

CONSEQÜÊNCIAS DA ALTERAÇÃO DO FLUXO DO AGENTE SECANTE NO CONSUMO DE ENERGIA EM SECADOR VERTICAL

Paper CIT04-0424

Paulo Magalhães Filho

Unesp-Campus de Guaratinguetá – Departamento de Energia
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho
12.516-410 Guaratinguetá – SP
pfilho@feg.unesp.br

Jefferson Almeida Ribeiro

Unesp-Campus de Guaratinguetá – Departamento de Energia
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho
12.516-410 Guaratinguetá – SP
jefferson.aribeiro@bol.com.br

Resumo. A competitividade entre os fabricantes, aliada as maiores exigências do mercado consumidor, tornou-se imprescindível na avaliação e aceitação de eletrodomésticos, a necessidade de se fabricar equipamentos que operem com maior rendimento e menor consumo de energia. Tais fatos motivam a estudar e analisar o desempenho de sistemas suspensos de secagem de uso doméstico, com relação às características de funcionamento e eficiência no processo de desumidificação de tecidos, pois os parâmetros que influenciam o desempenho dos secadores e os mecanismos de secagem devem ser conhecidos nos graus de precisão requeridos para cada aplicação. Os parâmetros avaliados neste trabalho são os seguintes: conteúdos de umidade do tecido no início e no final do processo, condições de transferência de calor, a temperatura, a velocidade, a direção e a umidade absoluta do fluxo do meio de fornecimento de calor, e a distribuição de temperatura superficial do tecido. As previsões teóricas são comparadas com os resultados experimentais obtidos em uma bancada de testes onde, conforme configurações apresentadas, simularam-se as condições reais de trabalho do sistema. Foram selecionados os tecidos mais utilizados para manufatura de vestuário: jeans índigo, flanela, cotton-lycra, brim, tergal, viscose e linho. Foram verificadas importantes reduções no consumo de energia quando alteradas as condições do fluxo do agente secante.

Palavras chave: secagem de tecidos, consumo de energia, secador.

1. Introdução

Secadores elétricos são responsáveis por aproximadamente 3% do consumo de energia em residências nos países do hemisfério norte (onde o aquecimento de ar e água são responsáveis por 75% do total do consumo de energia), e cerca de 10% em regiões de clima moderado a quente. Embora muitos estudos tenham sido realizados sobre esse assunto, é estimado que o consumo médio anual de energia elétrica em secagem de roupas numa residência típica (família com 4 pessoas) está em torno de 900 kWh, o que está próximo de um número correspondente a 1200 kWh para um forno elétrico.

A secagem não é uniforme numa mesma peça de roupa ou de uma peça para outra, e em alguns tipos de secadores é necessário um aquecimento extra ou apenas um breve aumento de temperatura para os tecidos de secagem rápida, o qual reflete tanto sobre a qualidade da secagem quanto sobre o controle da energia gasta nos secadores elétricos convencionais de roupas (Hamid, 1991).

Procedimentos devem ser desenvolvidos através de investigações teóricas e experimentais do processo básico de secagem, assim como através do estudo detalhado de secadores de diversos tipos, para obter-se uma modelagem representativa do processo para posterior simulação. As informações obtidas podem ser de grande ajuda em estimativas quantitativas de melhoria, adquiridas em cada variação dos fatores que influenciam no desempenho. Baseado nessas grandezas e fatores selecionados pode-se decidir quais serão as variações mais benéficas para a melhoria do desempenho do secador.

Vários são os parâmetros que influenciam o desempenho dos secadores, e na maioria dos casos a natureza da influência e seu papel no mecanismo de secagem devem ser conhecidos, pelo menos nos graus de precisão requeridos para cada aplicação. Tais parâmetros podem ser os seguintes: conteúdo (ou teor) de umidade do tecido no início e no final do processo, conteúdo crítico de umidade do tecido, peso específico do tecido, condições de transferência de calor, temperatura do meio de fornecimento de calor, o tipo de envoltório do fluxo de ar, a velocidade e a umidade relativa do fluxo de ar, a taxa de exaustão, etc. (Prabhu and Parajia, 1981).

A secagem por aquecimento é o método mais comum, o qual tem como objetivo principal a remoção de umidade, sendo significativas também as concomitantes variações de propriedades estruturais, mecânicas, térmicas e biológicas dos materiais. O grau de alcance deste objetivo é uma função dos parâmetros de projeto do processo, e principalmente da duração do mesmo.

Os parâmetros do processo de secagem têm sido selecionados com a ajuda de critérios empíricos que se diferenciam pela ocorrência ou não de vários fenômenos. É comum a apresentação dos resultados cinéticos de modelos para ilustrar o típico comportamento do material úmido durante a secagem, mostrando as relações entre os parâmetros do material e as variações decorrentes devidas ao processo.

2. Comportamento dos materiais durante a secagem

Com base no comportamento durante a secagem é possível dividir os materiais em duas classes principais observando suas estruturas.

Sólidos que têm espaços vazios e abertos relativamente grandes: são sólidos granulados ou cristalinos que retêm a umidade nos seus interstícios, ou em poros superficiais, rasos e abertos. Nestes materiais, o movimento da umidade é relativamente livre e ocorre em consequência da interação das forças gravitacionais e das forças de tensão superficial (ou capilares). Este sólido em si, o qual é usualmente inorgânico, é pouco afetado pela presença do líquido e não sofre grande ação do processo de secagem. Por isso as condições de secagem podem ser escolhidas com base na comodidade e na vantagem econômica, com pequena preocupação a respeito dos efeitos das condições de secagem sobre as propriedades dos materiais após a mesma. Nestes sólidos, os teores de umidade de equilíbrio são usualmente muito próximos de zero.

Sólidos com estruturas fibrosas, gelatinosas ou amorfas: constituem os materiais orgânicos. Estes materiais retêm a umidade como parte integrante da estrutura do sólido, ou então retêm a mesma no interior de fibras ou de poros delgados internos. Nestes materiais, o movimento da umidade é lento e ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido. As curvas de secagem desses materiais mostram períodos muito curtos de taxa constante e conseqüentemente elevados valores de teor crítico de umidade. O 1º período de taxa decrescente é muito reduzido, e a maior parte do processo de secagem ocorre no 2º período. A velocidade de secagem é controlada pela difusão do líquido através do sólido. Os teores de umidade de equilíbrio são, em geral, elevados em virtude da água presente fazer parte da estrutura do sólido, e sua remoção total danificar o material. As camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente que o interior, e quando a taxa de secagem é muito elevada, ocorrem grandes gradientes no teor de umidade no interior do sólido, e como consequência a estrutura se rompe ou se deforma. Podem ocorrer casos onde se forma uma camada de material seco relativamente impermeável, que dificulta ou impossibilita o prosseguimento da secagem no interior do mesmo, ou em que se acentue o gradiente do teor de umidade no sólido, e dependendo do material, causar a sua deterioração.

Em virtude destas circunstâncias, as condições da realização da secagem são relevantes e devem ser escolhidas tendo em vista os efeitos que podem ter sobre a qualidade do material (Foust et al., 1982).

3. Secagem convectiva de massas fibrosas

A migração da umidade em meios fibrosos e porosos pode ocorrer de várias maneiras: por difusão de líquido ao longo das fibras devido a gradientes de umidade e temperatura; pelo movimento devido a capilaridade e gravidade dentro dos espaços entre as fibras; e pela difusão de vapor devido às variações na pressão de vapor da umidade através da massa fibrosa. Fluxo de Knudsen ou efusão existe quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for de dimensões similares ao espaço entre as fibras. Isto é improvável sob a maioria das situações comerciais de secagem. A difusão de superfície da umidade sorvida pode também ocorrer, mas, tal movimento pode não influenciar significativamente o transporte de umidade, pois o material migrante pode simplesmente recircular em torno de uma bolsa de ar (Phillip and De Vries, 1957).

Com algumas fibras higroscópicas é incerta a ocorrência de um período inicial de taxa de secagem constante, dando origem a dúvidas sobre a estimativa de um apropriado conteúdo crítico de umidade. Os dados de Walker (1969), para secagem de lã, não tricotada, em recipientes metálicos sob condições externas constantes, mostram um valor máximo para a taxa de secagem, mas, nenhum período na qual as taxas de secagem permaneceram constantes. Além disso, uma massa de fibras livres não constitui um corpo de capilaridades e porosidades, pois o mecanismo que dá origem a um período de taxa constante numa malha porosa não surge num simples amontoado de fibras.

Experimentos feitos por Liang et al. (1990) sobre o transporte de água e n-propano através de amostras de polpa de papel *kraft* e papel de filtro confirmam a não importância da capilaridade. Até mesmo com tecidos tricotados, a secagem visa a evaporação em todas as profundidades no material, e daí, a difusão de vapor.

Não havendo nenhum ponto crítico, Langrish et al. (1991) sugerem que pode ser possível derivar as curvas de taxa de secagem baseado no conteúdo de umidade inicial, preferivelmente ao conteúdo crítico de umidade. Mostram também que algumas vezes é possível estimar um ponto crítico aparente, a partir dos dados obtidos no período de taxa decrescente, na secagem de finas camadas de material.

Com materiais fibrosos compactados, tais como bobinas de tecido ou somente de fio, o transporte capilar de umidade é possível. Nissan et al. (1959) estudaram a secagem de uma peça de tecido *Terylene* (uma fibra de poliéster) de 127 mm de largura enrolada num carretel para dar 25 mm de profundidade de material, e a secagem de uma bobina similar de um tecido de lã confeccionado com fio pesado e felpudo. Um conteúdo crítico de umidade de 0,73 kg/kg foi encontrado para a bobina de *Terylene*, mas para a lã o valor foi de 2,96 kg/kg. Os testes relatados por Bell e Nissan (1959) sugerem que a secagem pode ser modelada em termos de um deslocamento do plano de evaporação, desde a superfície exposta até o interior.

Gummel e Schlünder (1980) examinaram a secagem em circulação longitudinal de malhas têxteis e de papel, as quais são consideradas como malhas porosas regulares, com os filamentos compostos de múltiplos feixes de fibras individuais. As malhas têxteis foram expostas a uma circulação de ar no sentido longitudinal numa faixa de temperatura de 20 a 70°C e o papel de 20 a 90°C, com velocidades do ar entre 0,06 e 1,5 m/s. O resultados para os tecidos puderam ser expressos na forma de curvas de secagem, com um ponto crítico de 0,41 kg/kg para as malhas têxteis.

Em um trabalho posterior, Albrecht (1989) mostrou que as curvas características de secagem podiam ser traçadas para a secagem em circulação longitudinal de tecidos similares ao algodão sobre uma faixa de velocidades incidentes de 0,1 a 0,6 m/s. O conteúdo crítico de umidade foi definido pela interseção das curvas de taxa constante e de taxa decrescente linearizadas. Assim, temos que a variação do conteúdo de umidade (X), em $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{tec seco}}$, pelo tempo (t) em segundos, pode ser representado por:

$$-\frac{dX}{dt} = K X = \frac{E}{m_s/A_{\text{sup}}} \quad \text{para} \quad K = -\frac{d}{dt}(\ln X) \quad (1)$$

onde “K” é um coeficiente empírico de secagem (s^{-1}), “E” é a taxa de evaporação ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{m}^2\text{s}$), “ m_s ” é a massa do material seco (kg), e “ A_{sup} ” é a área da superfície exposta (m^2). Sendo que a taxa de evaporação (E) é igual a taxa de secagem (R) multiplicada pela massa de material seco. O valor de “R” é a taxa de secagem obtida de sua curva média aproximada. Do período onde a taxa de secagem é constante, “ R_{cte} ”, tem-se que o conteúdo crítico de umidade será:

$$X'_C = \frac{R_{\text{cte}} A_{\text{sup}}}{K} \quad (2)$$

Modelos mais avançados de secagem de malhas fibrosas levam em conta a interação da água e das matrizes sólidas (Pander and Ahrens, 1987). Por exemplo, a fibra de papel seco consiste de aproximadamente 100 camadas, mas não é porosa. A água pode difundir-se para dentro da fibra e dissolver-se dentro da celulose, causando inchaço transversal da mesma, mas, não ao longo de seu comprimento. Apenas quando o conteúdo de umidade atinge o ponto de saturação da fibra é que faz a umidade interfibras desaparecer, e o papel começa a encolher.

Poros dentro da massa fibrosa podem não se estender até à superfície exposta, mas podem ter extremidades mortas ou simplesmente obstruídas. Métodos de estimativa do movimento capilar em tais estruturas porosas podem também ser utilizados. Além de qualquer transporte capilar de umidade líquida e difusão de vapor, há sorção difusiva de umidade dentro das fibras quando elas não estão totalmente saturadas. Em umidade relativa abaixo de 80% o coeficiente de transporte de sorção diminui exponencialmente com valores decrescentes de umidade relativa. O detalhado mecanismo da estrutura de poros na modelagem de secagem convectiva de papel é descrito por Harrman and Schultz (1990). A abordagem alternativa deve considerar a malha capilar-porosa como um meio contínuo, tendo propriedades termodinâmicas equivalentes ao sistema poroso. Esta abordagem foi descrita em detalhes por Lampinen and Ojala (1993).

A secagem de tecidos pesados, incluindo tapetes produzidos em teares, pode ser auxiliada pelo uso de jatos de ar. O projeto de sistemas de insuflamento de ar para melhorar a eficiência da secagem de produtos têxteis é amplamente utilizado em montagens comerciais. Korger and Krizek (1963) apresentam resultados detalhados sobre a variação dos coeficientes locais de transferência de massa sobre superfícies insufladas com jatos provenientes de injetores de saída retangular em diferentes pontos e folgas. Os máximos valores para o coeficiente de transferência foram encontrados imediatamente abaixo de cada injetor e a uma posição intermediária entre injetores adjacentes. Polat (1993) fez uma revisão dos efeitos da célula de fluxo e da geometria do injetor, assim como, do espaçamento entre o injetor e a superfície, e entre injetores, sobre as taxas de transferência na superfície. Num sistema de jato confinado, com uma exaustão simétrica do fluxo real entre os injetores, os efeitos de fluxo cruzados sobre o processo evaporativo tornam-se significativo. Aberturas de exaustão são também colocadas em intervalos mais largos em sistemas industriais.

O uso de insuflamento de ar em altas velocidades para melhorar a secagem longitudinal de malhas semipermeáveis é considerado por Randall (1984), enquanto Loo and Mujumdar (1984) desenvolvem um modelo para o caso quando uma corrente superaquecida é o meio de secagem.

Há dificuldades consideráveis em se fazer as medidas experimentais sob situações de alta velocidade nas quais, por exemplo, uma folha de papel pode estar movendo-se a uma velocidade de 25 m/s e sendo insuflada com uma emissão de ar de 100 m/s; e esses experimentos em laboratório com superfícies estáticas podem resultar em informações enganosas sobre possíveis taxas de transferência. Na secagem de folhas contínuas permeáveis de papel ou tecido, as taxas de insuflamento do meio secante podem ser aumentadas pelo direcionamento de uma fração do fluido quente de secagem através do material. Martin (1977) fornece correlações de projeto para injetores de múltiplas fendas e circulares, além de recomendações para o arranjo espacial dos injetores, com base na maximização da transferência de calor por unidade de energia consumida pelo soprador.

Como o mecanismo de secagem de materiais fibrosos depende de inúmeros fenômenos e fatores grandemente variáveis de uma situação para outra, que vão desde a forma da seção transversal das fibras, até a disposição do sistema de insuflamento do meio secante, conclui-se que num projeto de um sistema de secagem desse tipo de material, somente uma avaliação minuciosa dos parâmetros predominantes em cada caso, conduzirá a resultados satisfatórios de eficiência de secagem.

4. Padrões de referência de desempenho

Na avaliação do desempenho de equipamentos, os padrões servem como objetivos contra os quais a comparação pode ser feita. Tal investigação prática é útil para a avaliação de oportunidades de melhorias. Desta forma, os padrões de referência têm que apresentar níveis de desempenho que sejam possíveis de serem alcançados no processo produtivo. Eles não devem ser tão rigorosos para não serem irreais em práticas industriais, nem ser tão generosos para aprovarem práticas dispendiosas. Além disso, é desejável que os padrões de referência se ajustem de acordo com as condições reais em equipamentos individuais, visto que as condições de operação variam entre eles. Então, na evolução dos padrões, os dados reais devem ser coletados e analisados para estabelecer o melhor nível de desempenho possível de se alcançar na prática.

Quando o desempenho real fica abaixo dos padrões de referência, pode significar que, ou há práticas dispendiosas, as quais, se evitadas, capacitarão a melhoria do desempenho, ou que as condições de operação são muito diferentes das condições usadas após o estabelecimento dos padrões de referência. Se este último for o caso, os padrões de referência devem ser ajustados para condições reais.

Porém, ao se decidir sobre as medidas para melhorar o desempenho, não se deve apenas ser considerada a eliminação de práticas dispendiosas, mas também a possibilidade de mudança das condições reais para condições ótimas, de modo a se evitar alguns inconvenientes no processo, tais como: a supersecagem do material, todo ou em parte, e a subsecagem do mesmo, que pode facilitar a formação de agentes biológicos indesejáveis.

Uma vez conhecido o nível de benefício alcançável, especialmente em termos da influência de cada parâmetro, podem-se calcular as economias que serão conseguidas, o qual ajudará na decisão sobre o plano de ação.

Para uma avaliação técnico-econômica realística de uma unidade secadora, devem ser definidos certos fatores técnicos de desempenho. Os seguintes fatores de desempenho são comumente utilizados (Pakowski, 1992): eficiência energética, capacidade evaporativa, consumo específico de calor, consumo específico de potência, volume específico do secador e consumo específico do agente secante.

5. Modelagem teórica e experimental do processo de secagem vertical de tecidos

5.1. Modelagem teórica

As funções representativas das curvas cinéticas de secagem são geralmente obtidas a partir da definição de taxa de evaporação (E) durante o processo, apresentada na Eq. 1, para o conteúdo médio de umidade (\bar{X}).

Ribeiro (2002) propõe, e comprova experimentalmente, que a modelagem teórica para materiais fibrosos de pequena espessura pode também ser dividida em duas partes. Para o período de taxa de evaporação constante (E_{cte}) o processo representado na Fig. 1, pode ser verificado pela Eq. 3,

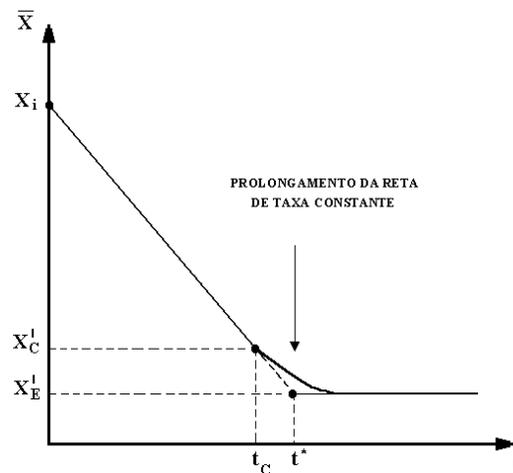


Figura 1. Curva representativa do período de taxa de evaporação constante.

onde " X_i " é o teor de umidade do material no início do processo; " t_c " é o tempo decorrido desde o início do processo até o instante em que se atinja o teor crítico de umidade do material (X_C'); e " t^* " é o tempo que decorreria para se atingir o teor de umidade de equilíbrio (X_E') se todo o processo fosse com taxa de evaporação constante.

$$\bar{X} - X_E' = (X_i' - X_E') \left(1 - \frac{t}{t^*} \right) \quad \text{para} \quad \bar{X} \geq X_C' \quad (3)$$

Como o término do período de taxa constante ocorre no ponto crítico de umidade, " t_c " será obtido pela Eq. 4:

$$X'_C - X'_E = (X'_i - X'_E) \left(1 - \frac{t_C}{t^*}\right) \quad (4)$$

Para o período de taxa de evaporação decrescente o equacionamento matemático, Eq. 5, apresentará um fator de amortecimento assintótico ao valor do teor de umidade de equilíbrio, na curva do processo de secagem representado na Fig. 2.

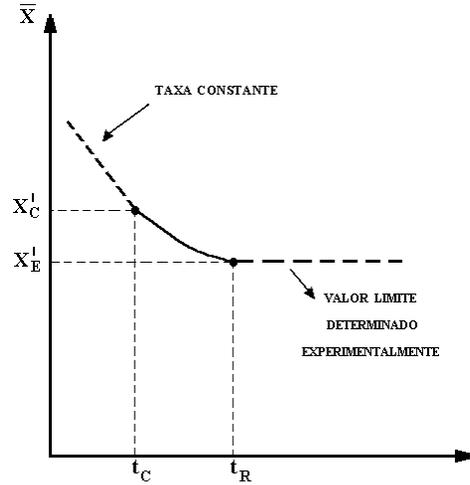


Figura 2. Curva representativa do período de taxa de evaporação decrescente.

$$\bar{X} - X'_E = (X'_C - X'_E) \exp[-\beta (t - t_C)] \quad \text{para} \quad X'_E < \bar{X} \leq X'_C \quad (5)$$

sendo

$$\beta = \frac{X'_i - X'_E}{X'_C - X'_E} \frac{1}{t^*} \quad (6)$$

Através da Eq. 7 é obtido o tempo total de secagem, também denominado tempo de residência (t_R).

$$\bar{X} - X'_E = (X'_C - X'_E) \exp[-\beta (t_R - t_C)] \quad (7)$$

A partir dos resultados experimentais são definidos os pontos críticos das curvas de secagem, e obtidos empiricamente os valores dos parâmetros β , E_{cte} e a relação entre os teores de umidade críticos e iniciais.

5. 2. Modelagem experimental

Foi escolhido um equipamento convencional de linha seriada de produção, com expressiva aquisição no mercado, produzido por empresa nacional, Sule Eletrodomésticos S/A (Enxuta), permitindo a realização dos testes em escala original. Este tipo de secadora, contém 7 suportes para que as roupas sejam penduradas, numa câmara envoltória de filme plástico de 0,105 m³, tendo orifícios laterais para a saída do ar úmido.

O ventilador responsável pelo insuflamento do ar de secagem foi ensaiado em banco de teste segundo ANSI/AMCA 210-99, tendo apresentado para o ponto nominal de funcionamento, valores de 3,0 mmH₂O para a diferença de pressão estática e 0,03681 Nm³/s (normal metro cúbico por segundo) de vazão em 2390 rpm, utilizando uma potência de 97 W. O sistema de aquecimento do ar de secagem é constituído de resistência elétrica dissipando uma potência média de 1200 W, com tensão de alimentação regulada em 120 V.

Foi investigado o comportamento dos parâmetros de secagem em diversos tecidos selecionados, de conformidade com a maior frequência do uso destes na confecção de vestuário. As amostras foram confeccionadas nas dimensões 0,420 x 0,340 m, para ajuste adequado ao espaço interno da câmara de secagem, resultando numa área total de exposição ao fluxo do agente secante (A_{sup}) de 2 m², para os seguintes tecidos: Jeans índigo, Flanela, Cotton-Lycra, Brim, Tergal, Viscose e Linho.

Com o objetivo de verificar o comportamento da temperatura das superfícies e teor de umidade das amostras, e o tempo necessário para a desumidificação dessas, foi montada uma bancada de testes cujos instrumentos de medida, aferidos, foram: termopares, termômetros de haste e bulbo, placa de orifício, instrumentos para determinação de grandezas elétricas, balança eletrônica, barômetro, cronômetro, escalas, e sistema seletor manual para leitura das temperaturas (ANSI/ASHRAE 41.1-1986 e ANSI/ASHRAE 41.2-1987).

Na Fig. 3, representa-se esquematicamente a secadora do tipo suspenso, colocada numa balança, através de cintas de couro, de tal forma que durante os testes de secagem fosse registrada a variação do peso do conjunto em função do tempo, devido à massa de líquido evaporada.

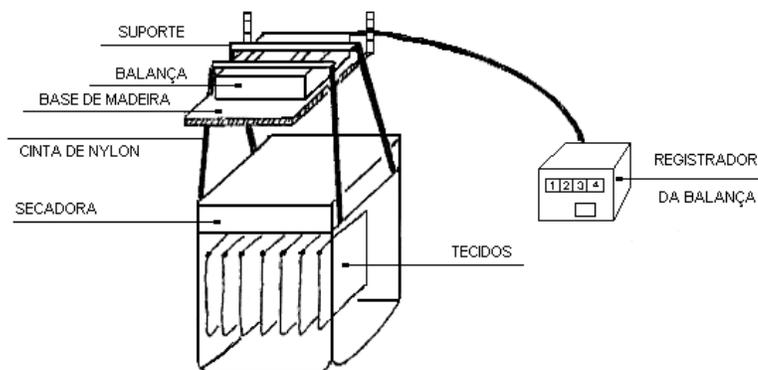


Figura 3. Esquema da bancada de testes.

Ao mesmo tempo, a temperatura da superfície dos tecidos colocados na secadora foi determinada em diversos pontos, através de termopares fixados por velcros na superfície do próprio tecido, distantes 2 cm abaixo dos pontos de medição.

Na seleção das técnicas de determinação do conteúdo de umidade deve-se levar em conta a precisão desejada, o procedimento investigativo e a complexidade dos equipamentos e instrumentos exigidos. Os métodos de medição do conteúdo de umidade durante a secagem podem ser classificados em diretos ou indiretos.

Os métodos diretos consistem essencialmente na determinação do conteúdo de umidade de uma amostra pela secagem realizada num forno de secagem com ou sem fluxo longitudinal de ar, ou por secagem numa câmara de vácuo. Nos métodos diretos, usados para alimentos e madeira, o material da amostra deve ser preparado de modo que se conheça a sua massa, medida à temperatura ambiente, a qual é colocada dentro de uma câmara de secagem com temperatura entre 102 e 105°C. O processo de secagem pode ser considerado completo quando a diferença entre os valores obtidos para o conteúdo de umidade do material por duas medições consecutivas não exceder $\pm 0,05\%$. O tempo de secagem dependerá da não alteração estrutural do material. Os fabricantes indicam que este processo é mais rápido quando a secagem é realizada entre 130 e 150°C. Desta forma, este método parece ser aceitável apenas para uma determinação aproximada do conteúdo de umidade do material.

Um método direto de medição contínua é mais adequado para o caso de secagem vertical suspensa de tecidos, uma vez que não há interrupções da secagem para pesagem das amostras. Além disso, esse processo de secagem não exige a retirada total de umidade, pois as fibras naturais possuem uma quantidade de umidade como parte integrante de sua estrutura, e a remoção dessa umidade danificará a mesma. Para as fibras artificiais a supersecagem poderá iniciar um processo de deformação plástica.

Neste método a preparação da amostra deve determinar a massa do tecido, nas condições de umidade relativa e temperatura do ambiente, antes e após a amostra ser molhada. A amostra molhada deverá ser imediatamente colocada no secador instrumentado de forma a fornecer dados instantâneos sobre a quantidade de massa de líquido restante na amostra. O tempo de secagem se extinguirá quando for atingido o peso correspondente à massa da amostra medida antes de ser molhada.

Para se determinar a taxa de secagem, a massa da amostra colocada no fluxo do agente secante (à temperatura, umidade e velocidade constantes) deve ser medida como uma função do tempo. A fim de se obter resultados que possam ser aplicados em escala de protótipo, os seguintes aspectos devem ser levados em conta (Treybal, 1968):

- a) a amostra não deve ser muito pequena;
- b) as condições de secagem devem, se possível, ser idênticas às condições previstas para a situação real de uso;
- c) a amostra deve ser colocada na unidade de teste de um modo similar ao real;
- d) a temperatura e o conteúdo de umidade do agente secante e sua velocidade e direção devem ser idênticas sobre toda a amostra;
- e) as razões entre a superfície de secagem e a superfície não exposta ao agente secante devem ser idênticas.

É prático realizar várias experiências com amostras de material de várias espessuras e determinar em cada caso o conteúdo de matéria seca da amostra. Quando a temperatura, o conteúdo de umidade e a velocidade do agente secante são constantes, o processo ocorre sob condições de secagem constante. Este modo de secagem é assegurado pelo equipamento.

Neste trabalho, conjuntos de sete amostras para cada tecido, após terem sido lavados até a estabilização do conteúdo de goma e tintura, foram centrifugados em lavadora automática para se determinar uma massa residual de água, admitida para o cálculo do teor de umidade inicial do processo. Para os testes, estes conjuntos foram torcidos manualmente, até atingir-se o valor previamente determinado da massa inicial de água, e então imediatamente colocados na bancada de testes, fechando-se o envoltório de filme plástico. Nos instantes em que se iniciava o fluxo do

agente secante, ocorria uma diminuição da indicação do peso do conjunto (em torno de 5g), valor este compensado na tomada de medidas.

Foram realizadas dez baterias de testes para cada experimento, as quais se mostraram suficientes para que se tivesse uma confiabilidade nos resultados de cada conjunto de amostras. A variação entre os pesos iniciais das amostras úmidas de cada tipo de tecido, por bateria de testes, foi estabelecida em um valor máximo de 3%. Cada bateria de testes se encerrava no momento em que se atingisse o peso correspondente à massa da amostra medida antes de ser molhada.

A fim de, também, se estudar o comportamento dos parâmetros de secagem quando o fluxo do agente secante tem o sentido ascendente, foi construído um duto conforme mostrado na Fig. 4. A forma de construção do duto teve como base a hipótese de se manter a área da seção transversal da boca de insuflamento do equipamento original, cujo sentido do fluxo do agente secante é descendente, Fig. 5. As amostras dos tecidos foram adquiridas no mercado, e os fabricantes indicaram as fibras presentes na composição, com as correspondentes massas específicas aparentes (γ) (massa por unidade de área de tecido), Tab. 1.

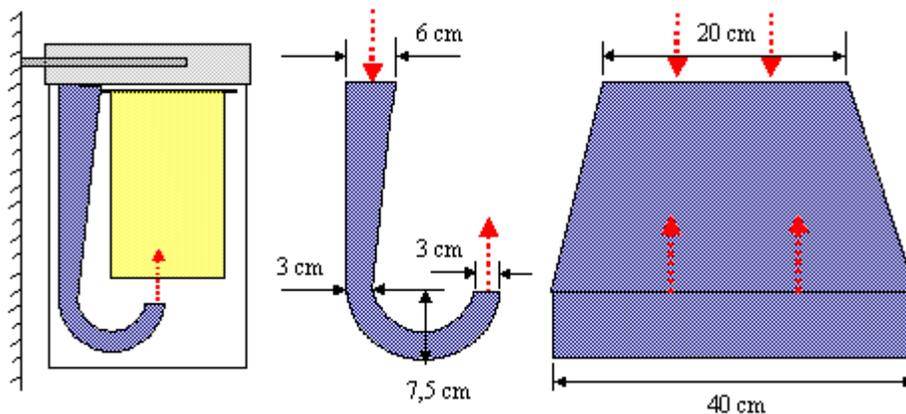


Figura 4. Esquema da montagem do equipamento para insuflamento ascendente

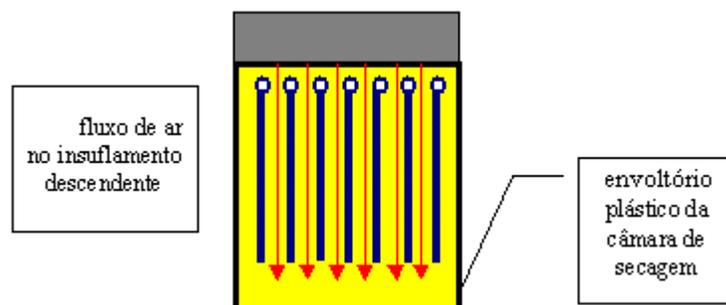


Figura 5. Esquema da montagem do equipamento para insuflamento descendente (original).

Tabela 1. Características das amostras.

Amostra	Composição	Massa específica aparente (kg/m ²)
Flanela	100% algodão	0,210
Viscose	100% viscose	0,140
Tergal	33% viscose + 67% poliéster	0,150
Brim	100% algodão	0,270
Cotton-Lycra	10% elastano + 90 % algodão	0,360
Linho	100% viscose	0,290
Jeans Índigo	100% algodão	0,445

6. Resultados

Foram selecionados os resultados experimentais encontrados individualmente para o tecido cotton-lycra, como ilustração, conforme Figs. 6, 7, 8, 9, 10. As Figs. 11, 12 e 13 mostram os resultados experimentais comparativos entre tecidos para as situações dos testes. Os tempos de secagem calculados pelo modelo proposto por Ribeiro (2002) prevê bem o comportamento experimental quando alimentados com parâmetros obtidos por regressão dos dados experimentais, como pode ser verificado na Tab. 2.

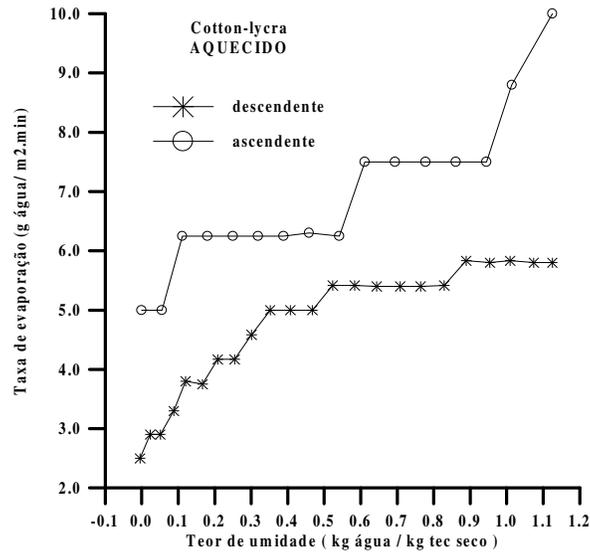


Figura. 6. Taxa de evaporação versus teor de umidade quanto ao sentido do insuflamento aquecido.

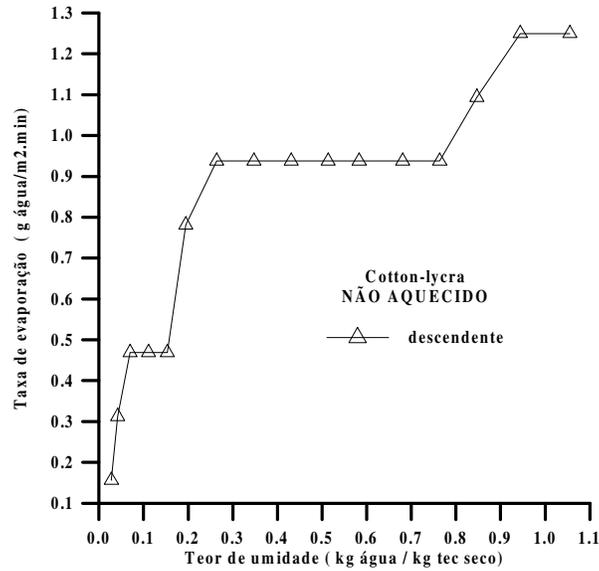


Figura. 7. Taxa de evaporação versus teor de umidade no insuflamento descendente não aquecido.

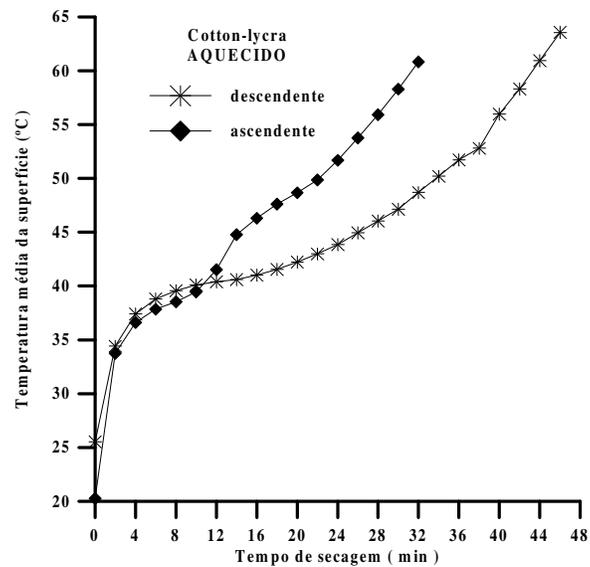


Figura. 8. Temperatura média da superfície versus o tempo de secagem quanto ao sentido do insuflamento aquecido.

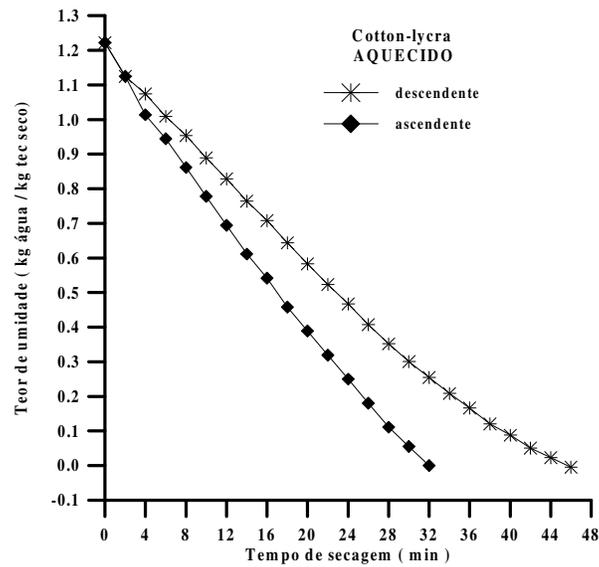


Figura. 9. Teor de umidade versus tempo de secagem quanto ao sentido do insuflamento aquecido.

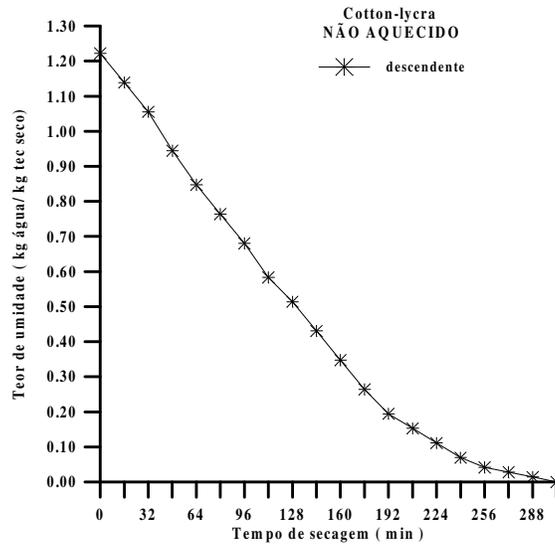


Figura. 10. Teor de umidade versus tempo de secagem no insuflamento descendente não aquecido.

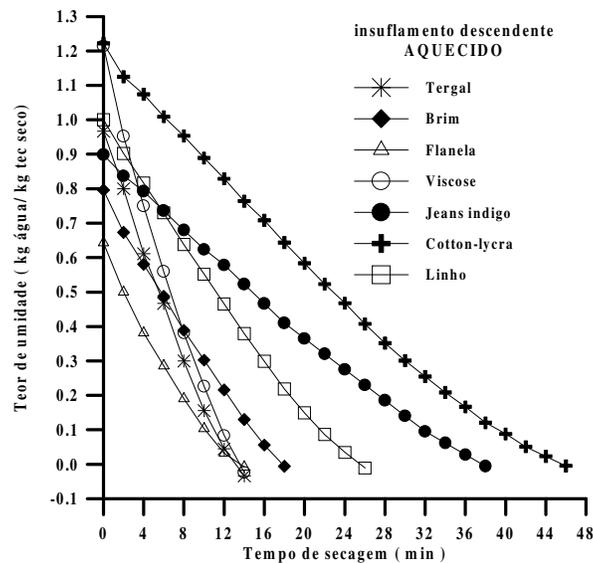


Figura. 11. Comparação entre tecidos: insuflamento descendente aquecido.

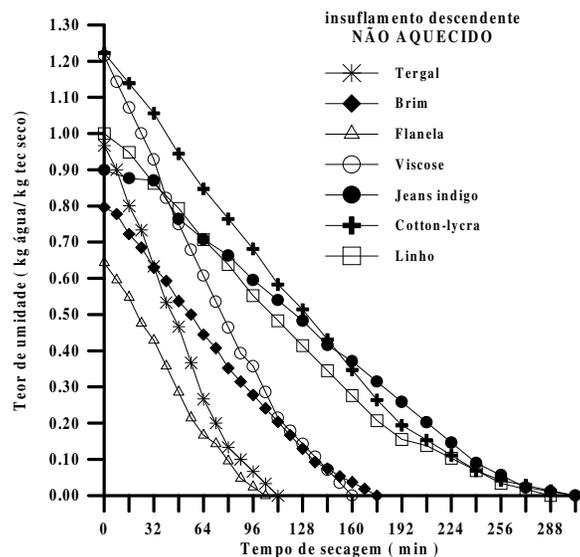


Figura. 12. Comparação entre tecidos: insuflamento descendente não aquecido.

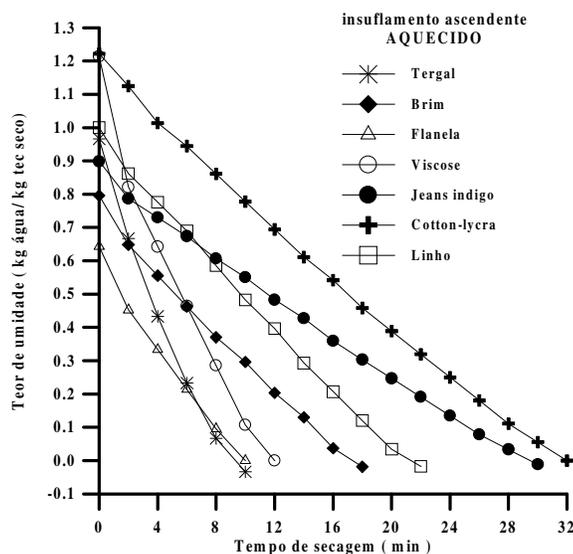


Figura. 13. Comparação entre tecidos: insuflamento ascendente aquecido.

Na Fig. 6 verifica-se que para o insuflamento ascendente o valor da taxa de evaporação (E) é superior aquele encontrado na situação descendente, ambos na mesma condição de aquecimento. A Fig. 7 representa o comportamento da taxa de evaporação (E) no insuflamento descendente não aquecido. Para a situação de insuflamento ascendente não aquecido a taxa de evaporação teve um comportamento semelhante, apresentando valores ligeiramente superiores. O comportamento da temperatura média da superfície, mostrado na Fig. 8, indica que no insuflamento ascendente aquecido essa temperatura atinge valores superiores, em menor tempo de exposição, se comparado com a condição descendente. As Figs. 9 e 10 mostram o tempo necessário para se atingir o conteúdo crítico de umidade nas diferentes situações de insuflamento.

Tabela 2. Tempos calculados e experimentais quanto ao estado e sentido do fluxo do agente secante (min)

	Descendente aquecido		Descendente não aquecido		Ascendente aquecido	
	Experimental	Calculado	Experimental	Calculado	Experimental	Calculado
Tergal	13	14,7	112	107,7	9	9,4
Brim	18	18,5	176	166,2	17	17,7
Flanela	18	17,0	104	100,4	10	10,4
Linho	25	26,5	288	286,8	21	21,9
Cotton-lycra	46	47,7	304	290,3	32	32,1
Jeans Indigo	37	39,9	304	300,8	30	30,4
Viscose	14	13,8	160	156,2	12	12,0

Tabela 3. Comparação do consumo de energia na secagem das amostras em tensão de 110 V.

	Insuflamento descendente						Insuflamento ascendente		
	Frio			Aquecido			Aquecido		
	Tempo de secagem	Potência elétrica	Consumo	Tempo de secagem	Potência elétrica	Consumo	Tempo de secagem	Potência elétrica	Consumo
	min	W	Wh	min	W	Wh	min	W	Wh
Tergal	112	47	88	13	1210	262	9	1243	186
Brim	176	50	147	18	1235	371	17	1221	346
Flanela	104	48	83	18	1225	367	10	1243	207
Linho	288	52	250	25	1232	513	21	1243	435
Cotton-lycra	304	76	385	46	1225	939	32	1243	663
Jeans índigo	304	47	238	37	1226	756	30	1232	616
Viscose	160	51	136	14	1228	287	12	1232	246

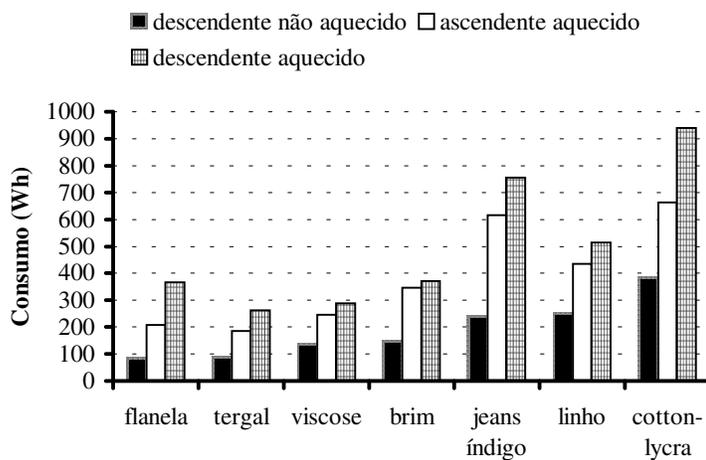


Figura. 14. Comparação do consumo de energia nas diferentes condições de secagem.

7. Conclusões

Foram verificadas importantes reduções no consumo de energia quando alteradas as condições do fluxo do agente secante. Quando o tempo requerido para a secagem não for preponderante, pode-se utilizar a situação de não aquecimento, pois o consumo é expressivamente menor como pode ser verificado na Tab. 3 e na Fig. 14.

A proposta de inverter o fluxo do agente secante, mantendo-se o aquecimento, também contribui para a redução do consumo de energia, e reduz o tempo de exposição dos tecidos ao meio secante. Confirmou-se também o modelo matemático proposto, cujos resultados comparativos foram apresentados na Tab. 2.

Portanto os fabricantes de secadores verticais de vestuário, a partir desses resultados, poderão adequar os equipamentos quanto ao sentido e as condições de aquecimento ou não do agente secante, prevendo uma expressiva economia de energia por parte dos usuários.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Sule Eletrodomésticos S/A pelas doações das unidades para os testes.

9. Referências

- Albrecht, V., 1989, 'Berechnung des Triocknungsverhaltens Textiler Flachengebilde bei Durchlüftungstrocknung', *Textiltechnik*, Vol. 39, No. 12, pp. 660-665.
- Bell, J. R.; Nissan, A. H., 1959, 'Mechanism of Drying Thick Porous Bodies During the Falling-Rate Period-Hygroscopic Material', *AIChE Journal*, Vol.5, No.1, pp. 344-347.
- Foust, A. S.; et al., 1982, 'Princípios das Operações Unitárias', 2.Ed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 644 p.
- Gummel, P.; Schlünder, E. U., 1980, 'Through Air Drying of Textiles and Paper. In: Mujumdar, A. S., (Ed.), 'Drying '80', Hemisphere, New York, Vol.1, pp. 357-366.
- Hamid, M., 1991, 'Microwave Drying of Clothes', *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 26, No. 2, pp. 107-113.
- Harrman, M.; Schultz, S., 1990, 'Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure', *Drying Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 667-703.

- Korger, M.; Krizek, 1963, "Mass-Transfer Coefficients in Impingement Flow from Slotted Nozzles", International Journal on Heat and Mass Transfer, No. 9, pp. 345-353.
- Lampinem, M. J.; Ojala, K. T., 1993, "Mathematical Modelling of Web Drying". In: Mujumdar, A. S.; Mashelkar, R. A., (Eds.), "Advances in Transport Processes", Vol. 9, pp. 271-348.
- Langrish, T. A. G.; Bahu, R. E.; Reay, D., 1991, "Drying Kinetics of Particles from Thin-Layer Drying Experiments", Transactions IChemE, A69, pp. 417-424.
- Liang, B.; Fields, R. J.; King, C. J., 1990, "The Mechanism of Transport of Water and N-propane Through Pulp and Paper", Drying Technology, Vol. 8, No. 4, pp. 641-665.
- Loo, E.; Mujumdar, A. S., 1984, "Simulation Model for Combined Impingement and Through Drying Using Superheated Steam as the Drying Medium". In: Mujumdar, A. S., (Ed.), "Drying '84", Washington, DC, pp. 264-280.
- Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces". In: Hartnett, J. P.; Irvine, T. F., (Eds.), "Advances in Heat Transfer", Academic Press, New York, Vol. 13, pp. 1-66.
- Nissan, A. H.; Kaye, W. G.; Bell, J. R., 1959, "Mechanism of Drying Thick Porous Bodies During the Falling-Rate Period-The Pseudo-Wet-Bulb Temperature", AIChE Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 103-110.
- Pakowski, Z., 1992, In: Mujumdar, A. S., (Ed.), "Advances in Drying", Hemisphere, New York, Vol. 5.
- Pander, J. R.; Ahrens, F. W., 1987, "A Mathematical Model of High-Intensity Paper Drying", Drying Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 213-243.
- Phillip, R. R.; De Vries, D. A., 1957, "Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients", Transactions Geophysics Union, Vol. 38, No. 2, pp. 222-232.
- Polat, S., 1993, "Heat and Mass Transfer in Impingement Drying", Drying Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 1147-1176.
- Prabhu, M. R.; Parajia, J. S., 1981, "Performance Relations and Norms for Textile Contact and Convection Dryers. In: Mujumdar, A. S., (Ed.), "Advances in Drying", Hemisphere, New York, Vol. 1, pp. 233-238.
- Randall, K. R., 1984, "Using High Velocity Impingement Air to Improve Through Drying Performance on Semi-permeable Webs", In: Mujumdar, A. S., (Ed.), "Drying '84", Washington, DC, pp. 254-263.
- Ribeiro, J. A., 2002, "Modelagem Teórica – Experimental de Sistemas Suspensos de Secagem Doméstica de Vestuários", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Unesp, Guaratinguetá.
- Treybal, R. E., 1968, "Mass-Transfer Operations", McGraw-Hill, New York.
- Walker, B. V., 1969, "The Drying Characteristics of Scoured Wool", NZ Journal Science, No. 12, pp. 775-810.

CONSEQUENCES OF THE ALTERATION OF THE DRYING AGENT'S FLOW ON THE ENERGY CONSUMPTION IN VERTICAL DRYER

Paulo Magalhães Filho
Unesp-Campus de Guaratinguetá – Departamento de Energia
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho
12.516-410 Guaratinguetá –SP
pfilho@feg.unesp.br

Jefferson Almeida Ribeiro
Unesp-Campus de Guaratinguetá – Departamento de Energia
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Pedregulho
12.516-410 Guaratinguetá –SP
jefferson.aribeiro@bol.com.br

Abstract

The competition among the manufacturers, together with the higher demands of the consuming market, made mandatory in the evaluation and acceptance of appliances, the need to manufacture equipment to operate with higher efficiency and lower energy consumption. Such facts motivate the study and analysis of suspended household drying systems, regarding their operation characteristics and efficiency on the cloth dehumidification process, because the parameters that influence the dryers' efficiency and drying mechanisms need to be known in the precision requirements for each application. The parameters evaluated in this paper are: cloth moisture contents at the dryer in the start and the end of the process, heat transfer conditions, temperature, speed, direction and the absolute humidity of the heat supplying mean, and the cloth surface temperature distribution. The theoretical predictions are compared with experimental results obtained from a test bench, according to presented configurations, the real conditions of work of the system were simulated. The most utilized types of cloth for clothing manufacturing were selected: blue-jeans, flannel, cotton-spandex, canvas, polyester, viscose rayon and linen. Important reductions were verified in the energy consumption when the conditions of the drying agent flow were changed.

Keywords: cloth drying, energy consumption, dryer.