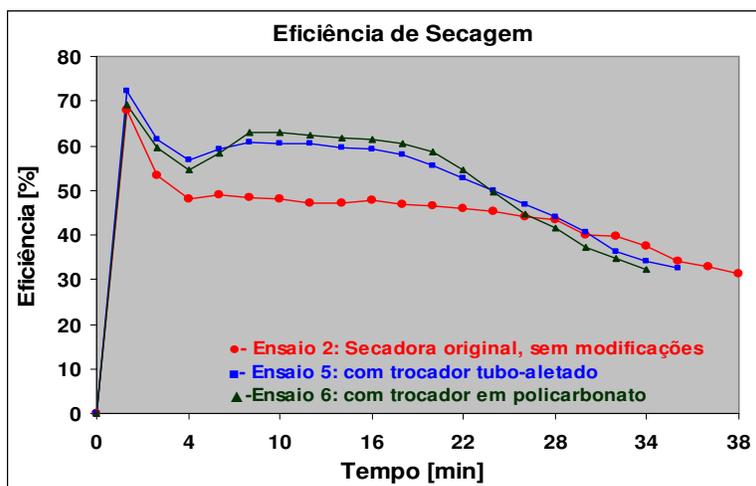


Figura 11. Eficiência de secagem para algodão 5 kg. Ensaios com e sem a utilização de trocadores de calor.

Outro fator importante é a análise do MER para tecidos diferentes. A Tab. 4 apresenta o MER para secagem do algodão, poliéster e jeans. Os valores obtidos são respectivamente 2,06, 2,05 e 2,43 kWh/kg de água removida. Para o poliéster a quantidade de água a ser removida do tecido é de 2 kg contra 2,5 kg do algodão. Isto indica que o poliéster possui baixa capacidade de absorção e de evaporação de água, em relação ao jeans. Já o jeans o tempo de secagem é de 1,45 horas, indicando mais uma vez a baixa capacidade de evaporação do tecido jeans. O algodão utilizado na secagem mostrou ser o mais econômico, o que representa um ponto positivo já que a maioria das roupas possui parcela elevada de algodão. Porém os experimentos demonstraram que a quantidade de fiapos acumulado na caixa coletora é maior para o algodão do que para o jeans e o poliéster o que diminui a vazão de ar aumentando a temperatura no tambor de secagem. Se a devida limpeza for negligenciada a temperatura dos tecidos pode atingir condições críticas, causando encolhimento ou mesmo danificação, além de aumentar a pressão do ar secante dentro do tambor, diminuindo o potencia de secagem do tecido.

9.1 Taxa específica de extração de umidade - MER: com a instalação dos trocadores de calor

A instalação dos trocadores de calor diminuiu o tempo de secagem em todos os ensaios, diminuindo conseqüentemente o MER. Porém é pequena a diferença de tempo de secagem entre os trocadores tubo-aletado e policarbonato, fazendo com que a diferença de MERs entre eles seja determinado pela menor perda de carga do trocador em policarbonato. A Fig. 12 apresenta a taxa específica de extração de umidade para os três ensaios: (a) sem

modificações na secadora; (b) utilizando o trocador tubo-aletado; (c) utilizando o trocador em policarbonato. Observa-se uma melhora de cerca de 2,7% com a utilização do trocador tubo-aletado, contra 6,5% com a utilização do trocador em policarbonato.

Tabela 4. Influência do Tipo de Tecido na Taxa Específica de Extração de Umidade, MER. Ensaios com algodão, poliéster e jeans. Cargas de 12 kg.

Tipo do Tecido	Taxa – MER [kWh/kg]
Algodão	2,05
Poliéster	2,06
jeans	2,43

10. Análise de Incertezas de Medição

Foi realizada uma análise de incertezas de medição para a potência líquida recuperada pelos trocadores de calor e para a taxa específica de extração de umidade MER. Para a potência líquida recuperada, a incerteza variou entre 2,4 e 3,2%, com 95% de grau de confiança. Na Tab. 5 apresenta o resultado da incerteza de medição para o valor médio de 2,8%.

Tabela 5. Resultados da incerteza de medição na potência líquida recuperada.

Com trocador tubo-aletado	Com trocador em policarbonato
$P_L=240\pm 7W$	$P_L=635\pm 17W$

Para a taxa específica de extração de umidade, MER, a incerteza de medição variou entre 1,1 e 1,3%, com 97% de grau de confiança.

11. Amortização dos trocadores

Outra importante vantagem é o custo de fabricação do trocador em policarbonato. Para fabricação do protótipo utilizado na secadora foram gastos cerca de R\$ 270,00 contra R\$ 350,00 do tubo aletado. Evidentemente trata-se de um custo aproximado, não considerando custos de montagem e outros. Porém estes devem ser bem limitados a cada unidade, o que nos permite utilizar os custos apresentados. Para o cálculo da amortização é considerando a potência líquida média recuperada em kW para ambos os trocadores e o custo do kWh, que em maio de 2004 na companhia paranaense de energia elétrica é de R\$ 0,3721, Fig. 12.

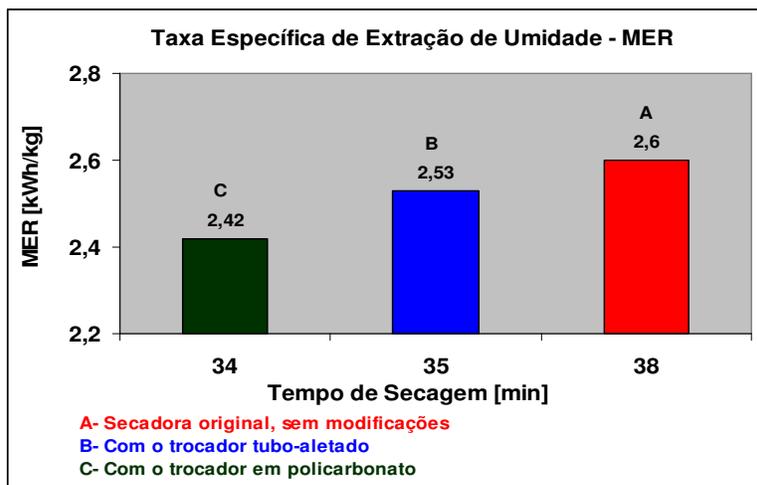


Figura 12. Taxa Específica de extração de umidade, MER, para três configurações: com e sem a utilização dos trocadores de calor.

Para o trocador tubo-aletado a amortização ocorre em 3910 horas, o que corresponde a 279 dias de uso contra 47 dias do trocador em policarbonato. Considera-se o uso da secadora por 14 horas/dia. Normalmente em hospitais, a quantidade de horas de uso de secadoras, supera 18 horas/dia devido à lavagem constante de enxovais dos leitos, o que diminui o tempo de amortização dos trocadores.

12. Conclusões

A taxa de evaporação da água no tecido mostrou-se substancialmente influenciada pela umidade relativa do ambiente, onde diferenças de até 20 % no tempo de secagem foram observadas. Conforme esperado, quanto mais úmido o ar ambiente menor a taxa de evaporação.

A eficiência de secagem aumenta com a quantidade de tecido no tambor, o que indica uma relação entre o volume do tambor por quilo de tecido a ser seco. Para o algodão, jeans e poliéster, o algodão mostrou-se o mais eficiente na secagem.

Observou-se que para vazões variadas a taxa de evaporação aumenta com o aumento da vazão de ar diminuindo o tempo de secagem. Impondo o dobro da vazão original, a uma diminuição de cerca de 10 % no tempo de secagem. Para impormos o dobro da vazão a um aumento de 492 W no consumo da secadora. Descontando este valor em kWh da economia atribuída ao menor tempo de secagem, temos uma economia líquida de cerca de 0,2 kWh. Para menores vazões a uma piora na taxa de evaporação, além de elevar a temperatura dos tecidos à condição crítica.

Estima-se uma economia líquida média de 635W de consumo com a utilização do trocador em policarbonato, contra 240W do trocador tubo-aletado, o que representa 6,3 e 2,4 % da potência total de consumo da secadora.

13. Referências

- Bontempi, A., 2004, "Eficiência Energética de Secadoras Industriais: Análise e Propostas Experimentais", Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- Bansal, P. K., Braun, J. E., 2001, "Improving the Energy Efficiency of Conventional Tumbler Clothes Drying Systems", International Journal of Energy Research. v. 25, pp. 1315-1332.
- Deans, J., 2000, "The modelling of a domestic tumbler dryer", Applied Thermal Engineering, vol. 21, pp. 977-990.
- Conde, M.R., 1997, "Energy conservation with tumbler drying in laundries", Applied Thermal Engineering, vol. 17, n.12, pp.1163-1172.
- Lambert, A.J. D. , Spruit, F. P. M. ,Clauss, J., 1991, "Modelling as a Tool for Evaluating the Effects of Energy-Saving Measures. Case Study: A Tumbler Drier", Applied Energy. v.38, pp.33-47.
- Oktay, Z., Hepbasli, A., 2003, "Performance Evaluation of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer". Energy Conversion & Management. v.44, pp. 1193-1207.

RECOVERY OF HEAT IN DRYER OF CLOTHES

Alessandro Bontempi

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia.
Rua Imaculada da Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brasil, CEP 80215-901
bontempi@hotmail.com

Luís Mauro Moura

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia.
Rua Imaculada da Conceição, 1155, Curitiba – PR, Brasil, CEP 80215-901
Luis.Moura@pucpr.br

Ivan Azevedo Cardoso

ivanac@brturbo.com

Abstract

It is presented in this work results obtained for use of heat exchangers to 12 kg capacity industrial dryer. Results have shown a heat energy consumption reduction. The modifications in the dryer are carried out with the use of two heat exchangers to profit the exit hot air for the preheating the inlet dryer cool air. One of them is a fin-tube heat exchanger. Another heat exchanger type plate-end was used. This exchanger was developed in the laboratories of the PUCPR in polycarbonate plates. It was verified that the use of both of the heat exchangers provided a liquid economy in the consumption of the dryer about 6% for the fin-tube and 10% for the polycarbonate plate-end.

Keywords. Thermal insulation, industrial dryers, laundries.