



■ Capota de máquina *tissue* – teoria de secagem, principais variáveis e efeito do balanço de ar na eficiência térmica

Introdução

Com as atuais taxas de produção sempre aumentando nas máquinas de papel *tissue*, muitas fábricas têm a necessidade de aumentar a contribuição da capota Yankee na secagem. Considerando que a contribuição do cilindro *Yankee*, quando mecanicamente bem mantido é fixa, a única opção para maximizar a eficiência do sistema de secagem em uma máquina *tissue* é a otimização do sistema da capota.

Os sistemas de aquecimento de ar atuais a gás ou a óleo permitem atingir temperaturas até superiores a 500 °C, sendo muito energeticamente intensivas e contribuem com até 75% da secagem da folha de papel. O conhecimento dos princípios de secagem e o balanço de ar da capota são ferramentas que permitem ao papeleiro seu gerenciamento para assegurar o mínimo consumo térmico, ou ótima “eficiência térmica”, que é definida como as Kcals consumidas para evaporar um quilo de água, e quando a máquina é limitada pela secagem à sua máxima produção de papel.

Transferência de calor em secagem por ar

Em secagem por ar, aonde o ar quente é soprado ou impingido sobre a folha (ver figura 1), a transferência de calor é primariamente por convecção. Embora a transferência de calor por condução e radiação também ocorram, estes modelos não serão aqui considerados. Deve ser considerado, entretanto, que a transferência de calor por radiação em equipamentos de secagem por ar de elevadas temperatura pode ser bastante significativa. A transferência de calor por convecção simples é descrita pela equação:

$$Q = hA \Delta t$$

Onde: Q = transferência de calor, Btu/h
h = condutividade térmica, Btu/(h)(ft²)(°F)
A = área, ft²
 ΔT = diferencial de temperatura °F

O problema real que envolve a transferência de calor por convecção é a estimativa da condutividade *h*. Visto que a transferência de calor por convecção inerentemente envolve fluxo de um fluido, as características do fluxo e as propriedades desse fluido têm grande influência na transferência de calor.

Aplicando-se uma análise dimensional para todos os fatores que podem estar envolvidos, foi determinado que aqueles que estão verdadeiramente envolvidos podem ser agrupados juntos em três números adimensionais.

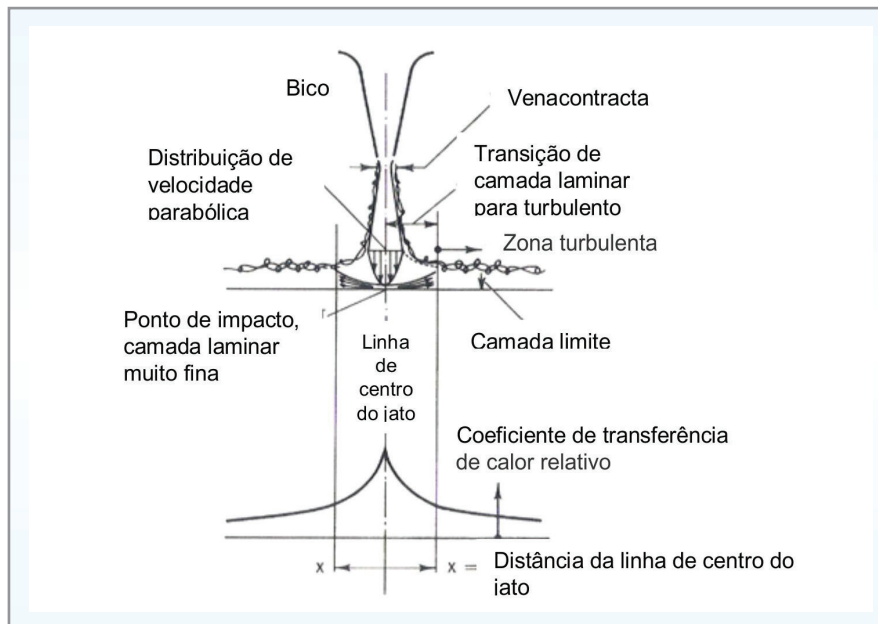


Figura 1: Características bidimensionais do fluxo do jato e modelo de transferência de calor para um bico de secagem de alta velocidade.

O número de Nusselt hD/k relaciona a característica térmica do fluido e uma característica de dimensão do sistema para a transferência de calor; o número de Reynolds $DV\rho/\mu$ relaciona uma característica de dimensão do sistema e uma característica física do fluido para o fluxo do fluido; e o número de Prandtl $c_p\mu/k$ relaciona a característica física do fluido com as características térmicas. Os fatores que constituem estes três números adimensionais são:

h = condutividade térmica, Btu/(hr)(ft²)(°F)

D = uma característica de dimensão do sistema, tal como um diâmetro, ft

K = condutividade térmica do fluido, Btu/(hr)(ft²)(°F/ft)

V = velocidade do fluido em D , fps

ρ = densidade do fluido, lb/ft³

μ = viscosidade do fluido, lb/(sec)(ft)

c_p = calor específico do fluido, Btu/(lb)(°F)

Observe que, devido às diferentes unidades de tempo utilizadas nos termos de condutividade e viscosidade $C_p\mu/k$, deve incluir um fator de segundos por hora para deixar as unidades consistentes e então verdadeiramente adimensionais.

Para a avaliação da transferência de calor por convecção, os números adimensionais são agrupados juntos em uma equação arbitrária com apropriadas "constantes" adimensionais, as quais devem ser determinadas experimentalmente. Se a equação arbitrária descrever corretamente o sistema, então as "constantes" serão verdadeiramente constantes para a faixa de condições para as quais a equação é aplicável. Por outro lado, a equação pode ser um modelo bom, satisfatório ou insatisfatório do sistema, dependendo de quão bem os dados se ajustam na equação.

Como um exemplo, vamos considerar um secador de ar impingido aplicado para um secador *Yankee*. A equação mais comumente usada nesta aplicação é:

$$\frac{hD_c}{k} = \alpha \left(\frac{D_c V_c \rho}{\mu} \right)^m \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^n$$

Onde:

D_e = diâmetro ou largura real do bico de insuflamento de ar, ft

V_e = velocidade no bico

α , m , n = "constantes" adimensionais que devem ser determinadas experimentalmente

Todos os outros fatores acima são tomados como as propriedades médias do ar impingido.

Devido às condições de fluxo da secagem de ar impingido, haverá considerável variação no coeficiente de transferência de calor local entre as áreas abaixo dos bicos e aquelas entre os bicos. Como não estamos primariamente interessados em efeitos localizados mas sim na transferência de calor em toda a parte, a condutividade h deve ser mediada (para resultar no h médio) sobre toda a superfície considerada, isso é, a superfície coberta pela capota. Também se os bicos são dispostos muito distantes, somente uma porção da superfície é coberta pela zona de transferência de calor; inversamente, se os bicos são colocados muito juntos, jatos vizinhos irão interferir entre si, causando uma redução na transferência de calor. Então α varia com relação ao espaçamento dos bicos.

As características do jato de ar impingido sobre a superfície da folha é determinado, em algum grau, pela distância que o ar deve se deslocar antes de incidir na folha. A transferência momentânea do jato de elevada energia para o ar de muito mais baixa energia adjacente ao jato resulta em uma redução da energia cinética do jato. Então α varia também com a distância dos bicos em relação à folha.

Algumas análises, no intento de obter uma relação mais geral, removeram α do efeito de geometria descritos anteriormente por experimentalmente relacionando às razões de transferência de calor de:

$$\frac{x}{D_e} \text{ e } \frac{y}{D_e}$$

Onde:

x = espaçamento entre bicos, ft

y = distância do bico para a folha, ft

D_e = diâmetro ou largura real do bico, ft

Enquanto o expoente n no número de Prandtl é normalmente tomado como 1/3 do expoente m do número de Reynolds e varia de 0,5 a 0,8.

De alguns valores experimentais derivados de testes de laboratório uma equação que se ajusta muito bem é

$$\frac{\bar{h}D_e}{k} = 0.021 \left(\frac{D_e V_e \rho}{\mu} \right)^{4/5} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{1/3}$$

Em resumo, para fins práticos, as variáveis principais do processo de secagem por ar impingido são:

- Temperatura do ar
- Velocidade do ar
- Umidade do ar
- Geometria do bico, desenho do bico, diâmetro, ângulo de incidência, distância do bico ao papel

Fatores que impactam no consumo de combustível na operação da capota *Yankee*

- Umidade absoluta do ar de exaustão

- Utilização de recuperação de calor para preaquecer o ar de reposição e de queima
- Distância entre a capota e o *Yankee*
- Ar de infiltração/ vazamento (excesso) entre o *Yankee* e a capota
- Vazamentos no sistema de ar e na capota
- Ajuste no sistema de queima ar/ combustível
- Otimização da temperatura do ar impingido na capota versus a velocidade de incidência

Características das capotas modernas

As principais características operacionais de uma capota moderna são descritas abaixo:

- Contribuição de secagem da capota e do *Yankee* são ao redor de 75 e 25 %, respectivamente
- Velocidades de secagem, R_w TAPPI, de 146 -156 kg de água/ h.m²
- Velocidade do ar impingido de 90 a 180 m/s
- Elevada temperatura do ar, 300 a 540 oC
- Transferência uniforme de energia na direção longitudinal e transversal

Balanco de ar da capota

A tabela abaixo resume os principais valores de um balanço de massa de uma capota *Yankee* típica. Existem vários fluxos de ar dentro do circuito, entretanto, no final das contas, os fluxos que afetam o balanço no geral são os de entrada e saída de ar. Estes fluxos de ar ou massa são:

- Exaustão para a atmosfera da capota lado úmido, M_{lu}
- Exaustão para a atmosfera da capota lado seco, M_{ls}
- Total de ar de reposição para o ventilador de ar fresco, M_t
- Ar de combustão para o lado úmido, M_{cu}
- Ar de combustão para o lado seco, M_{cs}

Os itens A e B somam para a o fluxo de ar de exaustão. A diferença entre o fluxo de massa entre o total de ar exaurido e os três fluxos de ar de reposição (itens C,D e E) é fisicamente evidente como ar de infiltração ou excesso da capota.

$$\Delta \text{ capota} = (M_{lu} + M_{ls}) - (M_t + M_{cu} + M_{cs})$$

Esta equação simplifica o balanço de ar do sistema. Considerando que a quantidade de ar de combustão é controlada automaticamente, é possível efetuar-se o balanço da capota pelo ajuste dos fluxos de ar de reposição e exaustão. É importante haver equilíbrio entre a quantidade de ar exaurido e de reposição para não ocorrer infiltração ou excesso (vazamento) de ar na capota, sendo que em ambos os casos ocorre significativa queda na eficiência de secagem.

| Fluxo de Ar | Temp (°C) | Umidade (kg água/ kg ar seco) | Fluxo de Ar (m ³ /h) | Fluxo de Ar (N/m ³ /h) |
|-------------------------------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Alimentação da capota | 371 | 0.37 | 102.300 | 45.749 |
| Exaustão da capota | 284 | 0.46 | 99.180 | 51.282 |
| Recirculação para o queimador | 284 | 0.46 | 74.280 | 38.407 |
| Exaustão antes do trocador | 284 | 0.46 | 49.800 | 25.749 |
| Ar para o queimador | 27 | 0.02 | 2.760 | 2.650 |
| Ar fresco | | | | |
| Antes aquecedor | 27 | 0.02 | 15.840 | 15.206 |
| Após aquecedor | 125 | 0.02 | 20.760 | 15.022 |
| Exaustão para atmosfera | 74 | 0.46 | 27.480 | 22.088 |

Tabela 1: Balanço de ar – valores representativos de um levantamento típico.

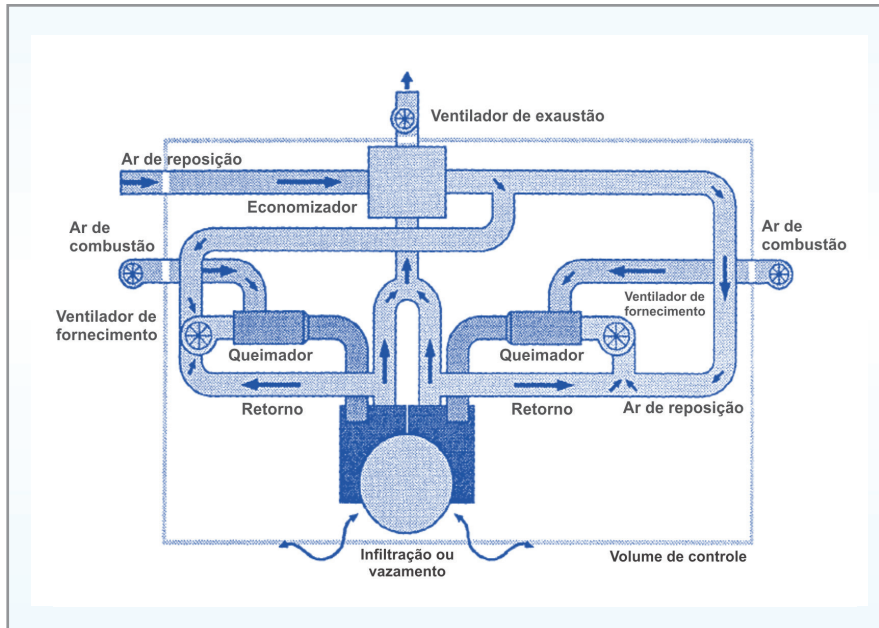


Figura 2: Fluxos de ar em uma capota Yankee. O volume de ar de reposição mais o ar de combustão é igual ao volume de ar exaurido mais o ar infiltrado, ou menos o ar vazado da capota.

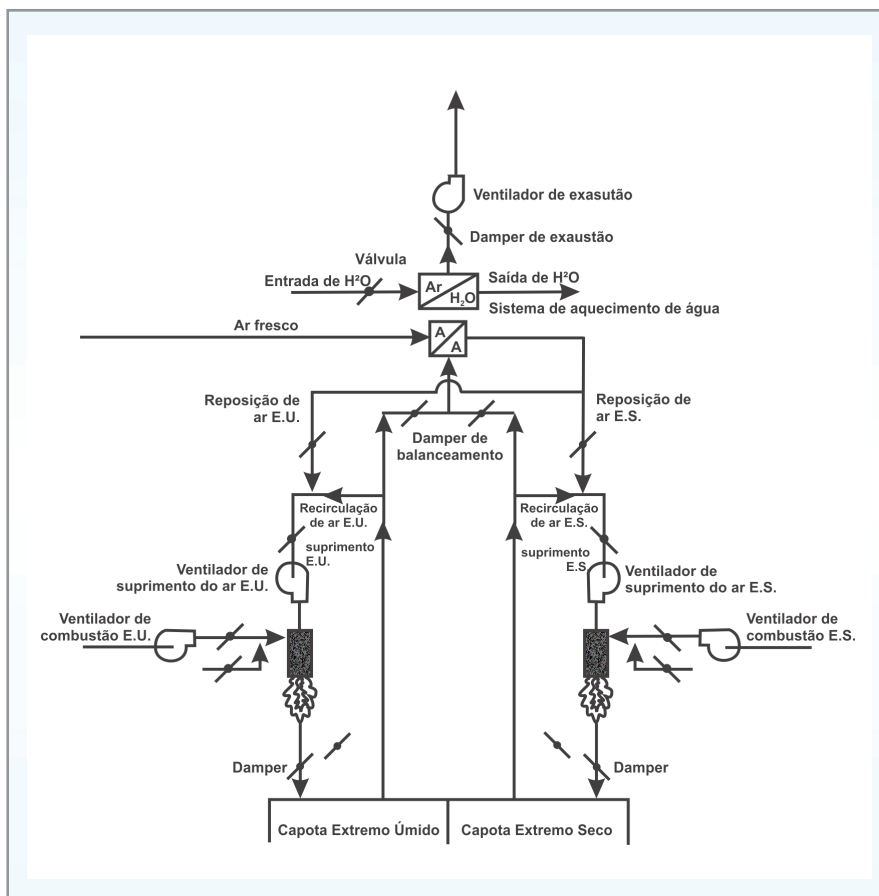


Figura 3: Esquema de uma capota padrão de elevada temperatura.

Eficiência térmica

A carga total do queimador é a energia térmica necessária para aquecer a folha, evaporar a água, repor todo o calor perdido por radiação e aquecer o ar de reposição. A energia térmica requerida para aquecer a folha e evaporar a água é uma função das condições da matéria-prima sendo utilizada e está ligada aos requisitos de produção. Qualquer perda de calor por radiação é também uma constante, dependendo das condições de operação. Consequentemente, a única variável controlável, que permite ao papeleiro otimizar a eficiência térmica, é a quantidade de ar de reposição.

A redução do fluxo de ar exaurido irá resultar em um incremento de recirculação e redução do fluxo do ar de reposição. A umidade absoluta do sistema irá aumentar proporcionalmente, resultando em menor carga no queimador (figura 4 a seguir). O nível de umidade absoluta ótima é ao redor de 0,40 a 0,50 kg água/ kg ar seco, após o qual tende a haver um relativo decréscimo no potencial de secagem do ar úmido suprido. É importante haver equilíbrio entre a quantidade de ar exaurido e de reposição para não ocorrer infiltração e nem excesso (vazamento) de ar na capota.

Normalmente, balanços de capota podem economizar, na média, ao redor de 15% do consumo de combustível. Em complemento, pela passagem de todo o ar de reposição e combustão através de um trocador de calor ar/ ar (utilizando ar de exaustão em contra fluxo), outros 20% podem ser economizados da carga total de energia.

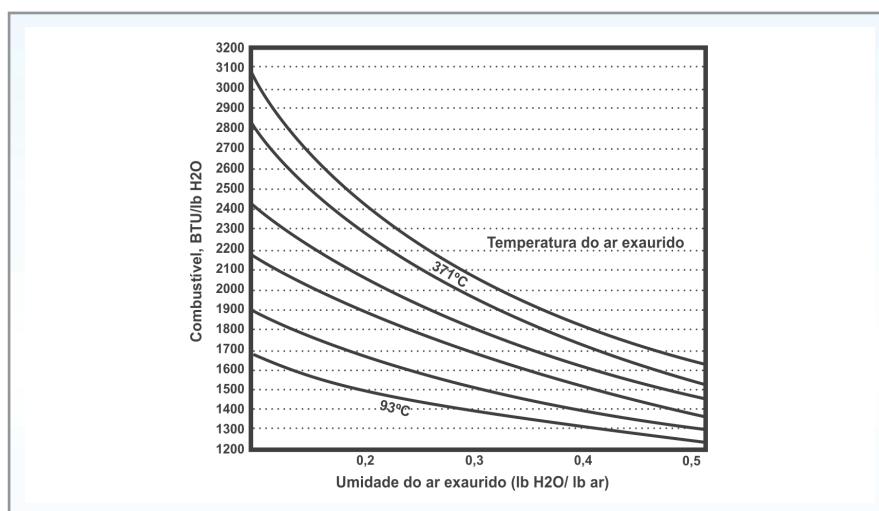


Figura 4: Efeito da recirculação no consumo de energia.

Procedimentos para o balanço de capota

Medição dos fluxos de ar: as velocidades de ar nos dutos são medidas utilizando-se um tubo de Pitot com comprimento suficiente para avaliar toda a largura do duto. Idealmente, a medição deve ser realizada após um trecho em linha reta que possua comprimento de oito diâmetros do duto. Se possível, deve-se medir a velocidade de todos os dutos.

Temperaturas: um termopar eletrônico que opere na faixa de temperatura de trabalho da capota pode ser utilizado para medir a temperatura de bulbo seco do ar. Deve-se medir a temperatura em todos os pontos onde se mediram as velocidades.

Medição da umidade do ar: em capotas de *Yankee* onde a temperatura do ar é superior a 180 °C, a medição convencional de bulbo úmido é imprecisa, devido ao pequeno tempo de permanência da depressão do bulbo úmido a esta alta temperatura. A utilização de um dispositivo, como mostra o esquema abaixo, para resfriar o ar para ao redor de 100 a 200 °C permite a medição da

temperatura de bulbo seco e úmido para a determinação da umidade absoluta com termômetros digitais normais.

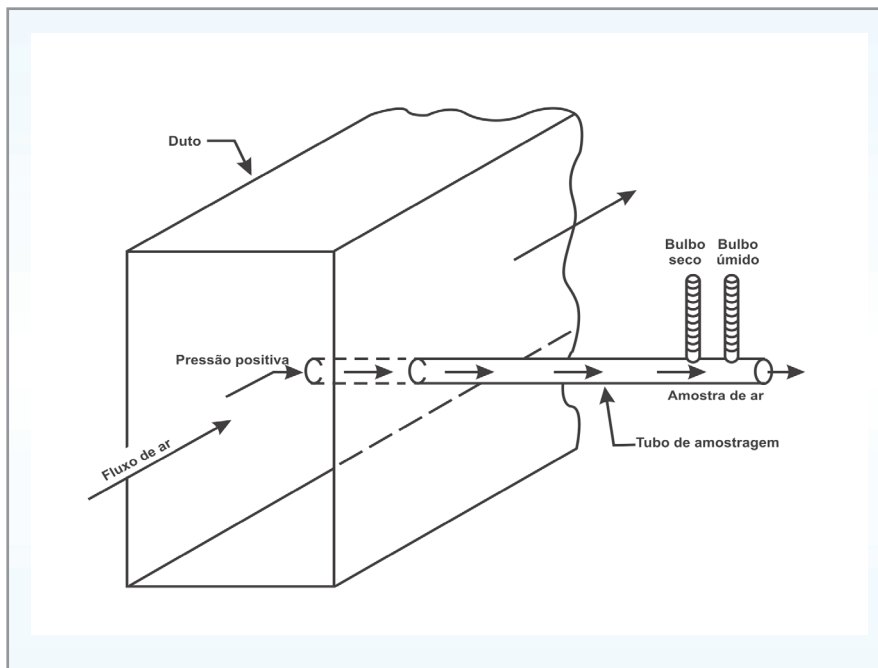


Figura 5: Diagrama de um sistema de tomada de amostra do ar.

Uma estação permanente de amostragem do ar pode ser instalada para monitorar periodicamente a umidade absoluta do ar, ver figura abaixo.

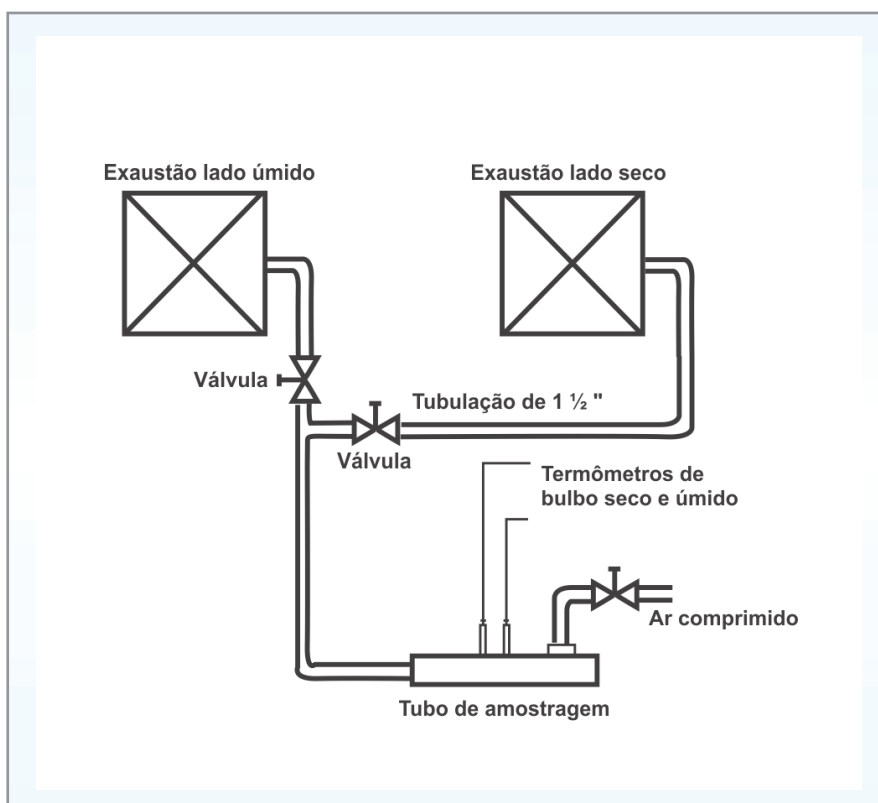


Figura 6A: Conexão de uma estação de amostragem Yankee.

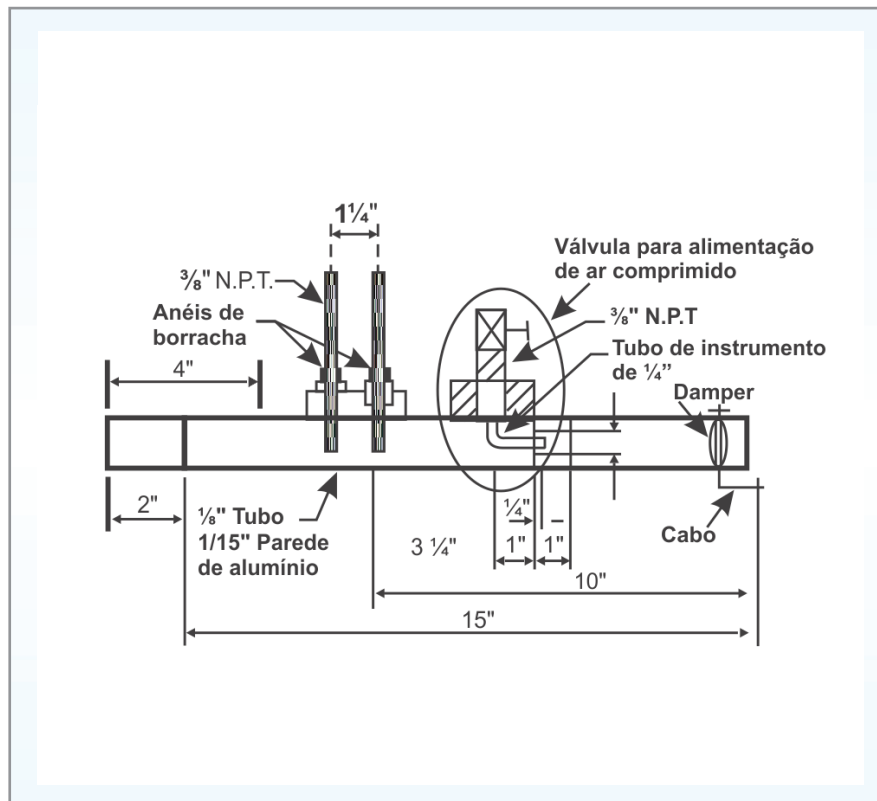


Figura 6B: Diagrama da central de amostragem.

Cálculo da umidade absoluta do ar exaurido: a umidade absoluta do ar ou conteúdo de água é um termo comum em secagem. Ele indica a quantidade de vapor de água em relação à quantidade de ar seco (kg H₂O/ kg a. s.). Para obter-se o valor exato da umidade do ar, as temperaturas de bulbo seco e úmido devem ser medidas e a umidade pode ser calculada com as fórmulas abaixo, ou pelas tabelas das páginas a seguir.

$$p_v^1 = \exp\left(11.78 \frac{\vartheta_w - 99.64}{\vartheta_w + 230}\right)$$

$$x_v^1 = 0.62197 \frac{p_v^1}{p - p_v^1}$$

$$x = \frac{1.0048(\vartheta_w - \vartheta_d) + x_v^1(2501 - 2.3237\vartheta_w)}{2501 + 1.86\vartheta_d - 4.19\vartheta_w}$$

Onde: p é a pressão (bar) (ao nível do mar é 1,013 bar)
 x umidade do ar (kg H₂O/Kg a.s.)
 ϑ_w temperatura de bulbo úmido medida (°C)
 ϑ_d temperatura de seco medida (°C)

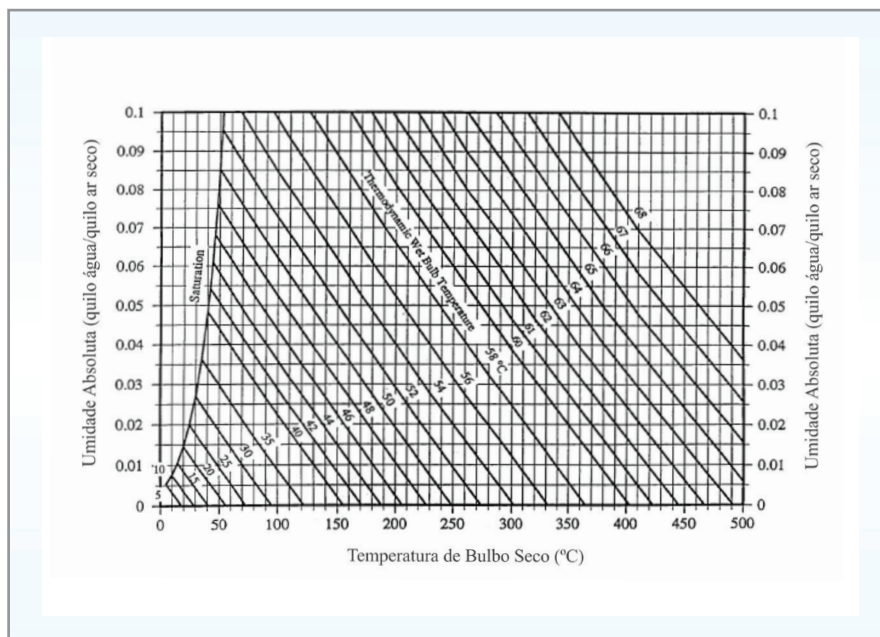


Figura 7: Tabela termodinâmica de mistura ar/vapor. Curvas de baixa umidade.

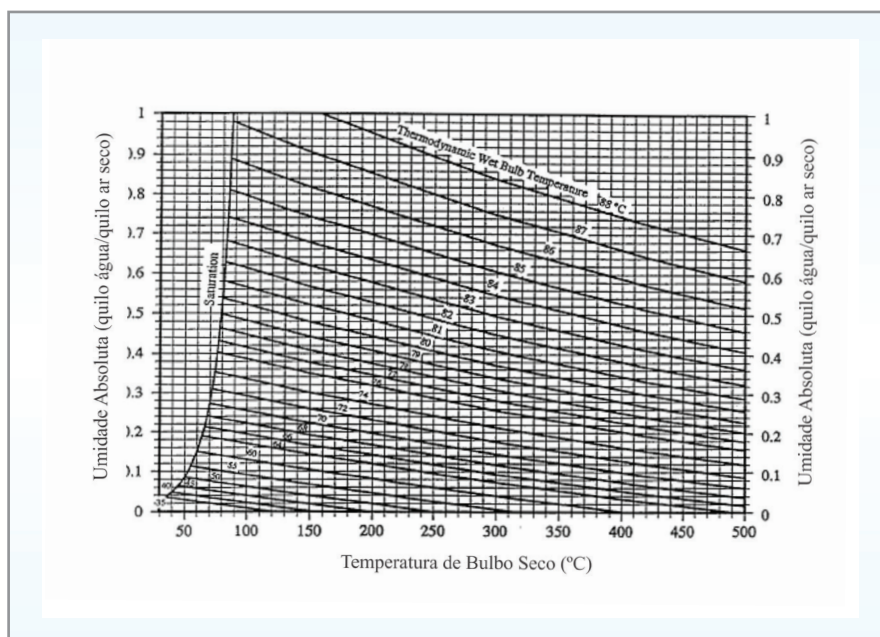


Figura 8: Tabela termodinâmica de mistura ar/vapor. Curvas de elevada umidade.

Análise dos resultados obtidos

Umidade do ar de extração

Umidades abaixo de 0,400 kg água/ kg de ar seco resultam em incremento de consumo de energia devido à necessidade de aquecimento de ar de reposição desnecessário. Umidades absolutas acima de 0,50 kg água/ kg de ar seco prejudicam a evaporação da folha.

Fluxos de ar

Os fluxos de ar de reposição e de extração devem ser similares para não haver infiltração ou ex-

cesso (vazamento) de ar na capota, pois em ambos os casos haverá perda de eficiência térmica na capota.

É importante fazer o balanço de massa comparativo entre a massa de água extraída do sistema, juntamente com o ar exaurido e a massa de água que teoricamente deve evaporar considerando a produção da máquina e os teores secos da folha após as prensas e na enroladeira, para a avaliação da consistência dos dados obtidos.

É importante que o fluxo de ar de suprimento da capota esteja próximo do valor de projeto do fabricante para proporcionar as velocidades de ar nos bicos injetores para os quais foram projetados.

Conclusão

A capota *Yankee* é um componente chave na produção de papéis *tissue* e especiais. A manutenção de balanço de ar adequado e umidade absoluta do ar de exaustão em 0,40/ 0,50 kg água/kg ar seco assegura ótima "eficiência térmica". Balanços de ar podem economizar, em média, ao redor de 15% do combustível utilizado para aquecer o ar da capota.

Bibliografia

1. Ronald MacDonald – Papermaking and Paperboard Making.
2. Papermaking Part 2, Drying.
3. Yankee hood performance studies: the effect of air balance on thermal efficiency.- Victor Schukov and John Wozny – Tappi Journal April 1991.
4. Practical aspects of Yankee umidity control - Victor Schukov and John Wozny –Tappi Journal April 1993.
5. Effective Usage of energy in Tissue Drying – George Nowakoski - Tappi Conference, Atlanta April 2006.

Perfil do autor:

Júlio César Gerytch é formado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Iniciou suas atividades em julho de 1975 na Klabin Papéis, em Telêmaco Borba, onde exerceu os cargos de Chefe do Laboratório de Pesquisas Técnicas e da Máquina de Papel 7. Na Albany International, iniciou suas atividades em julho de 1989, atuando principalmente nas áreas de prensagem e secagem do papel. Atualmente exerce o cargo de Consultor Técnico.

indmomento_tecnico@albint.com | Um canal direto para sugestões e dúvidas.

Órgão Informativo de Albany International Brasil - Abril de 2015 - Albany International Tecidos Técnicos Ltda. - www.albint.com - Rua Colorado, 350 - CEP 89130-000 - Indaial - Santa Catarina - Brasil - Telefone: (47) 3333-7500 - Fax: (47) 3333-7666 - E-mail: indmomento_tecnico@albint.com

Expediente:

Editores: Fábio J. Kühnen, Harlei A. Erdmann e Michele L. Stahnke - Diagramação: Studio Gama Comunicação - Revisão: Diogo F. Biehl - A redação não se responsabiliza pelos conceitos emitidos em artigos assinados. É proibida a reprodução total ou parcial de textos, fotos e ilustrações, por qualquer meio, sem autorização.