

redução de perdas de calor secundário no secador yankee

Wiktorian Z. Tarnawski, D. Sc., P. Eng

Instituto de Fabricação de Papel e de Máquinas de Papel
Universidade Técnica de Lodz
Lodz, 36 Zwirki St. - Polônia

SUMÁRIO

A reciclagem do vapor superaquecido é relativamente simples de ser realizada no secador Yankee por meio de uma capota.

Nos cilindros secadores equipados com sistema de recuperação de calor por ventilação o ar quente úmido que sai do secador contém grande quantidade de calor, cuja recuperação é feita por meio de trocadores de calor situados em série.

O sistema apresentado reduz as perdas de calor secundário e seu consumo específico em 49% e as perdas no secador até 95% e o consumo total do meio da secagem no sistema é reduzido em 50%.

ABSTRACT

Implementation of the superheated steam recycling system with heat recovery ventilation system is relatively easy to carry out in the Yankee dryer with a hood.

The moist hot air serving the dryer contains large quantities of waste heat whose recuperation is achieved by heat exchangers arranged in series.

This system reduces the secondary heat losses and the specific drying medium requirement by 49% and waste heat from the dryer by 95% and the total amount of drying medium working in the system is reduced by 50%.

Introdução

Nos secadores de máquina de papel equipados com sistema de recuperação de calor por ventilação, a corrente de ar quente úmido, ao deixar o secador, contém grandes quantidades de calor residual cuja recuperação é processada por trocadores de calor dispostos em série.

Um sistema de recuperação de três estágios, em condições ótimas, apresenta cerca de 25% de perda de calor. O ar quente úmido de 1 m³/h contém a quantidade de calor equivalente a 200.000 kg de carvão por ano. A redução das perdas de calor acima mencionada pode ser obtida

pela diminuição do ar de secagem.

A prática mostra que, numa base anual, somente o primeiro trocador de calor numa linha é eficiente. Neste aparelho o ar de secagem é aquecido pelo ar quente úmido que deixa o secador. Deste modo, aproximadamente 15% deste calor pode ser recuperado.

Um esquema do desenvolvimento de um sistema de ventilação da parte de secagem é mostrado no Quadro I. A redução da quantidade de ar de secagem é obtida:

- 1) diminuindo o ar de secagem não controlado (vazamento do ar ambiente dentro da coifa de ventilação)
- 2) aumentando o conteúdo de umidade do ar de secagem (3)

Desta maneira a quantidade específica de ar de secagem e calor necessários para secagem poderá ser reduzida de 75% e 14%, respectivamente. Vale salientar que esta solução requer um aumento da temperatura do ponto de condensação do ar úmido (T₊). Assim a temperatura do papel (T₊) como a temperatura da parede interna da coifa (T₊)

QUADRO 1

Parâmetros de operação de secadores para diferentes coifas de ventilação

Especificações	Unidades	Tipo de coifa de ventilação				Reciclagem de vapor
		Recuperação de calor				
		Aberto	Fechado	Super Vedado	Alta umidade de ar	Valor superaquecido
Saída de ar úmido de uma coifa - temperatura - conteúdo de umidade - ponto de condensação	°C kg/kg °C	57 0.04-0.065 45	75 0.1 53	82 0.135 58	85 0.1714 62	> 100 (140)* + ∞ 100
Entrada de ar controlado numa coifa - temperatura - conteúdo de umidade	°C kg/kg	93 0.0179	93 0.0179	93 0.0179	93 0.0179	> 100 (200)* + ∞
Relação do ar na entrada para a saída	kg/kg	0.3	0.7	0.85	0.95	—
Ar não controlado - temperatura - conteúdo de umidade	°C kg/kg	32 0.0179	25 0.0179	32 0.0179	32 0.0179	— —
Fator de ar necessário	kg/kg	20 - 40	12	9 - 12	6.5	0.74 kg vapor/kg água
Fator de calor necessário sem recuperação de calor	kJ/kg água	3400	3125	3035	2918	2730

* Temperaturas usadas para calcular o fator do calor necessário

devem ser aumentadas de acordo com a seguinte relação:

$$T_b > T_a < T_r$$

Para papéis e cartões cujas propriedades físico-mecânicas não são sensíveis a temperatura acima de 100°C um aumento do conteúdo de umidade do ar leva a mecanismos diferentes do processo de secagem, isto é, a vaporização molecular é substituída pela vaporização molar. Secagem de papel em faixa de temperatura acima de 100°C é possível usando vapor superaquecido sem a presença de oxigênio.

Esta abordagem proporciona uma redução adicional do meio de secagem e a possibilidade de reciclar o vapor superaquecido no sistema de secagem (1). O secador yankee equipado com uma coifa de ventilação é relativamente fácil de modificar pa-

ra o uso de vapor superaquecido (2).

Sistema de secador yankee convencional - operação

O cilindro secador yankee, com uma superfície lisa e espolhada, de até 6 m de diâmetro é usado para secar papéis especiais, por exemplo papéis monolúcidos.

Para melhorar o processo de secagem, o secador é também equipado com uma coifa. Um esquema deste sistema é mostrado na Figura 1.

O total da taxa de fluxo de calor fornecido à folha de papel pode ser expressado como segue:

$$q_{tot} = q_c + q_v = a_c (T_c - T_r) + a_v (T_a - T_r)$$

Onde:

q_c = taxa de fluxo de calor do cilindro, kJ/m²h

q_v = taxa de fluxo de calor da coifa yankee, kJ/m²h

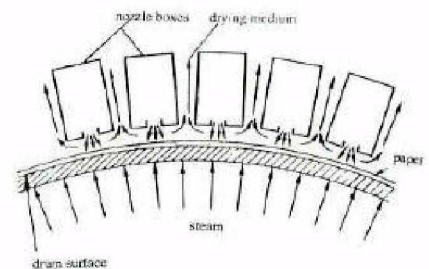


Figura 1:

Ar seco - Descarga vertical em coifa yankee de alta capacidade

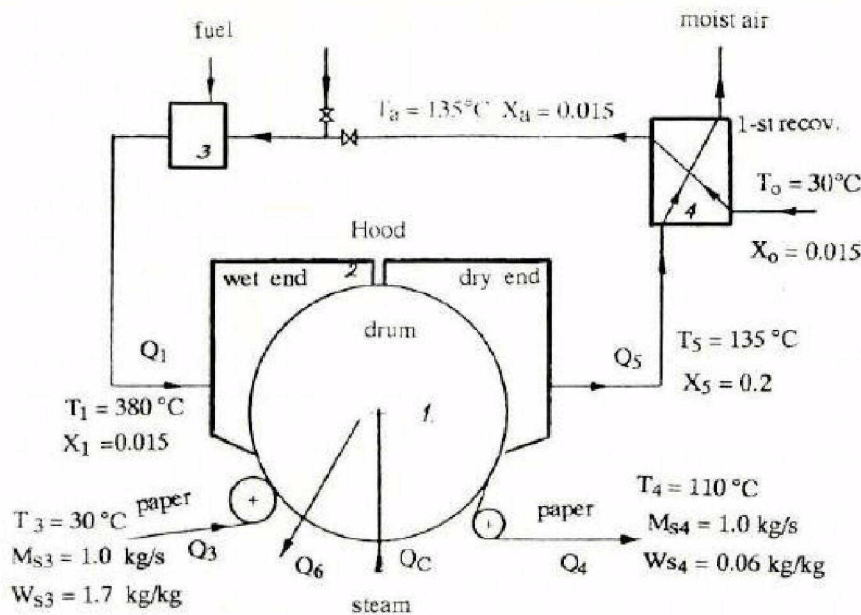


Figura 2:

Esquema de fluxo de calor para secador yankee com ar úmido
 1) cilindro; 2) coifa; 3) aquecedor de ar; 4) equipamento de recuperação de calor

- α_c = coeficiente de transferência de calor no cilindro, $\text{kJ/m}^2\text{hK}$
- α_v = coeficiente de transferência de calor na coifa, $\text{kJ/m}^2\text{hK}$
- T_c = temperatura do ar de secagem, $^{\circ}\text{C}$
- T_r = temperatura do cilindro, $^{\circ}\text{C}$
- T_p = temperatura do papel, $^{\circ}\text{C}$

A fração da taxa de fluxo de calor do cilindro e da coifa yankee em relaao ao total da taxa de fluxo de calor é aproximadamente 40-50 e 60-50%, respectivamente.

Uma coifa yankee típica utiliza ar de secagem aquecido por um aquecedor a vapor ou diretamente por um combustível. Um esquema deste secador é mostrado na Figura 2.

A figura 3 mostra o processo de secagem sobre um diagrama de ar úmido h-x. O calor necessário para este processo, Q_r , é fornecido para coifa (2), por ar quente obtido de um aquecedor de vapor (3).

O aquecimento de ar está assinalado no diagrama por uma linha A-1. O calor do cilindro (1) necessário para o processo de secagem, Q_c , está assinalado no diagrama por 1-5. Esta linha re-

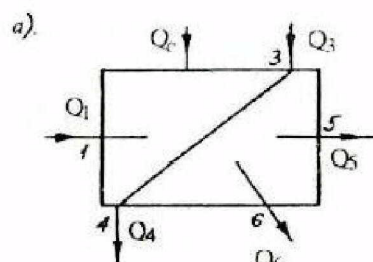
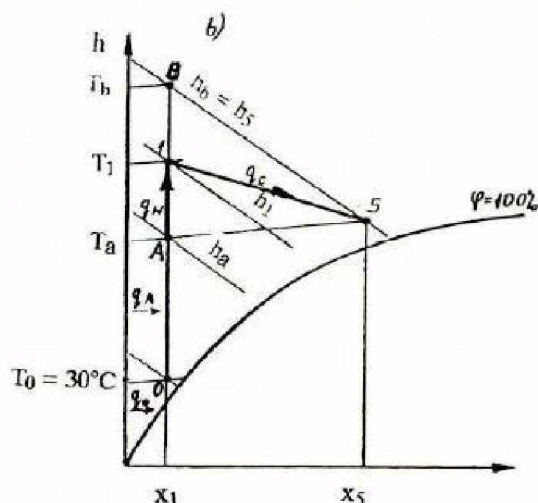


Figura 3:

Esquema de processo de secagem num secador yankee com ar úmido

a) secador yankee; b) h-x diagrama para o processo de secagem



presenta o processo de secagem que leva a um aumento do conteúdo de umidade do ar, de x_1 a x_5 . O fator de ar de secagem necessário pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{1}{x_5 - x_1}, \text{ kg/kg}$$

A quantidade de calor específico necessário para o processo de secagem é conseguida através de:

$$q = \frac{h_5 - h_0}{x_5 - x_1}, \text{ kJ/kg}$$

Onde:

h_0, h_5 = entalpia de ar de secagem nos pontos 0 e 5 respectivamente, kJ/kgK

x_1, x_5 = conteúdo de umidade do ar de secagem nos pontos 1 e 5, respectivamente, kg/kg

Pela fig. 3b fica claro que os fatores d e q são os mesmos do processo de secagem convencional de um estágio que segue o traado de 0-B-5. Também fica óbvio que o processo que segue a linha 0-1-5 leva a temperaturas de ar menores, o que é vantajoso para alguns tipos de papel.

Sistema de secador yankee de vapor superaquecido – operaao

Análise do diagrama h-x – sugestões práticas

Através da figura 4, que representa um esquema do diagrama

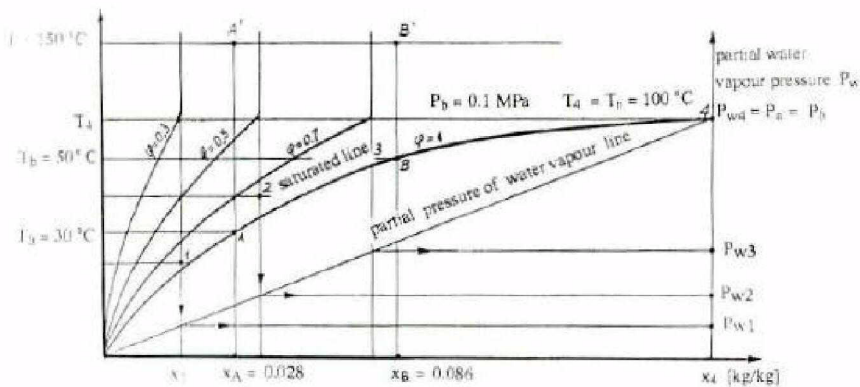


Figura 4:

Esquema de diagrama h-x de ar úmido (parâmetros mencionados)

h-x para ar úmido, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- 1) Para uma temperatura de ar saturado de $T_s = T_n = 100^\circ\text{C}$ e uma pressão barométrica $P_b = 0,1 \text{ MPa}$; $P_{w4} = P_n = P_b$, uma fração do ar seco diminui para zero. Tomando em conta o exposto e a relação seguinte:

$$x_4 = 0,622 \frac{P_n}{P_b - P_n} \rightarrow \infty$$

o conteúdo de umidade do ar x_4 vai ao infinito.

- 2) Com pressão barométrica de $P_b = 0,1 \text{ MPa}$, a temperatura de condensação do vapor é cerca de 100°C . Isto significa que a temperatura do vapor superaquecido no interior do secador deve ser igual ou maior que 100°C .
- 3) A vantagem do ar úmido, como meio de secagem, sobre o vapor aquecido é que a sua temperatura de ponto de condensação depende do conteúdo de umidade e é menor que 100%.

De acordo com a figura 4, estes parâmetros para ar úmido têm os seguintes valores:

- A' - ($T = 150^\circ\text{C}$, $x_A = 0,028$), $T_{ap} = 30^\circ\text{C}$
- B' - ($T = 150^\circ\text{C}$, $x_B = 0,086$), $T_{ap} = 50^\circ\text{C}$

Para vapor aquecido, $T = 150^\circ\text{C}$ e $P_b = 0,1 \text{ MPa}$, a temperatura de condensação é igual a $T_s = T_n = 100^\circ\text{C}$.

Da análise acima conclui-se que o uso de ar como meio de

secagem é mais conveniente que o vapor superaquecido, desde que os problemas de condensação de umidade dentro da coifa sejam mais fáceis de solucionar.

aquecimento leva a um potencial de absorção de umidade maior, que pode ser utilizado num sistema de secagem de vapor superaquecido reciclado.

O princípio deste sistema é apresentado na figura 5 e um esquema de processo de secagem à uma pressão barométrica constante ($P_b = 0,1 \text{ MPa}$) é mostrado na figura 6.

Como mostra a figura 5, o vapor é previamente superaquecido num aquecedor de vapor (3) antes de entrar na coifa (2). A quantidade de vapor superaquecido aumenta no secador através de uma quantidade de vapor gerado pelo papel úmido.

Para manter uma pressão constante no secador de recicla-

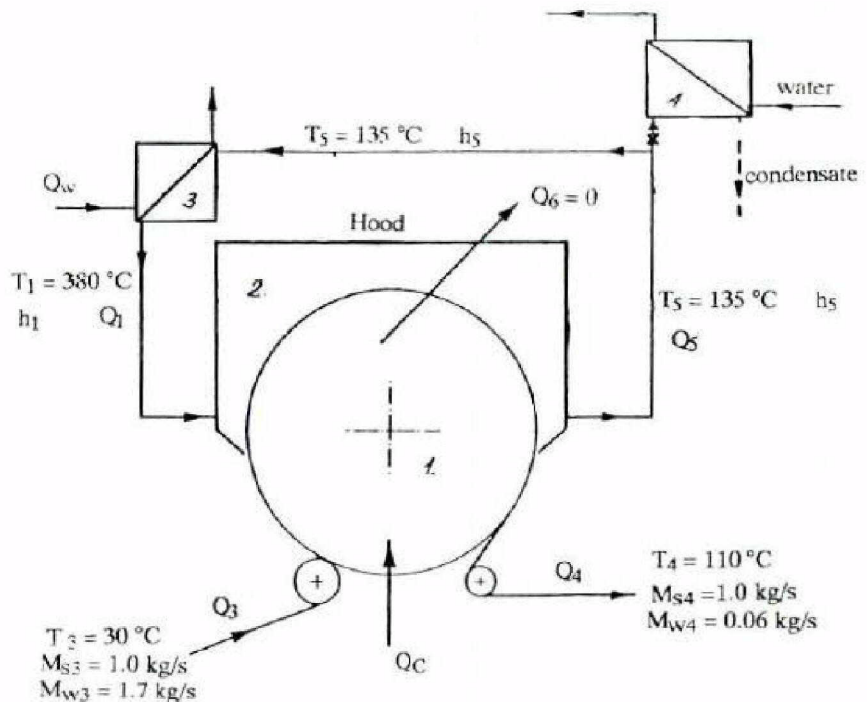


Figura 5:

Esquema de fluxo de calor para secador yankee com vapor superaquecido 1) cilindro; 2) coifa; 3) aquecedor de ar; 4) equipamento de recuperação de calor para vapor superaquecido

Princípio do secador de vapor superaquecido

O uso de vapor superaquecido tem uma vantagem importante, ou seja, um aumento de supera-

gem, é necessário levar o excesso de vapor a um aparelho de recuperação de calor (4), ou utilizá-lo de outro modo, por exemplo num sistema com um termocompressor ou uma bomba de calor. Os parâmetros de vapor na saída de uma coifa (2) são assinalados no ponto 5 (Fig.

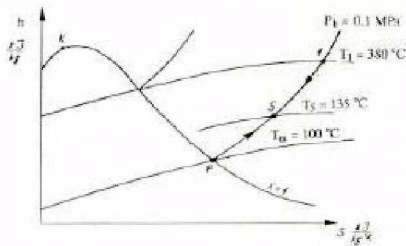


Figura 6:
Esquema do diagrama h-s para secagem com vapor superaquecido

6) e são o resultado da mistura de dois tipos de vapor, isto é o vapor superaquecido, representado pelo ponto 1, e o vapor saturado gerado pelo papel (ponto P).

Balço energético dos secadores

Hipóteses

Dois tipos de sistemas de ventilação serão analisados, baseados em:

- 1) Recuperação de calor para ar úmido (figura 2)
- 2) Reciclagem de vapor superaquecido (figura 5)

Ambos os sistemas serão analisados com base nos seguintes dados:

$T_1 = 380^\circ\text{C}$ – temperatura do meio de secagem na entrada do secador

$T_5 = 135^\circ\text{C}$ – temperatura do meio de secagem na saída do secador

$T_3 = 30^\circ\text{C}$ – temperatura do papel na entrada do secador

$T_4 = 110^\circ\text{C}$ – temperatura do papel deixando o secador

$M_s = 1.0 \text{ kg/s}$ – capacidade do secador em relação a um papel absolutamente seco

$W_{s3} = 1.7 \text{ kg/kg}$ – conteúdo de umidade de um papel entrando no secador

$W_{s4} = 0.06 \text{ kg/kg}$ – conteúdo de umidade de um papel saindo do secador

$Q_6 = 0 \text{ kJ}$ – perda de calor em ambos os sistemas

Nota: O calor fornecido ao processo de secagem é igualmente dividido entre a coifa (2) e o cilindro (1). $Q_7 = Q_8 = 0,5 Q_4$, onde Q_4 = calor necessário para secagem do papel utilizando-se um sistema de secagem.

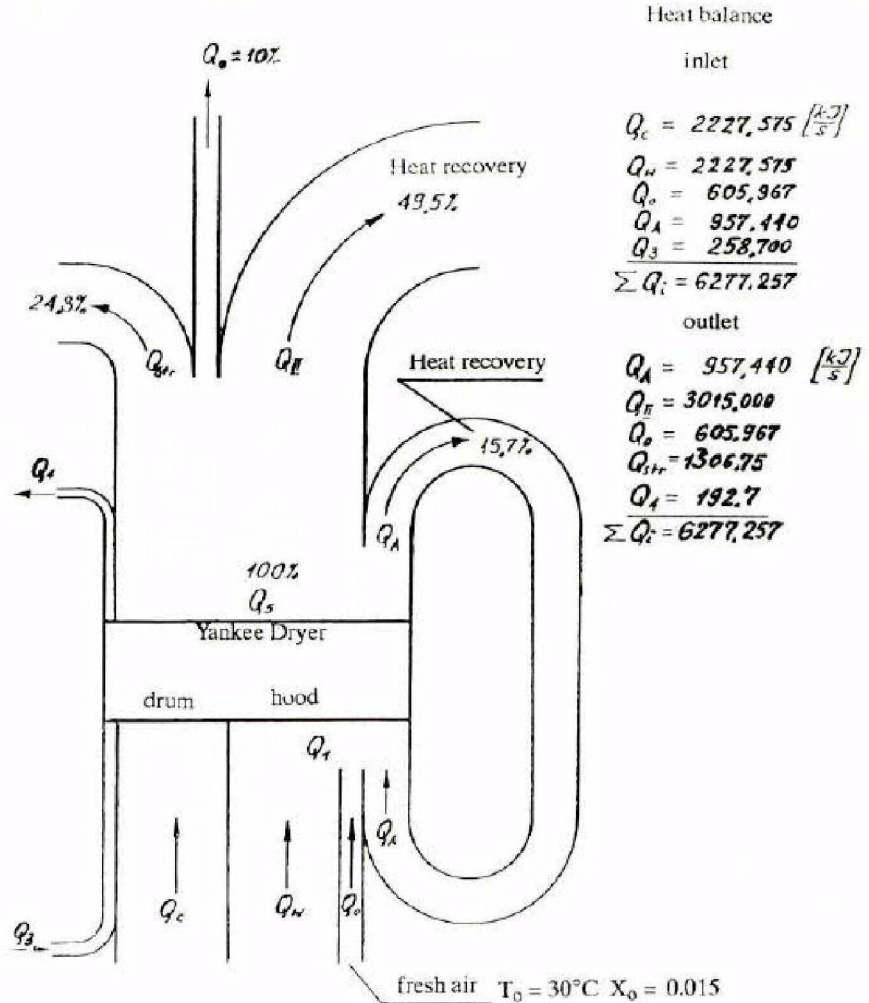


Figura 7:
Diagrama Sankey para secador yankee com ar úmido

Resultados e discussões

Um método de balanço, usando equações de massa e conservação de energia térmica, é utilizado para comparar os dois sistemas. Componentes das equações de balanço são determinados na base dos dados das hipóteses acima. Os resultados obtidos foram utilizados para elaborar os diagramas Sankey (figuras 7 e 8).

Num secador equipado com um sistema de recuperação de calor (figuras 2 e 7), utilizando-se ar úmido como meio de secagem, somente 15,7% do calor do ar úmido que deixa o sistema pode ser reutilizado num trocador de calor (4) para aquecer o ar fresco.

Uma recuperação anterior de calor está teoricamente limitada a uma quantidade de 49,5%. Sub-

traindo-se o conteúdo total de calor de ar fresco, Q_0 , nos dois lados da equação de balanço de calor, as perdas de calor finais ficarão em torno de 24,8%. Mais detalhes acerca dos valores para os parâmetros do balanço de calor são encontrados na figura 7.

Cerca de 73,4% do calor pode ser reutilizado no processo de secagem para um secador com reciclagem do calor superaquecido. Este tipo de secador é usado também para produzir vapor superaquecido, com isso mais 25,4% de calor pode ser recuperado. As perdas teóricas de calor deste sistema são de 1,22%.

A figura 8 mostra os valores para os parâmetros do balanço de calor para este sistema. Uma comparação de fatores e parâmetros técnicos para ambos os sistemas é apresentada no quadro 2.

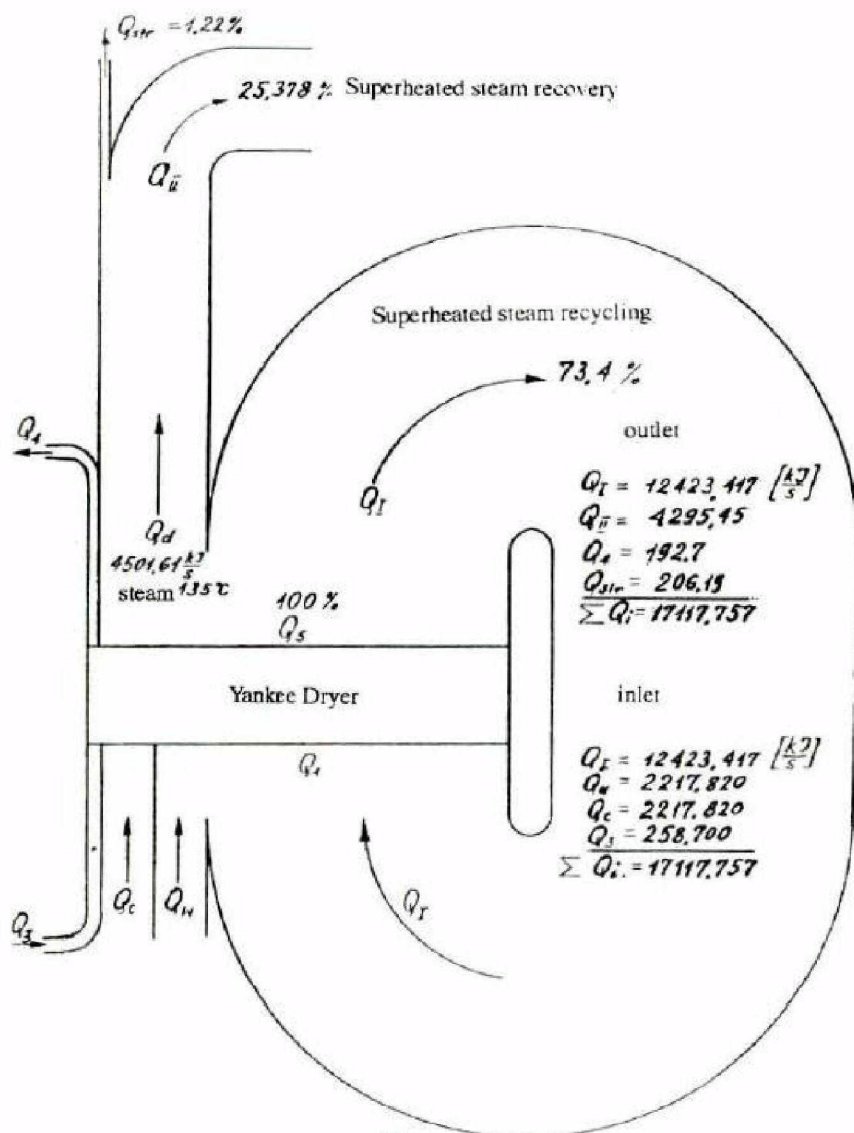


Figura 8:

Diagrama Sankey para secador yankee com vapor superaquecido

QUADRO 2 — Fatores teóricos para secador yankee usando ar úmido e vapor superaquecido

Meio de secagem	Temperatura do papel – 1.º período de secagem	Temperatura do meio de secagem		Fator do meio de secagem necessário	Fator de calor necessário	Desempenho Técnico de secador* Q_r/Q	Perdas de calor secundário
		entrada-coifa	saída-coifa				
		T_1 - °C	T_5 - °C				
Ar úmido sem recuperação de calor	100	380	135	5.4	3300.0	0.777	100
Ar úmido com recuperação de calor	100	380	135	5.4	2716.3	0.944	24.8
Vapor superaquecido com reciclagem de calor	100	380	135	2.76	2704.7	0.948	1.22

* Q_r = quantidade de calor teórico necessário para secagem do papel, kW
 Q = calor teórico fornecido a um sistema de secagem, kW

Conclusões

1) A implantação do sistema de reciclagem do vapor superaquecido é relativamente de fácil execução num secador yankee com uma coifa. Este sistema reduz a necessidade do meio de secagem até 49% e a perda de calor do secador em até 94%.

Alguns dos problemas de ordem ambiental inerentes ao sistema de secagem convencional são também reduzidos.

2) A quantidade total do meio de secagem que atua no sistema é reduzida em até 50%, o que leva a uma menor necessidade de energia para movimentar ventiladores.

3) Um sistema de reciclagem do vapor superaquecido gera vapor superaquecido equivalente à quantidade de umidade evaporada do papel.

4) Os seguintes problemas devem ser considerados antes de projetar qualquer sistema de trabalho:

- a influência do vapor superaquecido sobre as propriedades do papel.
- perfeita vedação e isolamento térmica da coifa.
- tecnologia de como obter vapor superaquecido a alta temperatura em condições mais próximas das barométricas.