

## **Otimização Energética no processo de secagem - Máquina de Papel**

Glauco Luiz Romano - Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda.

Rafael Rosa Arantes - Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda

Geovani Gonçalves Bezerra - Voith Paper Máquinas e Equipamentos Ltda

### **Resumo Português**

O assunto "otimização energética no processo de secagem" de máquinas fabricantes de papeis já é um tema conhecido e repetidamente explanado nas suas mais diversas formas e meios tanto acadêmicos como práticos, isto é, nas fábricas onde o processo efetivamente ocorre.

Sem a pretensão de ser repetitivo sobre o assunto, mas com o objetivo de trazer lucidez ao tema e divulgar alguns dados teóricos e reais, o trabalho aqui apresentado aborda os principais pontos potenciais onde se podem encontrar oportunidades de economia de energia através de otimização.

São dois os sistemas que mais consomem energia para obter como resultado a evaporação da água na seção de secagem: sistema de vapor e condensado e sistema de ventilação com capota fechada em máquinas multicilindro.

Para o sistema de vapor condensado encontram-se quatro tópicos relevantes e extensamente explorados, onde se consegue atuar para alcançar resultados: conceito do sistema, aumento da transferência de calor para a folha, controle de drenagem e reaproveitamento de vapor recuperado ou vapor flash.

Para o sistema de ventilação com capota fechada encontram-se outros quatro tópicos de importância que propiciam resultados significativos de economia de energia: reaproveitamento da energia contida no ar de exaustão, reaproveitamento da energia contida no vapor recuperado; temperatura do ar de insuflamento e ponto de orvalho.

Ao explorarem-se estes pontos em qualquer máquina de fabricação de papel, há possibilidades de encontrarem-se oportunidades de otimização energética.

### **Resume English**

The subject "energy optimization in the process of drying" of papers machines is already a known theme and repeatedly explained in their more several forms and means as much academics as practical, that is, in the factories where the process indeed happens.

Without the pretension of being repetitive on the subject, but with the objective of to bring lucidity to the theme and to publish some theoretical and real data, the work here presented approaches the main potential points where it is possible to find opportunities of energy saving through optimization.

There are two systems wich are biggers consumers of energy to obtain as result the evaporation of the water in the drying section: steam system and condensate and ventilation system with closed hood in papermaking machines.

For the steam and condensate system found four relevant topics and widely explored, where it can to act to reach results: system concept, increase of the heat transfer to paper web, drainage control and reuse of recovered steam or steam flash.

For the ventilation system with closed hood found other four topics of importance that propitiate significant results of energy saving: reuse of energy contained in the exhaustion air, reuse of energy contained in the recovered steam; supply air temperature and dew point.

When exploring these points in any papermaking machine, there are possibilities to find oppotunities of energy optimization.

## Palavras-chave

Secagem; consumo de vapor; ponto de orvalho; economia de energia

Dry end section; steam consumption; dew point; energy saving

## Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar aspectos da otimização do uso da energia no processo de secagem da folha em máquinas de fabricação de papel, relacionados à operação, equipamentos e processos.

## A remoção de água da folha

Para entender-se a necessidade de otimização energética no processo de secagem é inevitável falar de custos em todas as etapas de retirada de água da folha durante o processo de fabricação. O custo de secagem é indubitavelmente o de maior impacto econômico. Entretanto, muitas variáveis e processos adjacentes afetam o custo total de secagem. Pode-se destacar, por exemplo, os custos de acionamento (drive), vestimentas, lubrificantes, manutenção, pessoal de operação, além de utilidades necessárias ao processo.

Todos estes componentes, se estudados separadamente, podem contribuir significativamente para a redução do custo de remoção de água da folha por secagem. Entretanto, o custo energético, mais comumente conseguido com vapor à baixa e média pressão e largamente utilizado em quase todas as máquinas de fabricação de papel multicilindros, oferece as maiores oportunidade de redução do custo de secagem.

## Perfil de Custos Operacionais - Ano base 2000

Zonas	Teor Seco (Entrada)	Teor Seco (Saída)	% Água Removida	Custo US\$ / Ton fibra
Formação	1%	18%	95,4%	0,14
Prensagem	18%	42%	3,2%	1,90
Secagem	42%	94%	1,34%	22,00

A dificuldade de extração da água aumenta a cada fase e, conseqüentemente, os custos para extraí-la.

O foco de otimização, baseado no perfil exposto, volta-se totalmente para a secagem em função do seu alto custo proporcional no equipamento completo.

## Princípios básicos da Teoria de secagem por contato

### Processo de secagem

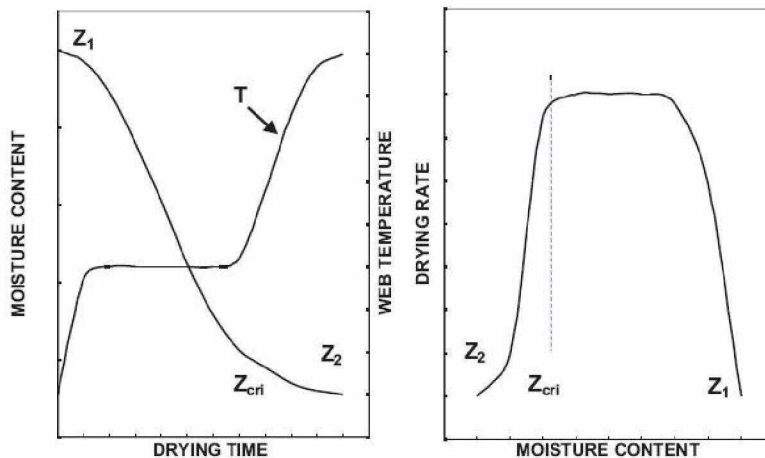
De maneira simplificada, o processo de secagem da folha ocorre em três fases (conforme mostrado na Figura abaixo):

Fase de aquecimento;

Fase de taxa de evaporação constante, e;

Fase de taxa de evaporação decrescente.

O sistema mostrado abaixo é comumente aceito na maioria das MPs. Nas máquinas, entretanto, a fase de taxa constante freqüentemente não existe.



### Processo de secagem (Tappi)

Na fase de aquecimento a temperatura e a taxa evaporação aumentam gradualmente e se aproximam da fase de taxa de evaporação constante. Na fase de taxa de evaporação constante a energia que é transmitida para a folha está em equilíbrio com a energia consumida na evaporação da água contida. Nesta condição a temperatura e a taxa de evaporação são constantes. A evaporação pode ocorrer na superfície da folha ou no interior da mesma. Em ambos os casos, a resistência para a difusão de vapor para fora da folha é desprezível. Na fase de decréscimo da taxa de evaporação, diminui a taxa de secagem devido o aumento da resistência para difusão do vapor do interior da folha para a superfície. Isto se deve ao decréscimo da pressão parcial de vapor em razão da natureza higroscópica da fibra e do aumento da resistência à transferência de calor por causa da redução da condutividade térmica da folha. Conseqüentemente, a energia necessária para a evaporação também diminui. A temperatura da folha começa a aumentar quando o sistema busca o balanço térmico. O ponto de inversão da fase constante para a fase decrescente é o ponto de umidade crítica [critical moisture content (CMC)]. A fase decrescente tem dois, chamados "primeira e segunda fase decrescente". A segunda fase decrescente começa após a remoção de toda a água livre da folha. Uma leve declinação da curva de secagem inicia neste ponto.

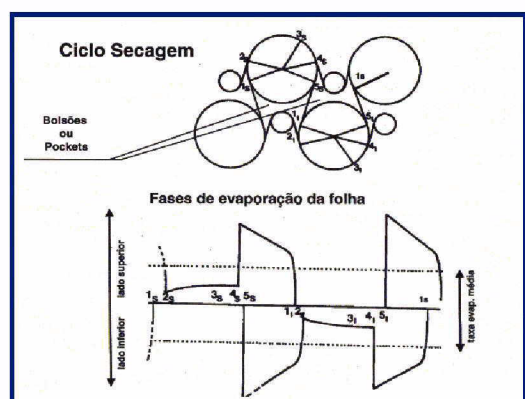
### Fases de contato com o cilindro secador e evaporação da folha na secagem multicilindro. (Tappi)

Dois fenômenos físicos estão envolvidos no processo de secagem da folha por contato:

Transferência de calor:

É o fornecimento de calor de alguma fonte para a folha úmida de forma a prover a energia necessária para evaporar a massa de água da folha de papel. Em máquinas multicilindros a fonte de fornecimento de calor é o vapor.

Injetado no interior dos cilindros secadores, o vapor, em contato com a camisa do secador condensa e fornece o calor necessário para a evaporação da água contida na folha no lado externo do secador.



A maneira simplificada de calcular-se a quantidade de calor transmitida através do sistema, desde o vapor no interior do secador até a folha no lado externo do secador, está descrita na fórmula abaixo:

Coefficiente global de transferência de calor:

$e_1$  = espessura da camisa do cilindro

$e_2$  = espessura da folha de papel

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e_1}{k_s} + \frac{1}{h_A} + \frac{e_2}{k_P} + \frac{1}{k_v}}$$

$h(c)$ : coeficiente de convecção do condensado

$k(s)$ : coeficiente de condutibilidade térmica do material do cilindro

$h(A)$ : coeficiente de convecção do ar

$k(P)$ : coeficiente de condutibilidade térmica do papel

$h(v)$ : coeficiente de convecção na película ar + vapor

Transferência de massa:

É a transferência da massa de água evaporada da folha de papel para o ambiente da secagem (bolsão). As condições do ar no entorno da folha aquecida precisa ter baixa umidade e alta capacidade de receber a água evaporada pela folha. Este fenômeno é definido como "Driving Force".

A teoria do ar úmido é extensamente utilizada para calcular os fluxos de ar requeridos em uma seção de secagem multicilindros composta de fileiras simples (sem bolsões) e/ou dupla (com bolsões).

## Escala de retornos na otimização do uso da energia no processo de secagem

Escala de retornos na otimização do uso da energia

Ao estabelecer-se uma escala de retornos na otimização de energia utilizada no processo de secagem conclui-se que na base desta escala está o sistema de vapor e condensado.

Com o crescente custo de obtenção de vapor, a importância desta fonte de energia vem aumentando significativamente e otimização de seu uso tem se tornado bastante relevante.

Pode-se listar como prioridades: sistema de vapor e condensado; capota e sistema de ventilação; sistema de passagem de ponta (runnability), vestimentas entre outros de menor escala.

Neste conceito, a otimização do sistema de vapor e condensado é o primeiro estágio na obtenção de ganhos com implementações no processo de secagem.

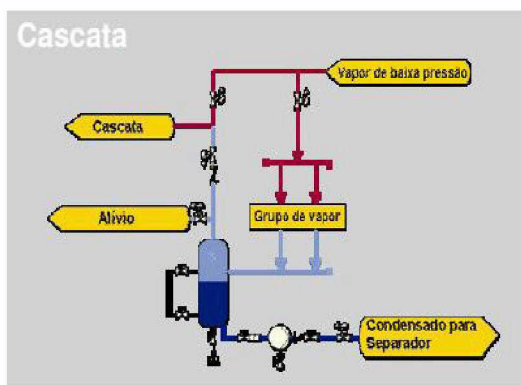
O resultado da aplicação de recursos com o objetivo de aperfeiçoar e melhorar o sistema de vapor e condensado tem como evidentes ganhos de produção e/ou a redução de custos operacionais e de processo



## Sistema de vapor e condensado: oportunidades de otimização e caracterização de perdas

Aspectos técnicos relacionados à escolha do sistema mais adequado às características de produção e operação em uma máquina:

Sistema cascata tradicional:



Requer somente vapor de baixa pressão;

As pressões de vapor nos vários grupos de secagem são dependentes;

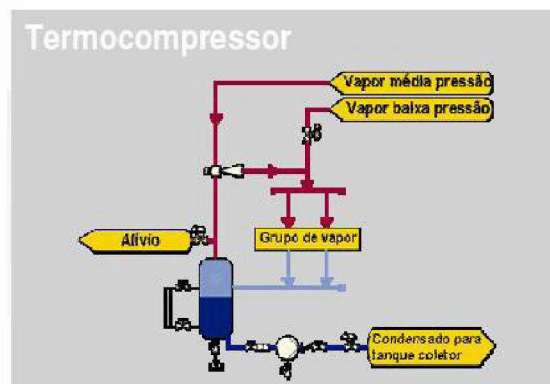
Sistema com desaeração automática (sem perda de vapor);

Exige maior diferença de pressão entre os grupos e reduz a pressão média;

Sistema flexível quanto a variação de pressão no grupo de secagem;

Pode operar com vácuo nos grupos de baixa temperatura ou grupos de aquecimento.

Sistema Termocompressor:



Requer vapor de média pressão;

As pressões de vapor nos vários grupos de secagem são independentes;

Sistema fechado (sem desaeração automática). Desaeração por abertura programada da válvula de alívio (perda de vapor);

Não exige diferença de pressão entre os grupos, portanto, maior pressão média;

Sistema menos flexível quanto a variação de pressão no grupo de secagem.

Não trabalha com vácuo.

Aspectos econômicos relacionados ao tipo de sistema adotado em uma secagem

Em plantas com geração de energia integrada, a energia elétrica gerada na turbina é menor em função do vapor de média pressão (expansão do vapor que gera energia na turbina) requerido no sistema termocompressor;

O sistema termocompressor não é auto-des aerável;

Para eliminação dos gases incondensáveis a válvula de alívio deve ser aberta periodicamente o que significa perda de vapor;

Existe acúmulo de gases incondensáveis que resultam em má transferência de calor nos cilindros secadores.

Consumo de vapor no sistema termo compressor é 2 % maior que no sistema cascata.

Por ex.:  $29,4 \text{ T/h} \times 0,02 = 0,588 \text{ T/h}$

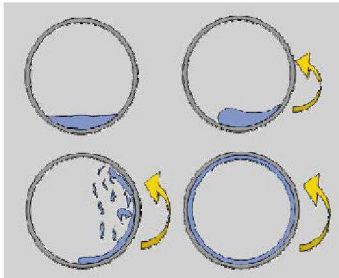
$\times 24 \text{ h} \times 361 \text{ d} \Rightarrow 5094 \text{ T/ano}$

$\times \text{€ } 20/\text{T} \Rightarrow \sim \text{€ } 101.888 / \text{ano.}$

## Drenagem dos secadores

Formação do filme de condensado

A influência da velocidade no comportamento do condensado



Baixas velocidades:  
Condensado tipo poça "sump"

Medias velocidades:  
A partir de aprox. 400 m/min: Filme de condensado turbulento

Velocidades superiores:  
A partir de aprox. 600 m/min: Filme laminar de condensado  
(aumenta a estabilidade do filme com o aumento de velocidade).

Tipo de coleta de condensado

Caneco - Conceito que foi utilizado nas primeiras máquinas projetadas; somente opera com poça "sump" e velocidade máxima de aproximadamente 400 m/min. Sistema requer maior diferencial para drenagem à medida que a velocidade aumenta.

Sifão Rotativo - Conceito que equipa muitas máquinas atualmente em operação; transição de poça para filme de condensado operando com velocidades de até no máximo aproximadamente 1000 m/min. Hoje conhecidamente considerado como potencial item de melhoria e otimização.

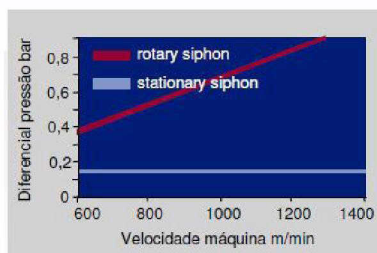
Sifão Estacionário - Conceito mais atual. As máquinas modernas ou instaladas recentemente são equipadas com sifões estacionários e podem operar com poça e filme de condensado em todas as velocidades (conceito imprescindível acima de 1000 m/min).

Diferencial de pressão " $\Delta P$ "

Estado da pressão do vapor estabelecido entre entrada e saída do cilindro secador.

Cria a diferença de potencial que gera o fluxo de arraste do condensado pelo sifão carregando-o para fora do secador.

Quadro comparativo para diferencial de pressão



Quadro comparativo mostrando a necessidade de maior diferencial de pressão quanto maior a velocidade da máquina para um sifão do tipo rotativo. Isto ocorre porque existe o efeito da força centrífuga que exige este maior diferencial.

O diferencial para um sifão do tipo estacionário permanece constante independente da velocidade da máquina. Neste tipo não há a influência da força centrífuga.

Vapor de passagem ou "Blowthrough"

É o fluxo de vapor adicional ao vapor que será condensado na troca de energia com o sistema.

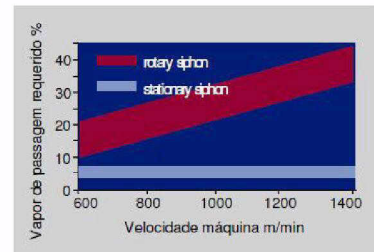
O vapor de arraste promove uma mistura de baixo peso específico no interior do sifão, que diminui a influência da gravidade e força centrífuga.

Quadro comparativo de vapor de passagem

O quadro comparativo ao lado mostra a necessidade de maior vapor de passagem quanto maior for a velocidade da máquina para um sifão do tipo rotativo. Está correlacionado com a maior necessidade de pressão diferencial.

O vapor de passagem para um sifão do tipo estacionário permanece constante independente da velocidade da máquina.

O correto dimensionamento da união rotativa, a utilização do tipo de sifão apropriado e um projeto criterioso das tubulações de drenagem dos cilindros são oportunidades substanciais de redução de consumo de vapor.



## Controle do filme de condensado

Outro critério extremamente importante é o controle do filme de condensado presente no secador.

Devido ao baixo coeficiente de condutividade térmica do condensado, que praticamente funciona como um isolante do sistema, cada milímetro de filme adicional aumenta em aproximadamente 88 vezes a dificuldade de transferir calor do vapor para o papel.

Comparando-se os coeficientes utilizados na fórmula de coeficiente global de transferência anteriormente apresentada, encontra-se a seguinte relação:

Coeficiente de condutividade térmica do FERRO FUNDIDO =  $k(s) = 59 \text{ W/mK}$

Coeficiente de condutividade térmica do CONDENSADO =  $k(c) = 0,67 \text{ W/mK}$

Portanto:  $k(s) = 88 k(c)$

Como isolante térmico: 1,0 mm de condensado  $\equiv$  88 mm de ferro fundido

O controle de espessura da película de condensado é primordial para se obter boa eficiência de secagem, assim como, garantir umidade uniforme da folha na enroladeira.

Um cálculo teórico elaborado com um programa específico para dimensionamento de secagem em máquinas de papel indicou os seguintes resultados:

Dados	Caso 1	Caso 2
Lâmina de condensado [mm]	4	2
Velocidade [m/min]	925	925
P média [bar]	6,4	4,4
TS prensas	48	48
TS final	95,97	95,97
Termo anel	Não	Não
Consumo Vapor [kg/h]	29462,4	28784,3
Produção [ton/24h]	542	542

Uma redução teórica de aproximadamente 2,3 % no consumo de vapor em função da redução de pressão média da máquina, somente controlando o filme de condensado.

Utilizando-se os mesmos dados de custo de vapor já utilizados temos para o caso acima uma economia como segue:

Por ex.:  $29,4 \text{ T/h} \times 0,023 = \mathbf{0,588 \text{ T/h}}$

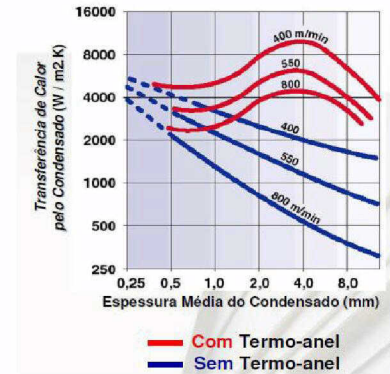
$\times 24 \text{ h} \times 361 \text{ d} \Rightarrow \mathbf{5095 \text{ T/ano}}$

$\times \text{€ } 20/\text{T} \Rightarrow \sim \mathbf{\text{€ } 101.900 / \text{ano.}}$

## O Efeito Termo-anel

Termo-anéis tem sido amplamente instalados nas máquinas como recurso importante de otimização na qualidade de secagem (perfil de secagem), aumento de produção e, principalmente como equipamento para quebrar o efeito isolante do filme de condensado, aumentando a transferência de calor para o papel. Ensaios feitos e publicados por "Voith Group of Companies" detectaram ganhos calculados conforme exposto no gráfico abaixo:

Dados	Caso 1	Caso 2
P média [bar]	4,80	2,65
Velocidade [m/min]	925	925
TS prensas	48	48
TS final	96,95	96,99
Termoanel	Não	Sim
Consumo Vapor [kg/h]	29364,4	28567,5
Produção [ton/24h]	536,7	536,5
Água Evaporada	22813	22813



Para uma mesma máquina com um filme de condensado de 4 mm, trabalhando a uma velocidade de 800 m/min, sem termo-anel, tem um coeficiente de troca térmica de aproximadamente 500 W/m²K. A mesma máquina, com termo-anel instalado, trabalhando à mesma velocidade tem um ganho equivalente de troca térmica de aproximadamente 8 vezes, passando para aproximadamente 4000 W/m²k.

Uma redução teórica de aproximadamente 2,7 % no consumo de vapor em função da redução de pressão média da máquina, somente instalando-se termo-anéis para aumento de transferência de calor.

Uma economia de:

Por ex.: 29,4 T/h x 0,027 = **0,794 T/h**

x 24 h x 361 d => **6877 T/ano**

x € 20/T=> ~ € **137.540 / ano**

## Recuperação de energia através da reutilização do vapor recuperado (flash)

Todo o vapor coletado do sistema de vapor em um tanque geral de condensado a 0,5 barg tem energia suficiente para pre-aquecer o ar de insuflamento para o sistema de ventilação da máquina em até 50 °C de ΔT, isto é, desde aproximadamente 45°C até 95°C.

$$m_{flash} = m_{p_{ent}} \left[ \frac{h'_{p_{ent}} - h'_{p_{desc}}}{r_{p_{desc}}} \right] \eta$$

$\eta$  = fator dependente da pressão média

Para máquinas com pressão média até 5 barg,  $\eta = 0.3$

Para máquinas com pressão média acima de 5 barg,  $\eta = 0.6$

$P_{ent}$  = pressão de entrada na válvula principal da máquina

$P_{desc}$  = pressão de descarga após a válvula de controle na entrada do tanque geral de condensado

$m_{flash}$  = massa de flash, gerada no tanque geral de condensado.



$m_{P_{ent}}$  = massa de vapor de entrada na máquina de papel.

$h'_{P_{ent}}$  = entalpia do vapor saturado à pressão do vapor de entrada na máquina de papel

$h'_{P_{desc}}$  = entalpia do vapor saturado à pressão do vapor de descarga da máquina de papel

$r_{P_{desc}}$  = diferença de entalpia à pressão de descarga

Aplicando-se esta forma simplificada de cálculo de vapor flash, considerando-se a máquina como o DP do sistema, obtém-se de maneira aproximada a quantidade de vapor flash gerado pelo sistema a uma pressão de 0,5 barg, vapor este que pode ser reaproveitado para pre-aquecer o ar de insuflamento para o sistema de ventilação.

Um cálculo feito com base em máquinas de fabricação de diferentes tipos de papel e de requerimento de pressões de alimentação distintas determinou os resultados teóricos demonstrados abaixo:

DADOS	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4
P média [bar]	6,6	4,8	4,0	2,8
Gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	186,0	194,0	75,0	48,8
Velocidade [m/min]	758,0	672,0	1250,0	1200,0
Produção [ton/24h]	1024,0	1100,0	706,0	430,0
Consumo de vapor [kg/h]	69545,0	69280,0	46650,0	27700,0
Entalpia líquido saturado a pressão média [kJ/kg]	687,1	633,8	604,9	551,6
Vapor flash teórico [%]	9,9%	7,5%	6,2%	3,8%
Vapor flash teórico [kg/h]	6869	5184	2886	1051
Vapor flash real [%]	5,9%	4,5%	1,9%	1,1%
Vapor flash real [kg/h]	4084	3130	865	295
Diferença do calculado para o real [%]	59,5%	60,4%	30,0%	28,1%
Fator de correção $\eta$ para pressão média	0,6	0,6	0,3	0,3

Caso 1 - embalagem; Caso 2 - cartão revestido; Caso 3 - imprimir e escrever; Caso 4 - jornal

A tabela acima está considerando apenas o vapor que alimenta os cilindros secadores. Estão excluídos os trocadores de calor ar/vapor vivo.

Evidentemente, quanto menor a pressão média da máquina e quanto maior a necessidade de baixas temperaturas nos primeiros grupos de secagem (requer vácuo) menor é a disponibilidade de vapor flash. Entretanto, com um cálculo simplificado indicado na fórmula anterior é possível estimar a massa de vapor flash disponível e comparar-se com o vapor flash realmente disponibilizado na máquina.

## Sistema de ventilação: oportunidades de otimização e caracterização de perdas

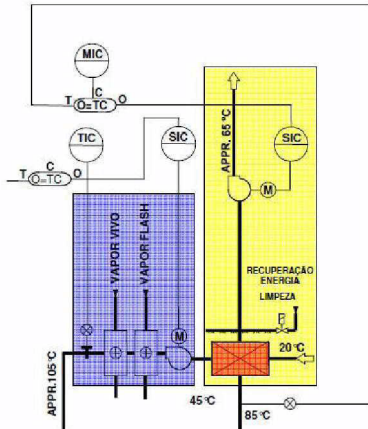
### Potenciais de ganhos com melhorias e otimização:

As maiores oportunidades de otimização de energia no sistema de ventilação de uma máquina de papel estão no aquecimento do ar de insuflamento, com a utilização de vapor recuperado no tanque geral de condensado e com o reaproveitamento da energia contida no ar de exaustão da capota.

Fatores como ponto de orvalho de operação da capota e a temperatura máxima de aquecimento do ar de insuflamento determinam perdas e consumos excessivos de energia.

Todos estes fatores combinados geram um gasto extra de energia que é injetada e perdida no sistema sem a utilização efetiva no processo de secagem da folha.

## Reaproveitamento ar de exaustão da capota e utilização do vapor flash do tanque geral de condensado



Como exemplo, para uma máquina que evapora 28,8 T/h de água, a necessidade de ar quente insuflado é de 186 T/h de ar seco. A exaustão consequente é de aproximadamente 265 T/h de ar seco. Calculando-se a energia envolvida no processo, tem-se o seguinte:

Energia total necessária para aquecer o ar de insuflamento de 20°C até 105°C = 4,6 MW;

Energia recuperada no trocador de calor ar/ar para pre-aquecer o ar de insuflamento de 20°C até 45°C = 1,4 MW;

Energia recuperada no trocador de calor ar/vapor flash para pre-aquecer o ar de insuflamento de 45°C até 95°C = 2,4 MW;

Energia efetivamente utilizada no trocador de calor ar/vapor vivo para aquecer o ar de insuflamento de 95°C até 105°C = 0,8 MW.

Isto representa uma economia de aproximadamente 3,8 MW. Equivalente a um consumo de vapor vivo de 6,5 T/h (vapor alimentado a 4,5 barg).

Uma economia de:

$$6,5 \text{ T/h} \times 24 \text{ h} \times 361 \text{ d} \Rightarrow \mathbf{56316 \text{ T/ano}}$$

$$x \text{ € } 20/\text{T} \Rightarrow \sim \mathbf{€ 1.126.320 / \text{ano}}$$

Considerando-se máquinas que já tenham implementado estas recuperações de energia, mas operam com perda de 15% do total que se poderia recuperar, tem-se o seguinte:

$$\sim \mathbf{€ 1.126.320 / \text{ano} \times 0,15 = € 168.948 / \text{ano}} \text{ de perda.}$$

## Temperatura do ar de insuflamento

Comumente se tem a falsa impressão de que quanto mais quente o ar de insuflamento, mais eficiente será o arraste de ar úmido para a atmosfera. Entretanto quando se analisa o balanço energético e a eficiência da transferência de massa (água evaporada) para o ar seco e aquecido enviado aos bolsões da máquina, se observa que além dos 100°C, não há muita vantagem e por outro lado há uma perda considerável de energia no aquecimento do ar.

O ar de insuflamento, embora tenha a sua capacidade de umidificação aumentada em função da temperatura maior de insuflamento, não é capaz de aumentar substancialmente a transferência de massa de água da folha para o ar devido à limitação de "driving force".

A força de transferência de água da folha para ar está limitada na pressão de saturação da água contida na folha, que é função da temperatura da folha. A evaporação da água contida na folha está sujeita à pressão atmosférica, assim como o ar, e ambos têm a mesma limitação de saturação devido à transferência de massa de água da folha para o ar.

A única modificação que se consegue com o aumento de temperatura do ar é a redução de umidade relativa que, na prática, não ajuda em nada o processo. Ao contrário, só demanda um consumo maior de energia.

A demonstração deste fenômeno é extensa e envolve cálculos mais elaborados, entretanto abaixo está uma tabela com os valores já calculados de saturação do ar e variação da umidade relativa como única consequência:

CÁLCULO DE UMIDADES RELATIVA E ABSOLUTA COM BASE EM TBS E TBU								
ALTITUDE:	0		m					
	°C			kg/kg	%	Pa		
	Tbs (t)	Tbu (t*)	TP0 (td)	Cont. Umidade Abs (r)	Umidade Relativa h <sub>ras</sub> (φ)	pressão de saturação ar à TBS (Pws)	pressão de saturação ar TBH (Pws*)	pressão parcial de vapor do ar PV (Pw)
insuflamento	100	86,3	85,9	0,903	59,48	100877	60422	60000
insuflamento	135	86,7	85,9	0,903	19,24	311887	61448	60000
CONSTANTES UTILIZADAS NAS FÓRMULAS ACIMA								
C8	-5,8E+03	} constantes para cálculo de Pws*						
C9	1,4E+00							
C10	-4,9E-02							
C11	4,2E-05							
C12	-1,4E-08							
C13	6,5E+00							
a	6,54	} constantes para temperatura de ponto de orvalho						
b	14,526							
c	0,7389							
d	0,09486							
e	0,4569							
Ref.: 1989 ASHRAE HANDBOOK - FUNDAMENTALS - chapter 6. - Psychrometrics								
Nota: Correção para altitude referente ao nível do mar ( 101325 mbar)								

Nota: a pressão parcial de vapor teórica adotada na tabela acima, na prática não se pode atingir em função de que se considera que 100% da água migraram para o ar. Como ambos estão sujeitos à pressão atmosférica esta situação não ocorre.

Uma variação da umidade relativa é observada, que reduz de aproximadamente 60% para 20%. Contudo, a capacidade teórica de absorção de água (umidade absoluta) não se alterou, isto é, permaneceu em aproximadamente 0,9 kg água / kg de ar seco, tanto em 100 °C quanto em 135 °C, demonstrando-se assim que não há vantagem em aquecer o ar para chegar ao bolsão com mais que 100 °C.

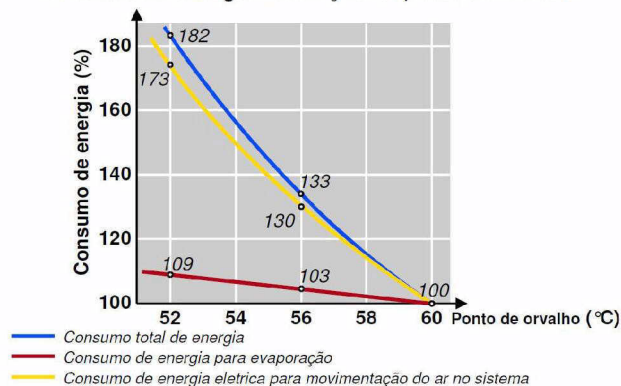
## Ponto de orvalho

O fator preponderante na economia de energia de todo o sistema de ventilação é sem dúvida o ponto de orvalho em que o sistema (movimentação de ar e capota isolada) trabalha.

O ponto de orvalho é a temperatura mínima limite abaixo da qual se inicia a condensação do vapor de água contida no ar. Qualquer superfície ou região com temperaturas menores que a do ponto de orvalho propicia a condensação.

Quanto maior o ponto de orvalho, menos massa de ar movimentada no sistema ter-se-á e, conseqüentemente, menor será a quantidade de energia despendida.

Consumo de energia em função do ponto de orvalho



Partindo-se de um ponto de orvalho de 60 °C, como base, nota-se que à medida que diminuimos, os consumos crescem respectivamente. Isto se deve ao fato de que o consumo de energia elétrica para movimentação da massa de ar necessária e de energia térmica, mais significativa, para aquecer esta mesma massa, aumenta consideravelmente.

A necessidade de aumento de massa de ar movimentado está relacionada com a capacidade de umidificação do ar na temperatura de exaustão, até o limite de saturação do ar de exaustão, no ponto de orvalho. Denomina-se  $\Delta x$  (delta de umidade absoluta).

Se o ar de insuflamento ingressa a 20g de água / kg de ar seco, e umidifica até o limite do ponto de orvalho, que para 60 °C, está em torno de 150g de água / kg de ar seco, tem-se um  $\Delta x$  de 130g de água / kg de ar seco.

Para cada kg de ar seco exaurido, 130g de água do processo está sendo arrastada para a atmosfera.

À medida que se reduz o ponto de orvalho a umidade máxima correspondente diminui e o sistema arrasta menos água por cada kg de ar seco. A consequência é uma maior demanda de massa de ar seco para arrastar a mesma quantidade de água evaporada da folha. Como o ar deve ser insuflado sempre a temperaturas ligeiramente acima de 100 °C, e com a necessidade de aumento de massa movimentada, todos os outros consumos intrínsecos aumentam proporcionalmente.

O desafio é construir a capota e o sistema de ventilação com isolamento e controle de movimentação o mais otimizado possível. Isto permite que o sistema e a capota trabalhem com alto ponto de orvalho.

Os requerimentos para isto são capota adequadamente isolada e hermética e sistema de movimentação de ar com recuperação de energia com perdas minimizadas ao extremo.

## **Conclusão**

Há muitas oportunidades de otimização de consumo de energia no processo de secagem em uma máquina de papel. A investigação individualizada e focada no processo de secagem, quando levada a cabo, pode trazer resultados expressivos de economia de energia.

Nos dias atuais onde o custo de fabricação de papel tem sido exaustivamente explorado com objetivo de aumento de competitividade, tanto no mercado interno quanto externo, o assunto “energia térmica” aparece como uma alternativa de otimização para alcançar-se patamares de economia que agreguem valores ao produto final, o papel.

## **Referências bibliográficas**

ROMANO, Glauco L., Curso de Secagem, apresentação do curso de secagem, Voith, 2006

TAPPI journal - Collection - Papermaking Science and Technology, 2000, Papermaking Part 2, Chapter 2 Fundamentals of paper drying, pages 1-3; 5-7; 10-17.

KAHL, Peter; FURLAN, Wagner A., Economia de energia na parte seca de uma máquina de papel, Voith - Apresentado no XIII congresso anual da A.B.C.P, 1980.

1989 ASHRAE HANDBOOK, Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1971 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA

BEZERRA, Geovani G., Fatores que influenciam a taxa de evaporação específica na secagem do papel: Secagem multicilindros por contato, UFV - Universidade Federal de Viçosa, Pós-Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel, 2007.