

# Desenvolvimento de uma Cabeça de Série de Secadora de Roupas a Bomba de Calor

Mauri Fortes<sup>1</sup>, Matheus M. Herzog<sup>2</sup>, Wanyr R. Ferreira<sup>3</sup>, José Carlos A. de Figueiredo<sup>2</sup>, Antônio Carlos de Souza<sup>1</sup>

**Resumo** – Condomínios, hotéis, hospitais e empresas similares apresentam alta demanda diária de roupa seca. As soluções incluem secagem elétrica ou a gás ou terceirização. Este trabalho apresenta uma análise sobre a viabilidade técnica do uso de bombas de calor (BC) como equipamentos a serem usados para secagem industrial de roupas. BCs são equipamentos que utilizam indiretamente a energia solar. A secadora a BC consome somente 30% da energia consumida pela secadora elétrica, mas requer o dobro do tempo de secagem da secadora elétrica. A BC desenvolvida permite funcionamento BC-eletricidade, com tempo de secagem idêntico ao de uma secadora elétrica e perda aceitável de eficiência. Supondo que haja seis turnos de secagem por dia, o tempo de retorno de investimentos é de aproximadamente um ano. Conclui-se que a secagem de roupa a bomba de calor é economicamente interessante para os setores de condomínios e similares.

**Palavras-chave** – bomba de calor, conservação de energia, fontes alternativas de energia, secagem de roupas.

## I. INTRODUÇÃO

Este trabalho refere-se ao projeto D-325 - CS do Projeto P&D 096 CEMIG D/ANEEL: Desenvolvimento de Secadoras Industrial/residencial de Roupas a Bomba de Calor, de Alta Eficiência (código Aneel: 4950-0325/2010), iniciado em junho, 2010, em execução. As entidades executoras são a CEMIG – D e a Consciente Ltda.

*A. Visão do problema: A importância da secagem eficiente de roupas em zonas urbanas*

Em áreas urbanas, densamente povoadas, há necessidade premente de secagem de roupas por aquecimento elétrico ou outro. A secagem natural por energia solar nem sempre é eficiente devido a longos períodos de chuva, principalmente no verão. A secagem natural muitas vezes é inacei-

tável devido a problemas de estética em condomínios. O uso de secadoras elétricas é prático e conveniente; porém, o consumo energético destes equipamentos é muito intenso e o custo energético associado é alto, pois se trata de um processo de baixa eficiência exérgica. Como alternativa ao uso de secadoras elétricas, em [1] discutem-se os aspectos principais do aquecimento com bomba de calor e confirma-se sua aplicabilidade em residências e na indústria. Entretanto seus dados foram obtidos para condições diferentes das existentes no Brasil.

O desempenho de uma secadora que usa bomba de calor pode ser medido por sua Taxa Específica de Extração de Umidade, TEEU, ou seja, a quantidade de água evaporada da roupa ou alimento por unidade de energia elétrica consumida [2] e [3].

O TEEU de bombas comerciais de calor usadas para desumidificação encontra-se na faixa entre 1 e 2 kg/kWh [4]. Deve-se mencionar que o calor de vaporização da água a 55 °C (328,16 K) é equivalente a um TEEU de 1,52 kg/kWh para um processo de evaporação 100% eficiente.

Não se encontraram na literatura muitos trabalhos associados à secagem de roupas e nenhum trabalho associado à secagem de roupas em temperaturas próximas de 55 °C. Nesta temperatura, os secadores a bomba de calor entrariam em faixa de competição com os secadores comerciais. Este é o objetivo geral deste trabalho, cujos objetivos específicos seguem abaixo, no contexto do projeto D-325.

*B. Objetivos do projeto*

- Aperfeiçoar, construir e testar uma secadora a bomba de calor industrial, de alta eficiência energética, com temperaturas de saída e tempos de secagem adequados, plausíveis de fabricação em série.
- Obter, da literatura, CEMIG D, fabricantes e usuários, dados para medir o impacto econômico-social de secadoras de roupa a bombas de calor ar-ar em médias e altas temperaturas.
- Apresentar relatórios, artigos e interação com contatos empresariais e científicos da área.

## II. METODOLOGIA

A Tabela I apresenta as características básicas elétricas e de funcionamento da secadora, como fornecidas pelo fabricante. A Figura I mostra a Secadora Industrial Elétrica (SIE), usada nos testes.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

M. Fortes e A.C. Souza trabalham na Consciente Ltda. (e-mails: [mauri.fortes@terra.com.br](mailto:mauri.fortes@terra.com.br); [acseleetro@terra.com.br](mailto:acseleetro@terra.com.br)).

M. M. Herzog e J.C.A. Figueiredo trabalham na CEMIG (e-mail: [MATHEUS.HERZOG@cemig.com.br](mailto:MATHEUS.HERZOG@cemig.com.br); [ayres@cemig.com.br](mailto:ayres@cemig.com.br)).

W.R. Ferreira trabalha no Ietec (e-mail: [wanyr@terra.com.br](mailto:wanyr@terra.com.br))

**Tabela I.** Características da secadora Industrial elétrica (SI-E).

Secadora	Tensão (V)	Peso da roupa centrifugada (kg)	Corrente (A)	Potência Máxima	Tempo de secagem (min.)
Industrial SI-E	220	15	41	9 kW	A avaliar



Figura 1. Detalhes da secadora industrial SI-E

#### A. Bomba de calor a ser acoplada à secadora

As características básicas da bomba de calor acoplada à secadora encontram-se especificadas na Tabela II. A bomba de calor foi projetada de forma a funcionar sob condições limites de aplicações práticas dos compressores selecionados. Utilizou-se o gás ecológico R134a em todos os experimentos. O sistema foi projetado para trabalhar com temperaturas de condensação de 65 °C, respeitando o limite máximo de pressão de condensação de 2427 kPa manométricos (352 psig), conforme dados dos fabricantes. Na Tabela II encontram-se os valores de EER, ou energy efficiency rating, que é determinado dividindo a potência de refrigeração em BTU/h pela potência elétrica usada em watts. Ao seu lado encontram-se os respectivos COPs de refrigeração, que equivalem aos EER expressos em termos da potência em kW de refrigeração pela potência elétrica usada, em kW.

Efetuar-se-ão vários experimentos visando o estabelecimento adequado de pontos de operação de compressores, trocadores de calor, diâmetros de tubulação, controles e especificação de válvulas de expansão. As quantidades de gás usadas foram determinadas por meio de medidas de TEEU instantâneas durante o carregamento de gás. Como resultados obtiveram-se valores finais de eficiência energética ou TEEU.

**Tabela II.** Componentes principais da bomba de calor usada na secadora industrial de 10 kW

Secadora industrial	
Componentes básicas	Especificação (sujeita a mudanças)
Potência consumida	3,7 kW
Condensador	13,7 kW (aproximadamente)
Evaporador	7 kW (aproximadamente)
Compressor	Compressor tipo <i>scroll</i> , com capacidade sugerida de condensador de 10 kW (aprox. 34000 BTU/h) à temperatura de evaporação de 7,2 °C e de condensação de 60 °C, 200-230 V, trifásico, 60 Hz.
EER e COP de refrigeração	9,14 e 2,68 às temperaturas de evaporação e condensação de 7,2 °C e 60 °C, respectivamente.
Válvula de expansão termostática	AAE2 NC - 75,8% de carregamento

#### B. Modificações a serem efetuadas

A secadora industrial elétrica foi transformada em uma bomba de calor pelo acoplamento do condensador em sua parte superior, onde há a entrada de ar. O condensador foi adaptado ao espaço físico e à potência de projeto, para garantir um fluxo de ar adequado e para compatibilização com a abertura de entrada de ar. Deve-se notar, pela Tabela II, que se utilizou um condensador superdimensionado para o compressor usado. O motivo para a escolha da capacidade do condensador foi compensar a perda de efetividade térmica e perda de carga (pressão) devido ao não ajuste geométrico entre o condensador, ventilador e entrada na secadora. Este fato foi investigado em testes preliminares.

#### C. Equipamentos e metodologia de medição e controle

Os critérios para dimensionamento de tubulações, perdas de carga e capacidades de refrigeração seguiram as normas estipuladas pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (1998)<sup>1</sup>. As principais variáveis medidas e respectivas metodologias encontram-se na Tabela III.

Houve controle e aquisição automática de dados online. Somente os pesos das roupas foram efetuados manualmente.

#### D. Modelagem termodinâmica e simulação

A eficiência energética de uma bomba de calor é normalmente definida pelo coeficiente de performance (COP), por sua vez definido por:

$$\text{COP} = \frac{\text{calor útil de saída}}{\text{energia de entrada}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

em que Q e W referem-se a calor produzido e energia elétrica usada;  $\dot{Q}$  e  $\dot{W}$  referem-se às respectivas potências.

A eficiência máxima teórica da bomba de calor é dada pelo seu rendimento de Carnot:

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{cond}}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{evap}}} \quad (2)$$

em que T é temperatura termodinâmica e os índices cond e evap referem-se a condensador e evaporador, respectivamente. COP é o símbolo para Coeficiente de Performance,

<sup>1</sup> ASHRAE. Refrigeration Handbook, Chapter 2. ASHRAE, Atlanta, Ga, 1998.

que expressa a relação entre a potência útil e a potência de entrada ou usada.

O COP de Carnot,  $COP_{Carnot}$ , não pode ser obtido fisicamente, mas é usado como um indicador para determinar a distância de um sistema de refrigeração do sistema ideal. Na prática, a eficiência real de bomba de calor fica geralmente entre 40-50% da eficiência de Carnot teórica.

Conforme já mencionado, um indicador de desempenho que é comumente usado para definir a secadora é a taxa específica de extração de umidade, TEEU (kg de água/kWh), cuja definição em termos de parâmetros usados neste trabalho é:

$$TEEU = \frac{\text{quantidade de água evaporada}}{\text{energia usada no secador}} \quad (3)$$

ou

$$TEEU = \frac{M_w(t)}{W(t)} \quad (4)$$

**Tabela III.** Variáveis, instrumentos e metodologia associada.

Variáveis	Instrumentos de medição e controle e metodologia das medidas:
Medidas de energia elétrica, potência e corrente associados a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toda a unidade secadora,</li> <li>• Bomba de calor, separadamente,</li> <li>• Secadora elétrica, separadamente,</li> <li>• Resistor elétrico.</li> </ul>	Medidor monofásico, bifásico e trifásico, com precisões de: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensão, corrente, potências: 0,2% do fundo de escala</li> <li>- Fator de potência: 0,5% do fundo de escala</li> <li>- Frequência: 0,1 Hz</li> <li>- Energia: 0,5%</li> <li>- THD: &lt;3%</li> </ul> Os valores acima se referem a dados obtidos a 25° C, respeitadas as faixas recomendadas para tensão e corrente.
Medidas de temperatura: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Do meio ambiente,</li> <li>• No interior do secador, na mesma posição do tambor, quer para secadoras elétricas, quer para secadoras a bomba de calor.</li> <li>• À saída do secador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indicador controlador de temperatura PID e de umidade, com precisão de 0,1 °C e 0,1% UR na faixa entre 1 e 60°C e 20 e 95% UR, com sonda PTC.</li> <li>• Indicadores portáteis de temperatura e de umidade, com precisão de 0,1 °C e 0,1% UR na faixa entre 1 e 60°C e 20 e 95% UR, com sonda PTC.</li> </ul>
Umidade relativa do ambiente. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Do meio ambiente,</li> <li>• À entrada do condensador e à saída da secadora</li> </ul>	Idem ao item acima referente a medidas de temperatura.
Peso inicial e instantâneo da roupa.	Balanças eletrônicas, digitais, com saídas RS-232, capacidade máxima de 30 kg e divisão mínima de 10g. Em tempos especificados de leitura de peso das roupas, para efeito de obtenção das curvas de secagem, a secadora foi desligada e as roupas rapidamente coletadas e pesadas, com resultados dos pesos indicados on-line.
Velocidade do ar na saída da secadora, com adaptador de medição de vazão	Medidor do tipo Termo-Anemômetro digital de fio quente com precisão de: <ul style="list-style-type: none"> <li>- de 0,15 a 3 m/s: ± 3% de leitura ± 0,03 m/s;</li> <li>- de 3,1 a 30 m/s: ± 3% de leitura ± 0,1 m/s;</li> <li>- de -20 a +80°C: ± 0,3% de leitura ±</li> </ul>

0,25°C;  
- de 0 a 99.999 m<sup>3</sup> /h: ± 3% de leitura ± 0,03\*área (cm<sup>2</sup>)

**Tabela III.** Variáveis, instrumentos e metodologia associada (cont.).

Variáveis	Instrumentos de medição e controle: Metodologia das medidas:
Medições instantâneas, on-line, de pressão de condensação	Equipamentos de medida de pressão de gás, com saída RS-485 para aquisição de dados em computador e unidade indicadora com capacidade de medida de 0 a 30 bar. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de trabalho: -40 a 85 °C;</li> <li>• Temperatura de aplicação: -40 a 150 °C;</li> <li>• Precisão: &lt; ±0,5 % do range de medida, incluindo histerese, linearidade e repetitividade;</li> </ul> Conector elétrico de engate rápido, com proteção IP67; <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saída: 4-20 mA a 2 fios.</li> </ul>
Medições instantâneas, on-line, de pressão de evaporação	Idem, item anterior referente à condensação. Capacidade de medida de 0 a 30 bar.
Controle de pressões de condensação e evaporação	Pressostatos Alco para pressões entre 0 e 6 bar e 0 e 30 bar, com diversos níveis de capacidades.

em que  $t$  é o tempo de secagem,  $M_w$  = quantidade de água evaporada (kg) e  $W$  = energia usada no secador (kWh).

Efetuaram-se avaliações usando as equações de balanço termodinâmico e de massa, abaixo citadas.

### Balanço de massa na secadora

A Figura 2 apresenta um esquema da secadora com as entradas e saídas de ar e água.

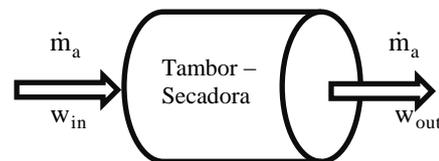


Figura 2. Detalhes da secadora industrial SI-E

Os índices in e out referem-se a entrada e saída, respectivamente e:

$w$  = razão de umidade do ar (kg de água/kg ar seco)

$\dot{m}_a$  = vazão mássica de ar seco (kg/min)

O balanço de massa na secadora fornece:

$$\left. \frac{dm_w}{dt} \right|_{\text{no interior do secador}} = \dot{m}_{ar,in} \cdot w_{in} - \dot{m}_{ar,out} \cdot w_{out} \quad (4)$$

ou

$$\frac{dm_w}{dt} \approx \frac{\Delta m_w}{\Delta t} = \frac{m_w(t + \Delta t) - m_w(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

Definindo razão de conteúdo de água, RU, por:

$$RU = \frac{m_w(t) - m_{wf}}{m_{w0} - m_{wf}} \quad (6)$$

em que  $m_w(t)$  é a massa de água dentro da secadora em um tempo  $t$  qualquer,  $m_{w0}$  é a massa de água dentro da secadora no tempo inicial e  $m_{wf}$  a massa de água dentro da secadora no tempo final, chega-se a:

$$\frac{\Delta m_w}{\Delta t} = \left( m_{w0} - m_{wf} \right) \frac{-RU(t + \Delta t) - RU(t)}{\Delta t} \approx \left( m_{w0} - m_{wf} \right) \frac{-dRU}{dt} \quad (7)$$

### E. Projeto da bomba de calor de 10kW

O projeto da BC levou em conta o cálculo das propriedades do fluido refrigerante (dados de propriedades termodinâmicas e termofísicas, e comparações de refrigerantes), a análise de ciclo, o sistema a ser dimensionado, a simulação do sistema e a avaliação do funcionamento.

### F. Determinação de razões de conteúdo de água

Uma roupa ou qualquer material higroscópico, quando deixado por um longo tempo num ambiente, entra em equilíbrio térmico e higroscópico com este ambiente. Assim, uma determinada massa de roupa secaria ou absorveria mais água de modo a atingir o peso de equilíbrio. Este valor de equilíbrio seria o valor ideal a ser atingido após secagem. Secagem além deste peso levaria a roupa, uma vez deixada armazenada, a absorver água. Se a roupa sair da secadora com um peso maior que a de equilíbrio higroscópico, ela sairia úmida e, eventualmente, perderia água. Na prática, usa-se a razão de conteúdo de água, RU, para que os dados obtidos possam ser mais bem comparados, uns com os outros e para que dados de valores de equilíbrio possam ser usados em uma vasta gama de experimentos. Entretanto, tendo por base nossos dados experimentais, preferiu-se adotar o valor de equilíbrio com as condições do ar de secagem, por ser este valor mais bem definido que o valor de equilíbrio higroscópico com as condições de armazenamento de roupas.

Efetuararam-se testes com quantidades fixas de roupa, apropriadas para a secadora industrial. Assim, as roupas foram deixadas entrar em equilíbrio naturalmente em varais, após terem sido secas na secadora, por, no mínimo, 16 horas. Escolheram-se roupas representativas de secagem domiciliar e de hotéis e similares, como normalmente especificadas em manuais de secadoras elétricas.

### G. Obtenção de dados experimentais de secagem

A metodologia para obtenção dos dados experimentais de secagem seguiu os seguintes passos:

#### G.1. Tratamento da roupa a ser seca.

- Molhar a roupa. A seguir, colocar a roupa numa lavadora de roupas e deixar que sofra um processo de centrifugação.
- Após vários testes, determinar os valores próximos de pesos de roupa seca e úmida centrifugada, adequadas à secadora residencial e às secadoras industriais.
- Para garantir uniformidade de amostras, quando o peso da roupa centrifugada ficar abaixo dos valores citados, acrescentar um pouco de água. Testes preliminares indicaram que os pequenos acréscimos de água não afetaram as taxas de secagem. Quando o peso ficava acima dos valores desejados, deixava-se que a roupa sofresse um tempo maior de centrifugação.

#### G.2. Estabelecimento da curva de secagem

Após vários experimentos, ao se notar o caráter assintótico da perda de umidade com o tempo, ou seja, que a curva de secagem se aproximava de um limite estabeleceu-se intervalos de medição de 15 e 30 minutos. O tempo de secagem foi estabelecido pelo tempo em que havia apreciável

diminuição de secagem, ou tempo em que a roupa podia ser considerada seca, tendo por base a roupa previamente seca.

Assim, no tempo suposto de duração do experimento, a máquina foi desligada e a roupa rapidamente coletada e pesada. Testes preliminares mostraram que não houve perda substancial de água, devido à sua movimentação e pesagem, mesmo nos intervalos iniciais de secagem, quando o teor de umidade da roupa ou produto encontrava-se num máximo, ou seja, sensorialmente muito úmida.

G.3. Durante o teste, foram efetuadas as seguintes medidas (obtidas por meio de aquisição e controle automático de dados):

- a energia elétrica gasta,
- a temperatura na entrada e no interior da secadora,
- a temperatura ambiente (dois medidores),
- a umidade relativa do ambiente (dois medidores),
- a velocidade em pontos da saída.

G.4. O teste termina após um período maior que o necessário para atingir o peso relativo de equilíbrio

## III. ESTADO DA ARTE

O processo de secagem de biomateriais em geral requer ar em altas temperaturas, consome muita energia e causa poluição ambiental; o uso de bombas de calor é muito apropriado no caso de materiais termo-sensíveis [5]. De acordo com [6], a alta qualidade dos produtos secos é a principal vantagem do uso de BCs; além deste fato, BCs permitem controlar propriedades do produto, tais como a porosidade, as taxas de re-hidratação, resistência, textura e cor.

Em comparação com os outros métodos, as vantagens do uso de BCs em secagem conforme [7] e [8] são:

- Melhoria de eficiência de secagem.
- O calor latente é recuperado e regenerado novamente para o ciclo de bomba de calor.
- A recuperação de calor resulta em menor consumo de energia por cada unidade de água removida. Pode-se efetuar controle rigoroso das condições de secagem - Secadoras a bomba de calor permitem o controle acurado e independente da temperatura, umidade e taxas de fluxo de ar.
- Condições controladas de secagem de materiais termo-sensíveis permitem um aumento significativo da produção.
- Podem-se operar bombas de calor numa vasta gama de condições de secagem, normalmente de 0 a 100 °C (com aquecedores elétricos auxiliares) e umidades relativas de 15 a 80% (com sistema de umidificação). Esta gama de condições de secagem faz com que a secadora seja versátil podendo ser usada para diferentes tipos de materiais.
- Há sensores e controladores que permitem ajustar a temperatura do evaporador e condensador de modo a produzir condições de secagem exigidas na prática
- Uma secadora a bomba de calor pode ser considerada como um "cavalo de batalha" capaz de funcionar 24 h por dia. Assim, o tempo necessário para atingir o ponto de equilíbrio de custo pode ser significativamente reduzido através de menor custo operacional e maior volume de produção.

Ainda de acordo com os autores citados, as principais limitações e conseqüentes soluções de problemas associados às secadoras a bomba de calor são:

- Questões ambientais – A utilização de gases nocivos à camada de ozônio nos sistemas das bombas de calor tem causado grande preocupação aos ambientalistas. Entretanto a tendência de mudança para a utilização de refrigerantes ecológicos e naturais como amônia e água tem eliminado esta desvantagem nas secadoras a bombas de calor.
- Manutenção – as secadoras a bombas de calor requerem manutenção regular dos compressores, filtros de refrigerantes, trocadores de calor etc., para manter a secadora no ponto ótimo de operação. Recarga de refrigerante é necessária quando detectado vazamento de refrigerante; neste caso, a performance do ciclo da bomba de calor é altamente afetada. Um bom projeto faz com que uma bomba de calor tenha vida útil comparável à de unidades de refrigeração usuais.
- Vazamento de refrigerante – o refrigerante pode vaziar para o ambiente em caso de rachaduras nos tubos devido ao sistema pressurizado. Caso ocorra vazamento, a pressão do ciclo na bomba de calor cai gradualmente causando apreciável perda de desempenho do secador. Assim, manutenções preventivas podem melhorar sensivelmente a relação custo-benefício de BCs.
- Custos – comparado ao sistema de secagem solar, o custo inicial para montar uma secadora a bomba de calor pode ser maior. Grande parte dos custos é devida à utilização de controladores, compressores, trocadores de calor etc. No entanto, a capacidade de secadoras a bomba de calor para recuperar o calor se traduz em menores custos operacionais e compensam os custos mais elevados de capital.

#### *A. Desenvolvimento e tendências da secagem a bomba de calor*

Trabalhos em pesquisa e desenvolvimento atualmente têm recebido considerável atenção para o melhor projeto de sistemas de bombas de calor. Muitos destes trabalhos estão direcionados principalmente ao ciclo da bomba de calor. Entretanto alguns estudos como o de [9] têm investigado maneiras de projetar câmaras de secagem econômicas. Existem também trabalhos complementares sendo feitos nas áreas de estratégias de controle e qualidade de produto.

Na referência [10] apresenta-se uma revisão sobre os estudos de aplicação de secadoras a bombas de calor para frutas e vegetais e afirma-se que este tipo de secadora melhora a eficiência energética e apresenta um menor consumo de combustível.

Na referência [11], utilizaram-se modelagem matemática e testes experimentais para desenvolver um método de controle do ponto de parada da secagem baseado no conteúdo de umidade do ar de secagem do ponto de equilíbrio com o ambiente.

Na referência [12], analisou-se a viabilidade do desenvolvimento de um sistema integrado de ar condicionado com secador de roupas apropriado para climas tropicais úmidos em prédios de apartamentos urbanos. Os resultados mostraram que usando o calor residual do condensador, pode-se secar a roupa em um ambiente

controlado em um tempo menor e com um custo marginal de energia adicional.

Recentes desenvolvimentos em secadoras utilizando bombas de calor focaram os processos que requeriam controle e, particularmente, o compressor. Compressores scroll recentes apresentam eficiência energética e tamanho tecnicamente atrativos para o processo de secagem.

Na referência [13], analisou-se o desempenho de um secador de roupa de tambor doméstico, onde os elementos elétricos de um secador padrão foram substituídos por um trocador de calor água-ar de tubos aletados. O secador modificado apresentou menor tempo de secagem, menores taxas de extração de umidade para a mesma potência de entrada e, portanto, significativamente mais eficiente do que o secador padrão. Trocadores de calor com características avançadas como tubos com superfícies rugosas e aletas externas onduladas, promovem melhores trocas de calor e reduzem o tamanho dos trocadores de calor. Estas características tornam as secadoras a bombas de calor mais compactas, melhorando a eficiência energética e permitem a implementação de melhores estratégias de controle do ar de secagem.

Nos EUA, segundo [14], o uso de bombas de calor para secagem de roupas não levou a um impacto grande devido ao baixo custo de energia e ao maior tempo de secagem envolvido (em torno de 2 vezes maior que secadoras de roupa elétricas). Já na Austrália todas as secadoras de roupa levam um rótulo de consumo de energia que usa um sistema de 0 a 6 estrelas para representar o nível de eficiência do equipamento<sup>2</sup>. Além deste fato, o governo australiano recomenda que um usuário moderado ou grande de secadoras considere o uso de secadoras a gás ou bomba de calor; assim, apesar de seu maior custo inicial, no longo prazo, a economia de energia e custos associados compensam o gasto inicial.

As considerações mais importantes envolvendo bombas de calor estão resumidas a seguir [15]:

- Os compressores das bombas de calor devem estar habilitados a operar continuamente por longos períodos sem sofrer manutenção periódica, considerando o fato que muitos secadores deverão operar vinte e quatro horas por dia para produzir produtos consistentes na saída.
- A capacidade de aquecimento e temperatura de operação do gás refrigerante deve satisfazer o processo de secagem.
- A diferença de temperatura entre o evaporador e o condensador para o estágio vapor-compressão não deve exceder 40°C para manter o COP na faixa de 3 a 4.

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes com a secadora industrial, em sua configuração inicial, foram efetuados de acordo com a recomendação do fabricante de se utilizar 15 kg de roupa seca equivalente. As Tabelas IV e V mostram, respectivamente, os dados referentes às condições experimentais com a Secadora Industrial (SI) antes de modificação, ou seja, enquanto funcionava somente com aquecimento elétrico (SI-E), e, após a modificação, já funcionando como Bomba de calor (SI-BC). Deve-se lembrar que a secadora a bomba de calor foi construída a partir da secadora equivalente a energia elétrica e permite

<sup>2</sup><http://www.sustainable-energy.vic.gov.au/seinfo/your-home/appliances/clothes%20dryers.asp>

uso combinado de BC e resistor com controle. Utilizou-se de modelagem matemática, não descrita, por brevidade, para otimizar os componentes e pontos de operação. Esta bomba de calor difere, portanto da BC construída e testada antes [7]. O COP da BC, obtido experimentalmente, foi de 3,5 a 55 °C e de 2,0 a 60 °C. Utilizou-se, portanto, a BC a 55 °C de temperatura de condensação e efetuou-se aquecimento resistivo adicional para fazer o sistema funcionar com o tempo de residência de uma secadora elétrica.

As Figuras 3 e 4 mostram detalhes da bomba de calor desenvolvida.



Figura 3. Secadora industrial a bomba de calor com resistor. Vista da frente e do painel lateral de controle.

Os dados das Tabelas IV e V mostram que a secadora elétrica funcionou, comparativamente com a secadora a bomba de calor:

1. Em temperatura no interior da câmara de secagem apreciavelmente maior, ou seja, numa temperatura média de 45,3 °C comparada com 35,5 °C, da secadora a BC.
2. Em temperatura do ar na saída da câmara de secagem apreciavelmente maior, ou seja, numa temperatura média de 49,2 °C comparada com 36,7 °C, da secadora a BC.
3. Com velocidade do ar, medido na saída maior, ou seja, com velocidade média de 17,6 m/s comparada com 15,4 m/s, da secadora a BC.
4. Com potência elétrica total apreciavelmente maior, ou seja, com potência média de 17,0 kW comparada com 2,5 kW, da secadora a BC.
5. A menor potência da BC é devido ao fato que ela operava com um compressor de 3 HP; além deste fato, adicionou-se um termostato à BC que a desligava quando a pressão de alta ultrapassava 25,9 bar (375 psi), como recomendado pelo fabricante. Assim,

a potência elétrica média ficou consideravelmente abaixo da potência da secadora.

6. Quando se atuava com a BC e o resistor ligado (com controlador PID), o sistema apresentou comportamento idêntico ao de uma secadora elétrica, exceto, obviamente, pelo consumo menor.



Figura 4. Secadora industrial a bomba de calor com resistor. Vista da traseira e do condensador acima..

**Tabela IV.** Condições experimentais – Testes com a Secadora Industrial Elétrica

	Valores Médios	Desvio padrão	Valores Mínimos	Valores Máximos
Temperatura ambiente, °C	26,3	2,8	24,0	30,1
Umidade relativa	56%	5%	48%	61%
Temperatura no interior da secadora, °C	45,3	6,6	38	55
Temperatura na saída da secadora, °C	49,2	6,2	43,2	58
Velocidade do ar, m/s	17,6	0,1	17,4	17,7
Peso da roupa no início da secagem, g	17700	2	17700	17705
Potência total, kW	17,0	0,3	16,7	17,5

**Tabela V.** Condições experimentais – Testes com Secadora Industrial com Bomba de Calor

	Valores Médios	Desvio padrão	Valores Mínimos	Valores Máximos
Temperatura ambiente, °C	30,7	2,4	24,6	35,0
Umidade relativa	52%	9%	38%	82%
Temperatura no interior da secadora, °C	35,5	1,8	31,0	38,2
Temperatura na saída da secadora, °C	36,7	1,9	30,7	40,8
Velocidade do ar, m/s	15,4	0,6	12,9	16,4
Peso da roupa no início da secagem, g	17299	433	16725	17715

Potência total, kW	2,5	0,2	2,2	3,2
--------------------	-----	-----	-----	-----

Os gráficos nas Figuras 5 e 6 mostram os dados de TEEU para a secadoras elétrica e a BC. Por simplicidade, nestas Figuras incluem-se somente alguns exemplos típicos dos testes experimentais. A curva de ajuste na Figura 5 foi obtida para a temperatura ambiental  $T_A = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

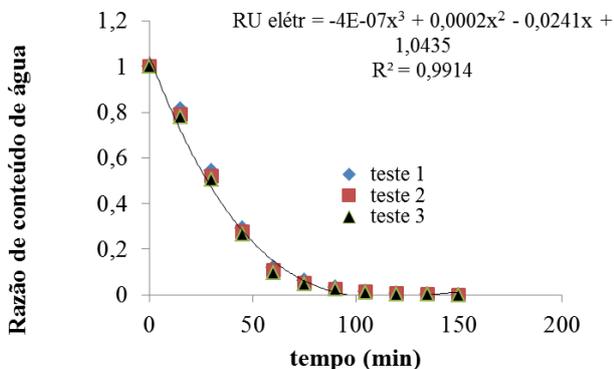


Figura 5. Curva de secagem de roupas na secadora elétrica, para  $T(\text{ambiente}) = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

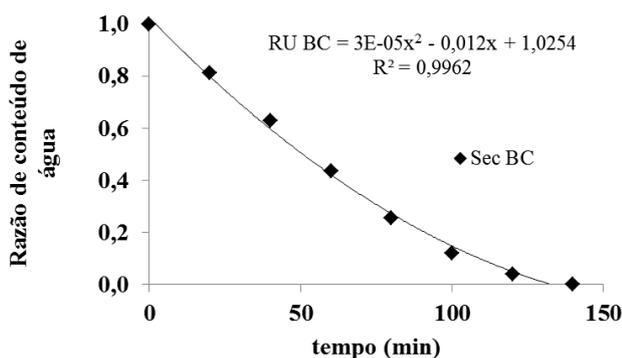


Figura 6. Curva de secagem de roupas na secadora a BC, para  $T(\text{ambiente}) = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Deve-se notar que a secadora a BC seca roupas mais lentamente que a secadora elétrica; o tempo de secagem depende do teor final desejado de água nas roupas.

O tempo de secagem necessário para atingir a razão de teor de água igual a 0,2 é de 55 min para a SI-E e 88 min para a SI-BC. Assim, o tempo de secagem requerido pela BC é, aproximadamente, 2,2 maior que o tempo de secagem na secadora elétrica.

As Figuras 7 e 8 permitem comparar a secadora elétrica industrial com a secadora com bomba de calor, de forma quantitativa, levando em consideração o TEEU e as curva de secagem (Figuras 6 e 7). Pode-se observar que o TEEU da secadora a BC é muito maior que a correspondente taxa específica de extração de umidade da secadora elétrica, para toda a faixa de razão de teor de água (RU). Fato que demonstra a superioridade em termos de eficiência da secadora a BC em comparação com a elétrica. Deve-se notar que a secadora a BC extrai mais de 60% de água por kWh que a secadora elétrica.

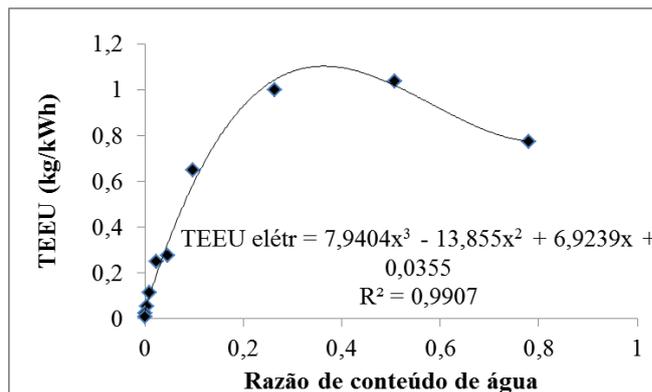


Figura 7 Taxa específica de extração de umidade da secadora elétrica

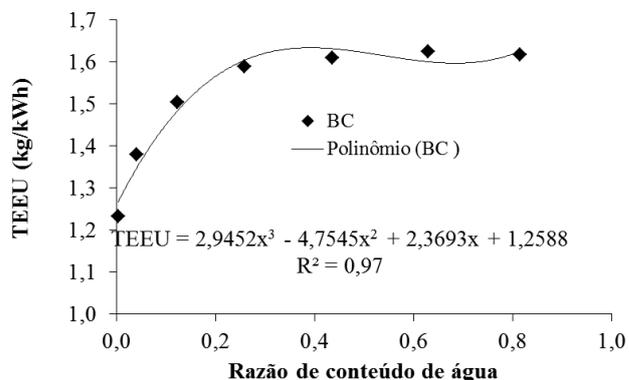


Figura 8 Taxa específica de extração de umidade da secadora a

## V. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- É viável a utilização de bombas de calor para secagem de grão, alimento e roupas em temperaturas até  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , usando compressores disponíveis no mercado brasileiro.
- Os resultados mostram que secadoras de roupas podem ter coeficientes de performance aproximadamente igual a 3, mesmo em temperaturas superiores a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Embora o conceito apropriado para secagem seja o coeficiente de taxa específica de extração de água (TEEU) ou o seu inverso, a quantidade de energia gasta por unidade de água evaporada, o COP fornece uma medida válida da eficiência nos casos de secagem ou tratamento térmico, pois é a energia térmica disponível por unidade de energia elétrica gasta no processo.
- Os resultados experimentais mostram que a secadora elétrica industrial seca roupas, num tempo cerca de duas vezes menor que a secadora a bomba de calor. Entretanto, a secadora a bomba de calor gasta apenas cerca de 40% da energia gasta pela secadora elétrica, ou seja, permite uma economia energética de 60%. A redução associada de custos de secagem é apreciável. De fato, mesmo aquecendo resistivamente a secadora até  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , uma simples ponderação energética mostra que o COP se mantém em 1,8, ou seja, com economia energética de 8kWh para cada kWh gasto.

- d. A análise estatística e os dados do item anterior mostram que, pelo uso de secadora industrial a bomba de calor, há a possibilidade de se economizar 1 kWh por kg de água evaporada. Numa única operação de secagem retira-se, pelo menos, 6 kg de água da roupa colocada na secadora (em torno de 21 kg de roupa molhada). Assim, pode-se economizar 6 kWh, ou R\$ 3,50, em valores atuais de custo energético, para cada operação de secagem. Supondo que haja 6 turnos de secagem por dia, haverá uma economia mínima de R\$ 21,50 por dia. Num mês, esta economia se transforma em R\$ 645,00. Assim, não levando em consideração o valor temporal do dinheiro investido, em um ano, a economia seria de R\$ 7740,00 que mais que compensam o custo de conversão da secadora elétrica para secadora a bomba de calor. Estes dados são mais acurados que os apresentados em [7].

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Stuij, "Heat pumping technologies, applications and markets," *Energy for Sustainable Development*, vol.2, n. 3, pp.27-40, 1995.
- [2] S. Prasertsan, P. Saen-Saby, "Heat pump drying of agricultural materials," *Drying Technology*, vol. 16, n.1/2, pp.235-50, 1998.
- [3] A. Ameen, G. K. Nathan, "An investigation into the feasibility of a heat pump assisted dryer," in: *Proc. 1996 International Energy Conf.*, Beijing, pp. 152-55.
- [4] D. L. Hodgett, "Efficient drying using heat pump," *The Chemical Engineer*, n.311, p. 510-512, 1976.
- [5] O. Alves-Filho, I. Strømme, "The application of heat pump in drying of biomaterials," *Drying Technology*, vol. 14, n.9, pp. 2061-2090, 1996.
- [6] I. Strømme, K. Krammer, "New applications of heat pump in drying processes," *Drying Technology*, vol.12, n.4, pp. 889-901, 1994.
- [7] J. C. A. Figueiredo, M. Fortes e A. C. SOUZA, "Desenvolvimento de Protótipos de Bombas de Calor para Secagem de Roupas e de Grãos e Alimentos em Médias Temperaturas (até 55 °C)," CEMIG/ANEEL, Belo Horizonte, MG, Relatório técnico, 2005.
- [8] K. J. Chua, S. K. Chou, J. C. Ho, M. N. A. Hawlader, "Heat pump drying: recent developments and future trends," *Drying Technology*, vol. 20, n. 5, pp. 1579-1610, 2002.
- [9] S. K. Chou, M. N. A. Hawlader, J. C. Ho, and K. J. Chua, "The contact factor for dryer performance and design," *International Journal of Energy Research*, vol. 23, p. 1277-1291, 1999.
- [10] N. Colak, A. Hepbasli, "A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2180-2186, 2009.
- [11] A. Bing Ng, S. Deng, "A new termination control method for a clothes drying process in a clothes dryer," *Applied Energy*, vol., 85, pp. 818-829, 2008.
- [12] A. Ameen, S. Bari, "Investigation into the effectiveness of heat pump assisted clothes dryer for humid tropics," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 1397-1405, 2004.
- [13] P. Bansal, S. Islam, K. Sharma, "A novel design of a household clothes tumbler dryer," *Applied Thermal Engineering*, vol.30, pp. 277-285, 2010.
- [14] M. Lowe, (2005, Janeiro). *Laundry technology: Heat Pump Dryer: High cost holds back energy-saving technology*, [Online]. Disponível em: <http://www.ammagazine.com/CDA/ArticleInformation/features/>
- [15] C. Strumillo, R. Zylla, "Optimization of heat pump dehumidifier," in *Proc. 1985 Drying '85*, Mujumdar, A.S., Ed.; Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, pp.21-32, 1985.