

Geradores de Vapor

4º ano

Aula 15

Superfícies de Aquecimento Convectivo

- Tópicos
 - Projecto das Superfícies de Aquecimento
 - Controle da Temperatura nos Superaquecedores e nos Reaquecedores
 - Economizadores
 - Aquecedores de Ar

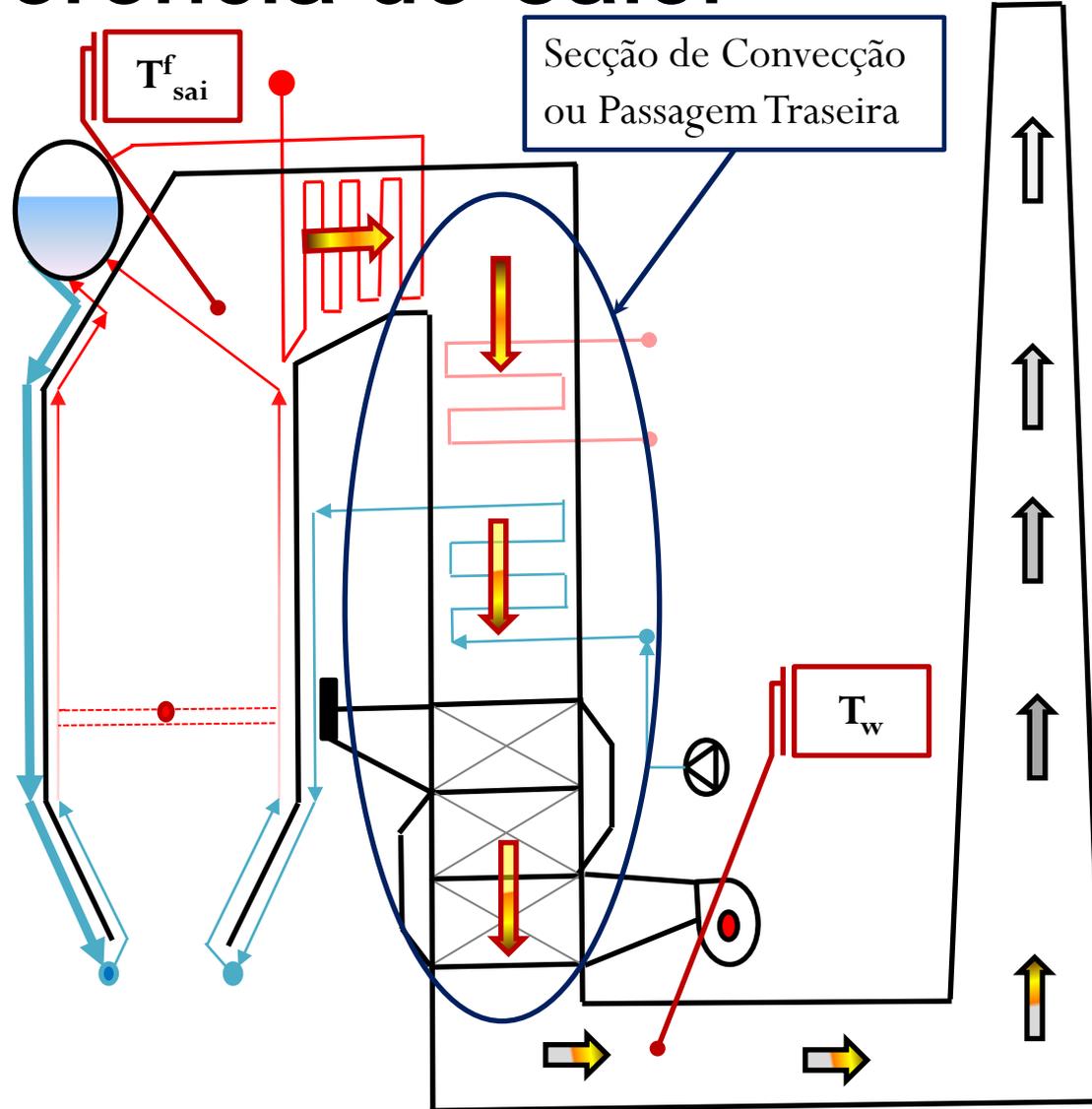


15. Superfícies Convectivas de Transferência de Calor

Após a sua saída da fornalha os produtos de combustão entram na secção convectiva da caldeira, onde eles baixam mais a sua temperatura através da transferência de calor para o vapor de água, para a água de alimentação e, em alguns casos, para o ar de combustão. O principal modo de transferência de calor nesta secção é a convecção forçada. Por isso, esta secção é chamada *secção de convecção*. Por estar localizada na parte posterior da caldeira também é chamada de *passagem traseira*. O gás nesta secção entra a uma temperatura próxima da de saída da fornalha e sai a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura de escape.



15. Superfícies Convectivas de Transferência de Calor



15.1 Projecto de Superaquecedores e Reaquecedores

A função de um superaquecedor é de aquecer o vapor a alta pressão a partir da sua temperatura de saturação até uma temperatura especificada mais elevada. A finalidade do reaquecedor é de aquecer o vapor, parcialmente expandido, de baixa pressão até uma temperatura elevada pré-determinada. O vapor reaquecido, em seguida, retorna às secções de trabalho da turbina de média pressão para expansão posterior. A pressão do vapor reaquecido é de apenas cerca de 20% da do vapor de água sobreaquecido, mas a sua temperatura de saída está próxima da temperatura final do vapor sobreaquecido.



15.1.1 Disposição das Superfícies

O fluxo de vapor através do reaquecedor é de cerca de 90% do fluxo de vapor principal. A resistência ao fluxo no superaquecedor pode ser até 10% da pressão de saída do superaquecedor, enquanto que a do reaquecedor não excede 10% da pressão de entrada do reaquecedor.

Considerações operacionais e os custos requerem que o sobreaquecimento e o reaquecimento sejam realizados em várias etapas. Dependendo de como esses estágios recebem o calor, são classificados em três tipos: convectivos, radiantes, e semi-radiantes. Na Figura 15.3 apresenta-se um arranjo típico de superaquecedores, caracterizando todos os tipos de superaquecedores, numa caldeira de pressão subcrítica.



15.1.1 Disposição das Superfícies

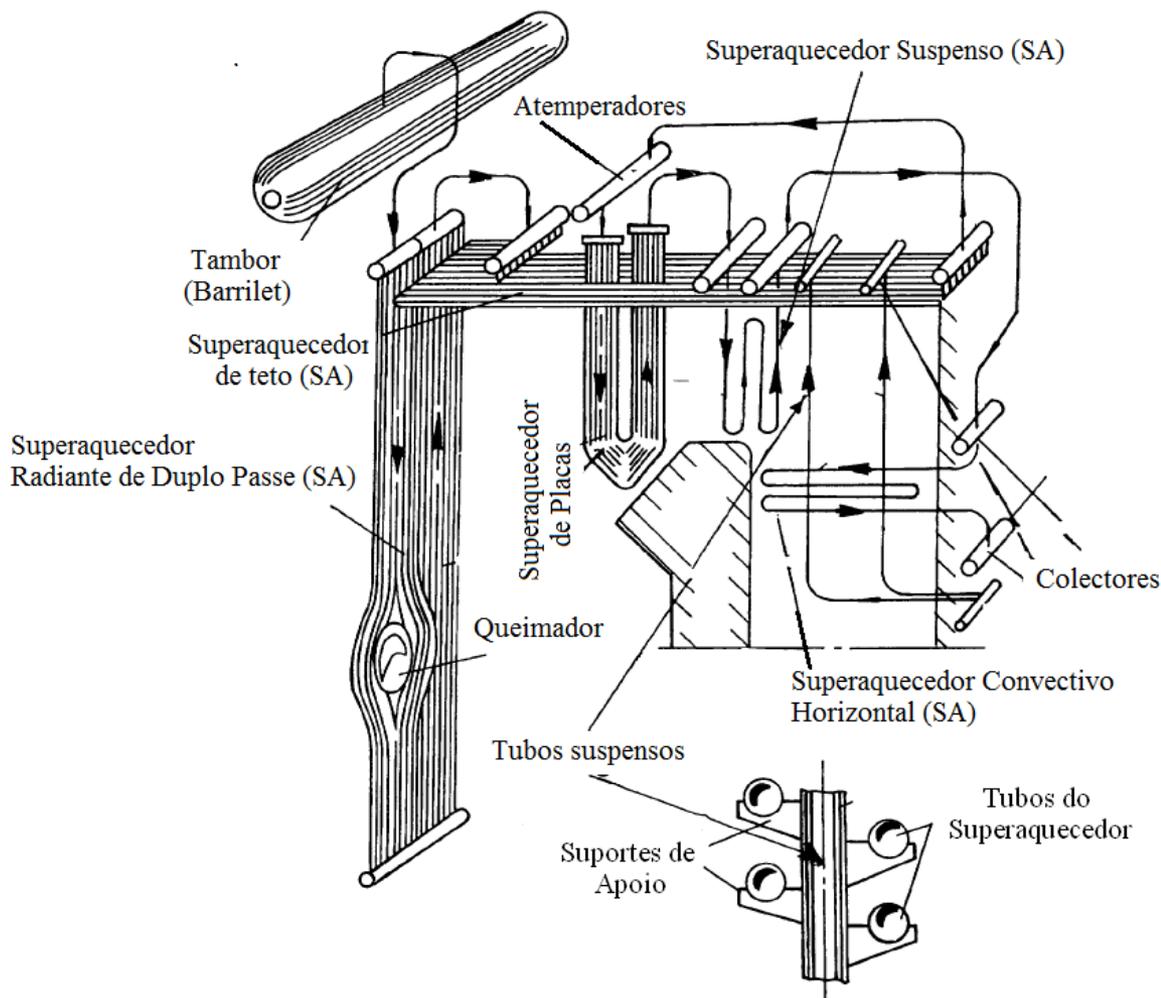


Figura 15.3 Arranjo típico de superaquecedores



15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

Os superaquecedores convectivos são dispostos na parte de trás da passagem ou na secção de convecção da caldeira. Estes são dos tipos vertical ou horizontal, de acordo com a orientação do tubo. O vertical (Figura 15.4) é sempre disposto na conduta horizontal de junção da fornalha com a parte de trás de passagem dos gases. É também chamado de superaquecedor pendular. A concepção mecânica deste tipo de superaquecedor é simples e é facilmente suportado a partir do teto. Estes superaquecedores são menos afectados pela fuligem. No entanto, são de difícil dreno da água aquando da paragem da caldeira.



15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

Do barrilete

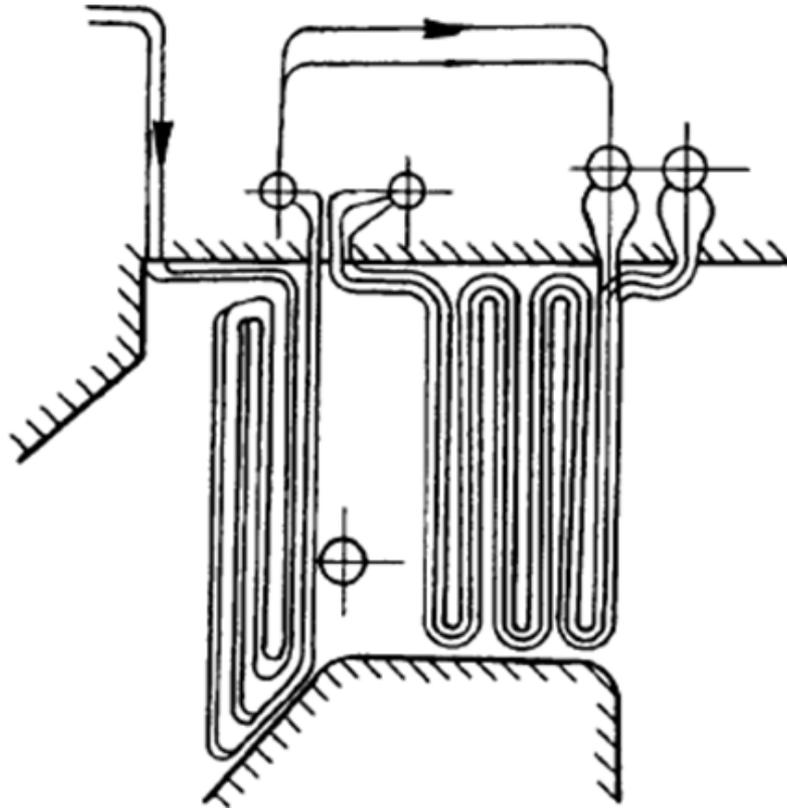


Figura 15.4 Superaquecedor Convectivo Pendular ou Vertical

15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

Na disposição horizontal (Figura 15.5) os tubos do superaquecedor descrevem curvas horizontalmente a partir de um conjunto de colectores. É relativamente fácil drenar a água de condensação a partir de superaquecedores horizontais. No tipo convencional de caldeiras (de duas passagens do tipo Π) os superaquecedores horizontais estão localizados na passagem traseira, enquanto nas caldeiras do tipo pilha (ou torre), os superaquecedores horizontais podem ser utilizadas na fornalha (Figura 15.6). Os superaquecedores convectivos são feitos de filas paralelas de tubos (Figura 15.5). Que têm colectores nas duas extremidades. Estes tubos são dispostos na configuração “em linha”. O diâmetro externo dos tubos encontra-se no intervalo de 32-51 mm, e a espessura dos mesmos na gama de 3-7 mm. O passo transversal (S_1/d) situa-se entre 2 e 3, enquanto o passo longitudinal (S_2/d) depende do raio de curvatura dos tubos.



15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

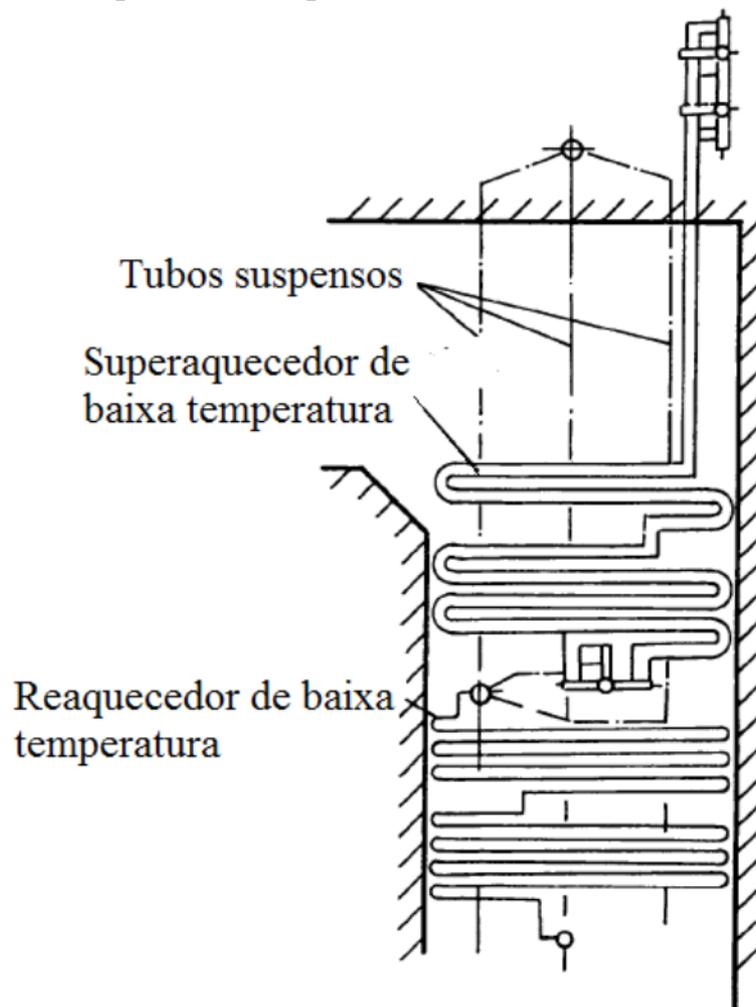
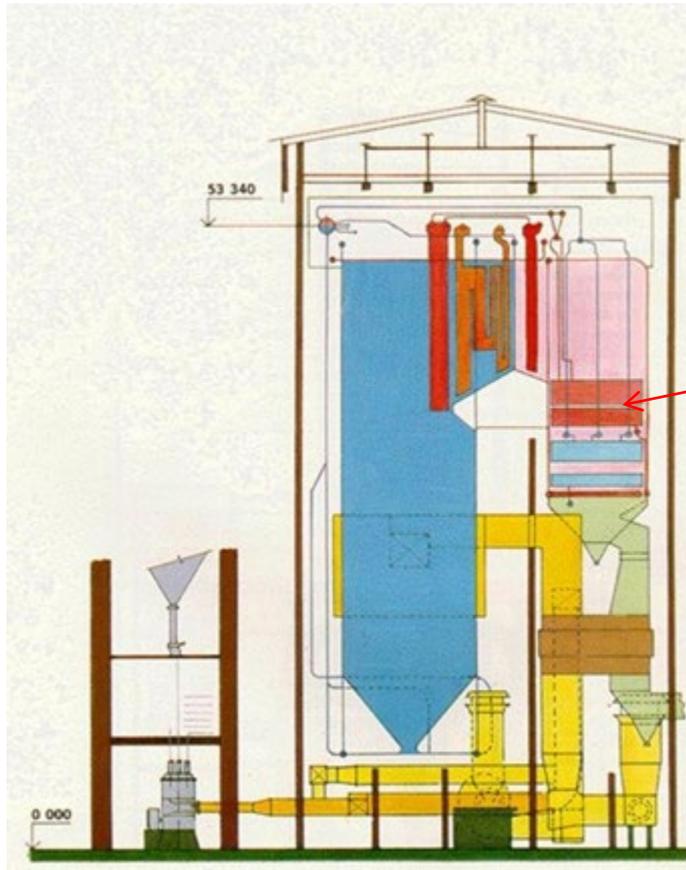


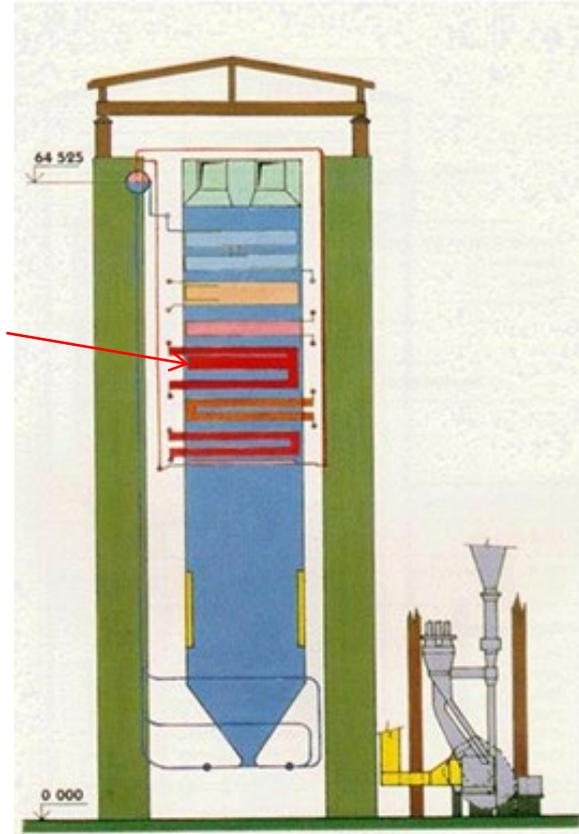
Figura 15.5 Superaquecedor Convectivo Horizontal



15.1.1 a) Superaquecedores convectivos



Superaquecedores horizontais



Caldeira de duas passagens (Tipo II)

Caldeira do tipo pilha (ou torre),

Figura 15.6

15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

Para os tubos dos superaquecedores mais comuns usa-se $S_2/d = 1,6-2,5$. A fim de se atingir a velocidade desejada do vapor no interior dos tubos, estes podem ser dispostos em vários conjuntos paralelos. A velocidade desejada do vapor depende do tipo de superaquecedor e da gama de pressão de funcionamento. Alguns valores recomendados da velocidade do vapor nos tubos dos superaquecedores e reauecedores são apresentados na Tabela 15.1.

Quando a temperatura do gás na entrada dos superaquecedores é de cerca de $1000\text{ }^\circ\text{C}$, as cinzas no gás de combustão ainda são moles, assim, a parte frontal ou as linhas principais dos tubos dos superaquecedores são espaçadas para evitar a escorificação (espaçamento transversal ($S_1/d \geq 4,5$) e o espaçamento longitudinal ($S_2/d \geq 3.$)).



15.1.1 a) Superaquecedores convectivos

Tabela 15.1 Fluxos típicos de vapor nos superaquecedores e nos reaquecedores

Tipo de Superaquecedor	Pressão de trabalho	Fluxo por área (kg/m²s)
Superaquecedor Convectivo	Média Pressão	250 - 400
	Alta Pressão	500 - 1000
Superaquecedor de Painéis		800 - 1000
Superaquecedor de Parede		1000 - 1500
Reaquecedor		250 - 400



15.1.1 b) Superaquecedores de Painéis

Os Superaquecedores de Painéis são compostos por painéis planos de tubos e encontram-se localizados na parte superior da fornalha, (Figura 15.7), onde a temperatura dos gases é elevada. Eles estão, portanto, expostos a condições muito severas de funcionamento. Os tubos nas filas da frente recebem radiação muito alta, bem como uma grande quantidade de poeiras. Se os tubos forem inadequadamente arrefecidos podem facilmente queimar-se. Algumas medidas podem ser tomadas para evitar este perigo potencial. Por exemplo, os tubos ultraperiféricos dos painéis, podem ser construídos mais curtos do que os outros, de modo a terem um fluxo de massa de vapor mais elevado que os outros tubos e portanto, melhor de refrigeração. Em alguns casos, são utilizados materiais de elevada qualidade nos tubos mais externos.



15.1.1 b) Superaquecedores de Painéis



Figura 15.7 Superaquecedores de painéis



15.1.1 b) Superaquecedores de Painéis

Na Figura 15.8 apresentam-se alguns arranjos típicos de superaquecedores de painéis. O diâmetro exterior dos tubos do superaquecedor de painéis está compreendido no intervalo de 32-42 mm. Os painéis são geralmente espaçadas ($S_1 = 500 - 900$ mm), mas os tubos no interior do painel estão pouco espaçados ($S_2/d = 1,1$). O número de tubos paralelos num painel está geralmente na gama de 15-35, dependendo da velocidade projectada do vapor.



15.1.1 b) Superaquecedores de Painéis



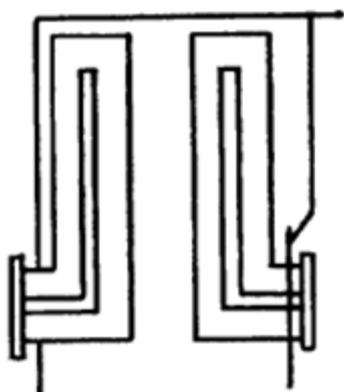
Tipo traseiro



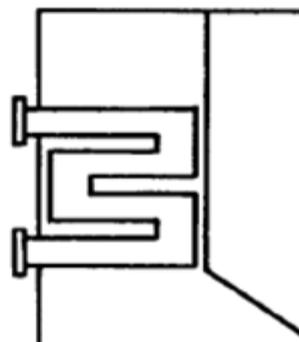
Tipo Primário



Tipo Frontal



Em forma de L



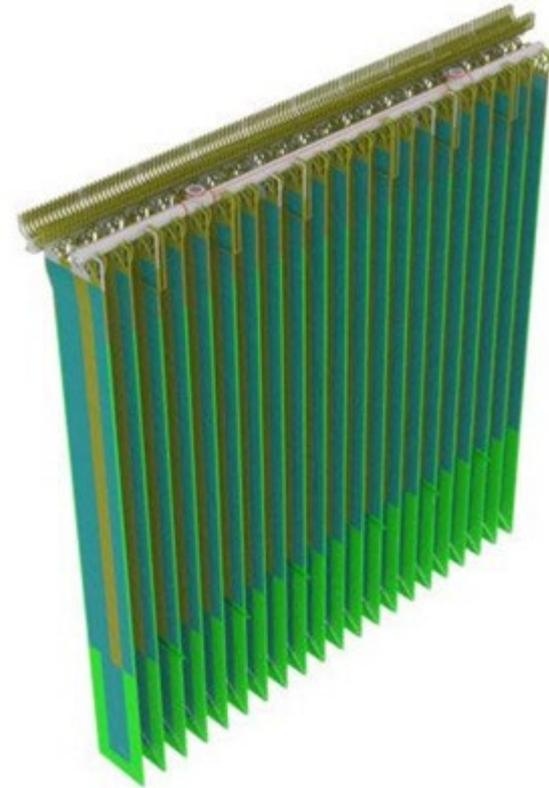
Horizontal

Figura 15.8 Diferentes Arranjos de Superaquecedores de painéis



15.1.1 c) Superaquecedores Pendulares

Os superaquecedores ou reaquecedores do tipo Pendular (Figura 15.4) são dispostos na conduta de passagem horizontal que liga a fornalha à parte traseira da caldeira. Estes são também feitos em forma de painéis, mas de forma mais estreita do que os superaquecedores de painéis. Um aquecedor Pendular recebe calor por convecção e algum por radiação.



15.1.1 d) Reaquecedor

A queda de pressão no interior dos tubos do reaquecedor tem um importante efeito adverso sobre o fluxo de calor na turbina. Por exemplo, o fluxo de calor de uma turbina pode aumentar até 0,2-0,3% por cada 0,098 Mpa de aumento na queda de pressão no sistema dos tubos do reaquecedor. Assim, a queda de pressão dos tubos do reaquecedor deve ser mantida o mais baixo quanto possível. Isso requer o uso de tubos de grande diâmetro (42-60 mm). Como o coeficiente de transferência de calor do reaquecedor de vapor de baixa pressão é baixo, um sobreaquecimento das paredes dos tubos pode facilmente ocorrer. Para manter a temperatura da parede do tubo dentro de limites seguros de funcionamento, necessita-se de aumentar a velocidade do vapor ou reduzir a temperatura local do gás.



15.1.1 d) Reaquecedor

Quanto maior for a velocidade do vapor maior será a queda de pressão. Assim, os reaquecedores estão localizados em regiões relativamente frias.

Os reaquecedores verticais encontram-se localizados na conduta horizontal, enquanto os reaquecedores horizontais encontram-se na passagem de retorno. Estes modelos são idênticos aos dos superaquecedores pendulares (Figuras 15.4, 15.5). As velocidades típicas de fluxo nos reaquecedores encontram-se apresentadas na Tabela 15.1



15.1.2 Configuração dos superaquecedores e reaquecedores

Os bancos de superaquecedores e reaquecedores estão dispostos tendo em vista o seguinte:

- Atendimento dos parâmetros do vapor
- A temperatura do vapor seja facilmente controlada
- Não haja superaquecimento dos tubos
- O projecto seja é económico



15.1.2 a) Superaquecedor

A temperatura do vapor sobreaquecido de uma caldeira de baixa pressão não é tão alta como a de uma caldeira de alta pressão. Portanto, nessas caldeiras os superaquecedores estão dispostos na secção de convecção, onde a temperatura do gás não excede 700-800 °C. Numa caldeira de média pressão, a temperatura do vapor varia entre 450-480 °C. O calor radiante libertado na fornalha é apenas suficiente para a evaporação da água. Assim, só se pode usar superaquecedores convectivos. Este tipo de superaquecedor é dividido em dois estágios a saber: de baixa e de alta temperaturas ao longo da direcção do fluxo de vapor.



15.1.2 a) Superaquecedor

A secção de baixa temperatura está disposta por trás da secção de alta temperatura, ao longo do percurso do fluxo dos produtos de combustão. É adoptado um arranjo de permutador de calor em fluxos contracorrente, para evitar a necessidade de materiais dispendiosos. A secção de alta temperatura está disposta na região de temperatura superior do gás que se encontra dividida em dois estágios. O primeiro estágio encontra-se em ambos os lados da conduta dos gases de escape com um arranjo de fluxo em contracorrente. O segundo estágio está disposto no centro da conduta dos gases de escape num arranjo de fluxos paralelos.



15.1.2 a) Superaquecedor

Os superaquecedores são muitas vezes divididos em mais de um estágio. No entanto, o aumento da entalpia do vapor em cada estágio não deve exceder 250-420 kJ/kg. Para caldeiras de média pressão, o aumento de entalpia não deve exceder 280 kJ/kg. Em caldeiras de alta pressão, o valor não deve ser superior a 170 kJ/kg. O aumento da entalpia no último estágio deverá facilitar um bom controle da temperatura do vapor.

Um colector localizado entre dois estágios facilita uma melhor mistura do vapor que sai dos diferentes tubos paralelos. De forma a reduzir que a absorção de calor não seja uniforme são usados arranjos especiais de colectores (Figura 15.9).



15.1.2 a) Superaquecedor

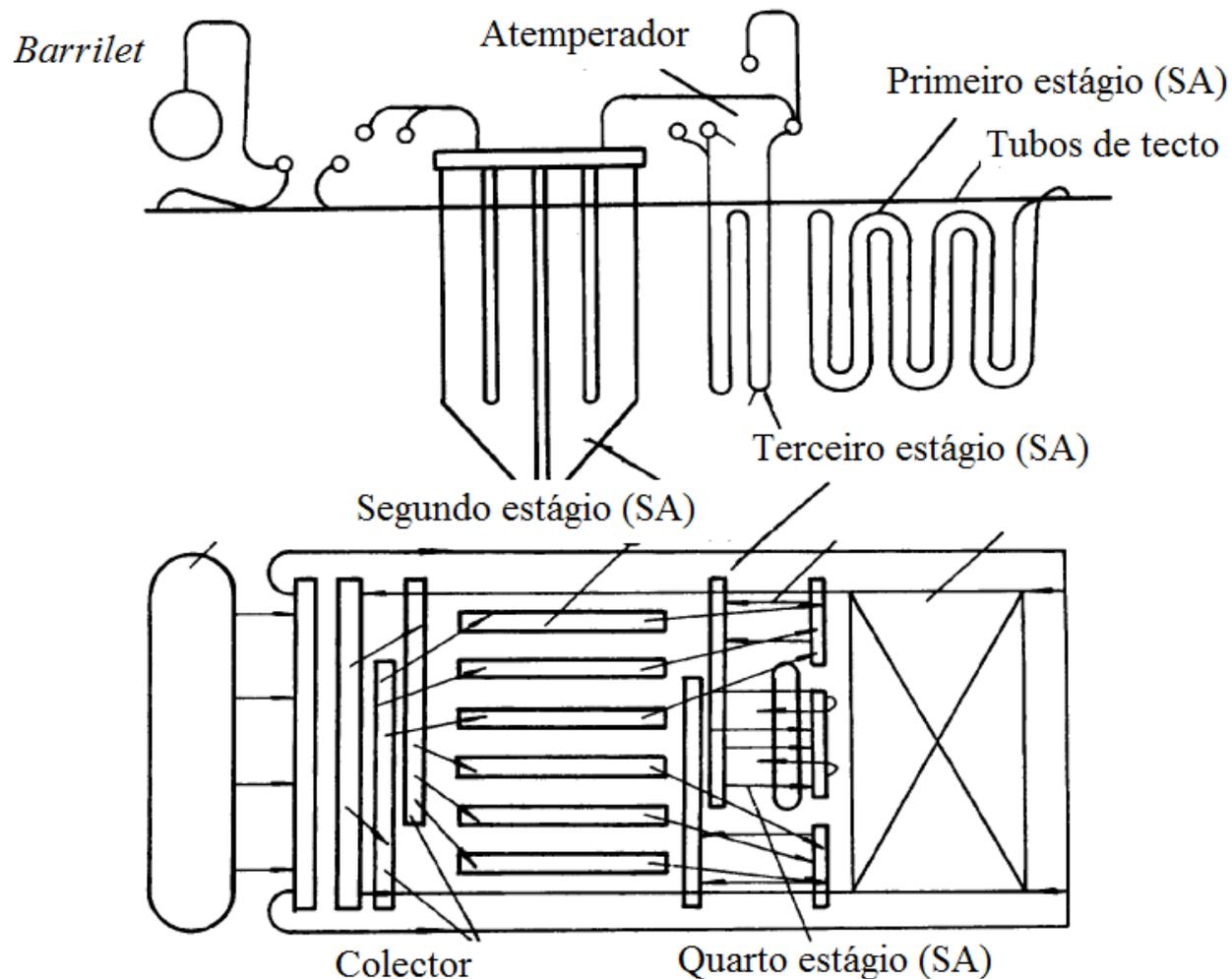


Figura 15.9 Arranjos de Superaquecedores para Caldeiras de Alta Pressão



15.1.2 b) Reaquecedores

Os reaquecedores podem ser de único estágio ou de duplo estágio. Num arranjo de único estágio, a resistência ao escoamento é menor e o sistema é mais simples, mas o aquecimento pode não ser uniforme.

Durante o período de arranque da caldeira nenhum vapor flui através do reaquecedor, o que cria um problema de especial atenção. Se o reaquecedor estiver localizado numa conduta de gás, onde a temperatura do gás está abaixo de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ e se for usado aço apropriado, pode-se permitir que o reaquecedor seja aquecido, sem que vapor flua através dele num curto período, durante o arranque da caldeira. No entanto, se o reaquecedor estiver localizado numa região de alta temperatura do gás, é necessário um sistema fiável de derivação.



15.2 Controle da Temperatura nos Superaquecedores e nos Reaquecedores

O controle e o ajuste são dois conceitos semelhantes, mas estes implicam duas funções diferentes. O ajustamento refere-se a alterações físicas no equipamento da caldeira até atingir uma temperatura do vapor especificada ou um valor de absorção de calor. A modificação do comprimento do tubo ou a inserção de um orifício no interior dos tubos do reaquecedor são exemplos de ajustamentos. Estas alterações não podem ser feitas enquanto a caldeira está em funcionamento.

Por outro lado o controlo, pode ser efectuado através de mudanças na operação da caldeira. Variar a inclinação dos queimadores e injectar água no vapor são alguns dos meios utilizados para controlar a temperatura do vapor.



15.2 Controle da Temperatura nos Superaquecedores e nos Reaquecedores

A manutenção da temperatura do vapor ao nível desejado é vital para a eficiente operação de uma usina de geração de energia. Por exemplo, acima de 124 bar de pressão, 20 °C de alteração na temperatura do vapor pode provocar uma variação de 1% no fluxo de calor (Stultz & Kitto, 1992, pp 18-13). Assim, num gerador de vapor moderno, faz-se um grande esforço para manter a temperatura do vapor numa tolerância de ± 6 °C.

O consumo de combustível pode controlar o caudal e a pressão do vapor, mas não pode influenciar directamente na temperatura do mesmo. Um certo número de parâmetros de operação e a concepção básica das superfícies de aquecimento afectam a temperatura do vapor.



15.2.1 Controle da Temperatura do Vapor

A temperatura do vapor ao sair do superaquecedor ou reaquecedor depende de uma série de parâmetros operacionais tais como: a carga da caldeira, o excesso de ar, a temperatura da água de alimentação, as características do combustível, etc . A Tabela 15.2 mostra como alterando os parâmetros de funcionamento é possível alterar a temperatura do vapor.

Os superaquecedores podem ser de dois tipos: radiante e convectivo. O superaquecedor radiante está localizado no interior da fornalha. Então, ele absorve a maioria do calor a partir da radiação de calor da fornalha. O superaquecedor convectivo situa-se a jusante da secção de convecção da fornalha. A transferência de calor para este superaquecedor é essencialmente por convecção, a partir dos produtos de combustão.

Quando a carga da caldeira aumenta por incremento da queima de combustível, uma maior massa de produtos de combustão é produzida, enquanto a temperatura da fornalha é praticamente inalterada. Como resultado, a transferência de calor por radiação, que é função da temperatura, não se modifica. No entanto, o aumento da massa de gás de combustão aumenta a absorção de calor por convecção no resto da caldeira, aumentando o fluxo de vapor no superaquecedor. Com a absorção de calor do superaquecedor radiante inalterada, o fluxo de vapor, sai do superaquecedor a uma temperatura mais baixa.



15.2.1 Controle da Temperatura do Vapor

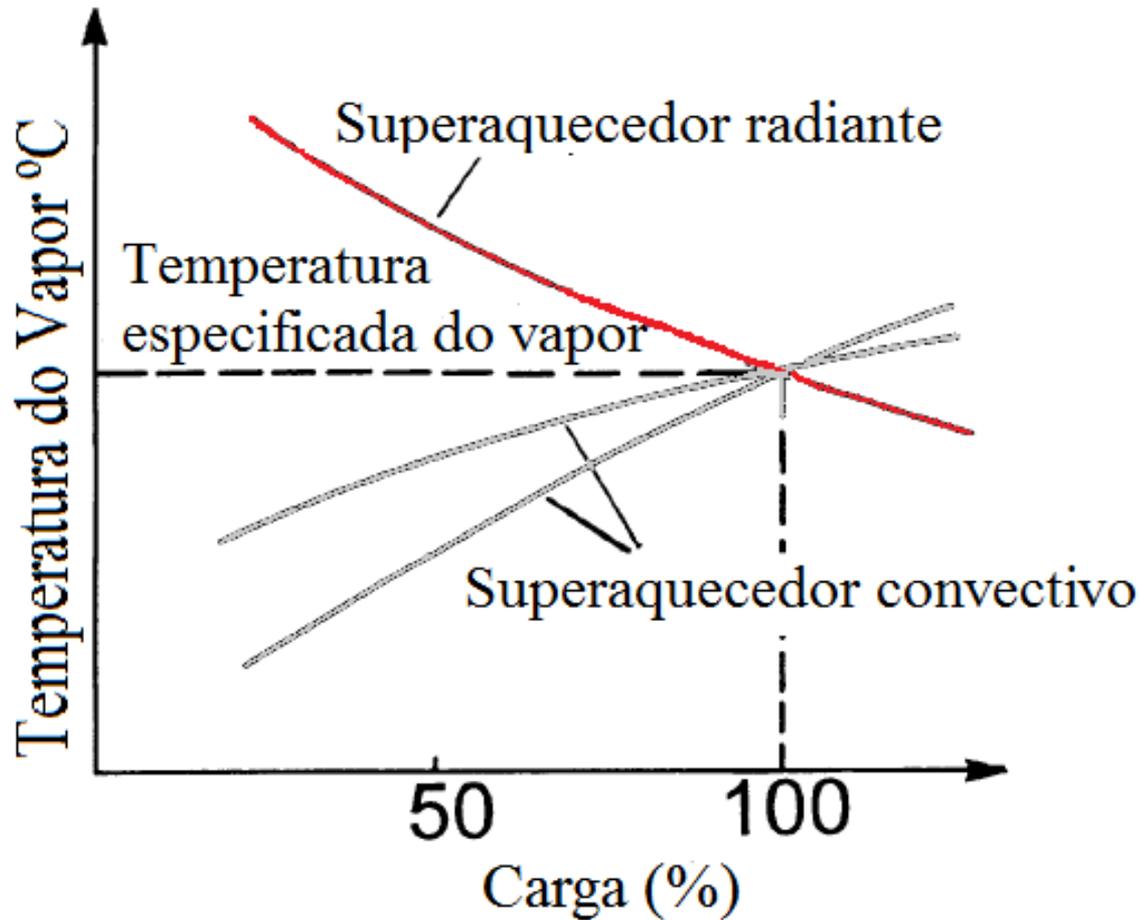
No caso de superaquecedores convectivos, a absorção de calor aumenta directamente com o aumento da massa de gás de combustão. Assim, quando a carga da caldeira sofre um incremento, a temperatura do vapor aumenta, apesar do aumento da massa do fluxo de vapor.

As alterações na temperatura do vapor com o aumento da carga da caldeira ou a taxa de queima são apresentadas na Figura 15.2. Mostra-se que a combinação de superaquecedores radiantes e convectivos pode ajudar a manter a temperatura do vapor constante, mesmo com alterações na carga da caldeira. A absorção de calor radiante na ordem de 40-60% pode dar boas características de temperatura de vapor sob diversas cargas.

O calor absorvido pelo reaquecedor convectivo diminui quando a carga da caldeira diminui. Esta redução é ainda maior quando o reaquecedor está disposto numa zona de muito baixa temperatura do gás. Quando a central térmica funciona a uma pressão fixa, a temperatura do vapor de água na entrada do reaquecedor diminui com a diminuição da carga. Então, mais calor deve ser absorvido pelo reaquecedor para manter a temperatura de saída do vapor no nível do projectado. Para ajudar a resolver este problema pode ser utilizada a operação de pressão variável.



15.2.1 Controle da Temperatura do Vapor



15.2.1 Controle da Temperatura do Vapor

Tabela 15.2 Comparação entre aquecedores de ar de placa rotativa e de placa estacionária

Variação dos parâmetros de operação	Alterações resultantes na temperatura do vapor (°C)
Carga na caldeira $\pm 10\%$	± 10
Excesso de ar na fornalha $\pm 10\%$	$\pm(10-20)$
Temperatura da água de alimentação $\pm 10^\circ\text{C}$	$\pm(4-5)$
Fracção da humidade no carvão $\pm 1\%$	$\pm 1,5$
Fracção das cinzas no carvão $\pm 10\%$	± 5
Sopro de fuligem	Aumenta devido à limpeza das superfícies dos superaquecedores, mas diminui devido à limpeza das superfícies a montante.
Uso de vapor saturado nos equipamentos auxiliares	Aumenta se o fluxo de vapor principal for mantido pelo aumento da taxa de queima



15.2.2 Métodos para o controle da temperatura do vapor

A temperatura do vapor pode ser controlada pelas condições no interior ou no exterior dos tubos. Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens.

Algumas técnicas vulgarmente utilizadas são apresentadas na Tabela 15.3. Para caldeiras com reaquecedores uma combinação destes dois métodos é normalmente utilizada.

Os métodos que geralmente se utilizam são:

- Aquecedores do tipo Spray;
- Trocadores de calor do tipo vapor-vapor;
- Aquecedores do tipo superfície;
- By-pass dos produtos de combustão;
- Variação do ângulo de inclinação dos queimadores.



15.2.2 Métodos para o controle da temperatura do vapor

Tabela 15.3 Técnicas para o controle da temperatura do vapor

Meio	Métodos de Controle	Sem Reaquecedor	Caldeiras com Reaquecedor				
		Controle do Superaquecedor	Controle do Superaquecedor	Controle da temperatura do reaquecedor			
				Antracite	Betuminoso	Lenhite	Óleo ou Gás
Lado do vapor	Atemperador do tipo superfície	X					
	Atemperador do tipo spray	X	X	X		X	
	Trocador de calor do tipo vapor-vapor			X		X	
Lado do Gás	By Pass do Gás			X	X		
	Recirculação do gás				X		X
	Inclinação do queimador	X	X				



15.2.2 a) Atemperador do tipo *spray*

Num atemperador do tipo *spray*, água pura de alta qualidade é injetada no vapor superaquecido para esfriá-lo. Um desenho típico é apresentado na Figura 15.10. Para reduzir a entalpia do vapor em cerca 60-85 kJ/kg numa caldeira de pressão intermédia, a quantidade de água necessária a injectar é de 3-5% do fluxo de vapor principal.

O atemperador do tipo *spray* é geralmente disposto entre duas fases do superaquecedor.

É necessária água de alta qualidade para a pulverização pois quaisquer depósitos prejudicariam o superaquecedor. O condensado do aquecedor de água de alimentação é uma boa fonte desta água. Para as instalações em que a qualidade da água de alimentação não é muito boa, um sistema de auto-geração de condensado e um atemperador pode ser usado. Neste caso vapor parcialmente saturado é condensado através da água de alimentação e em seguida, o condensado é pulverizado para dentro do atemperador para controlar a temperatura do vapor.



15.2.2 a) Atemperador do tipo *spray*

Na concepção de um atemperador deve-se garantir-se que:

- a) a qualidade de atomização seja uniforme, e
- b) o comprimento da secção de atomização seja suficientemente longa para proteger a linha de vapor de choque térmico.

Se o atemperador for do tipo de bico, tipo turbulento, ou do tipo multi-bico, atenção especial deve ser dada à vibração causada pelo vórtice de fluxo de vapor.

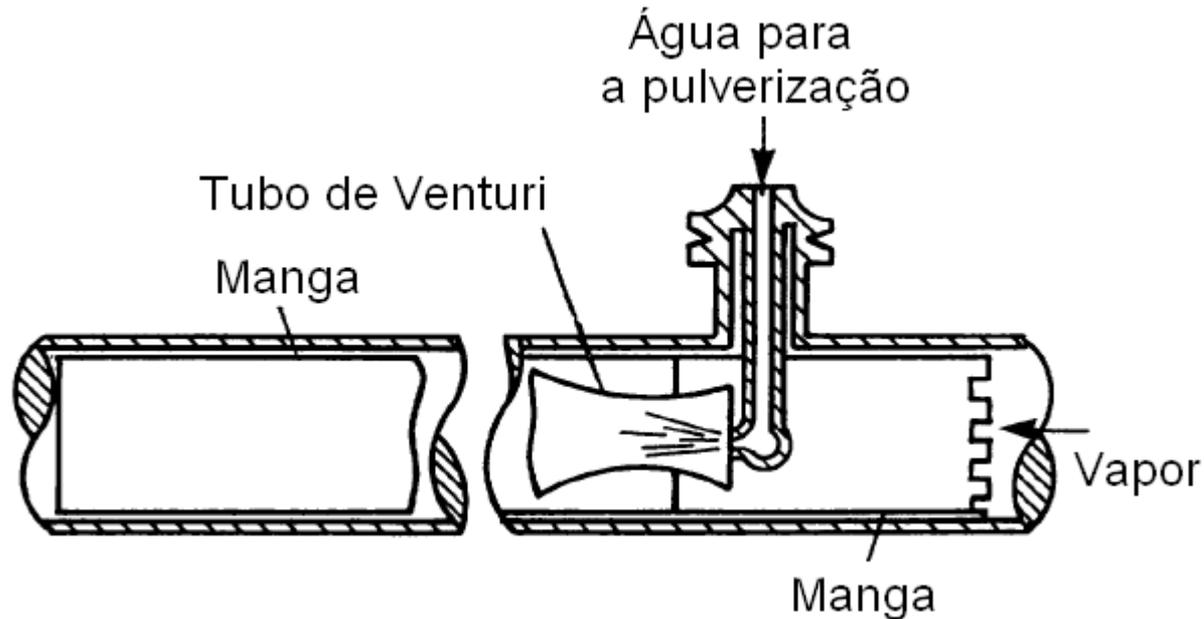


Figura 15.10 Atemperador do tipo Spray



15.2 b) Aquecedor do tipo trocador de calor vapor-vapor

Num permutador de calor de vapor-vapor (Figura 15.11), o vapor sobreaquecido flui através de uma série de pequenos tubos paralelos e o vapor reaquecido flui através dos tubos de maior dimensão da carcaça por fora daqueles. A temperatura do vapor de água sobreaquecido, pode ser ajustada através da variação do fluxo do vapor de reaquecimento. Um permutador de calor de vapor-vapor é o mais adequado para caldeiras de alta capacidade em que a superfície de calor radiante ocupa uma fracção maior da superfície total. Numa caldeira dessas, a temperatura do vapor sobreaquecido aumenta com a diminuição da carga. O vapor reaquecido é aquecido por um excesso de calor do vapor de água sobreaquecido. A principal desvantagem desta situação é que a concepção é muito complicada e não é um arranjo conveniente.



15.2 b) Atemperador do tipo trocador de calor vapor-vapor

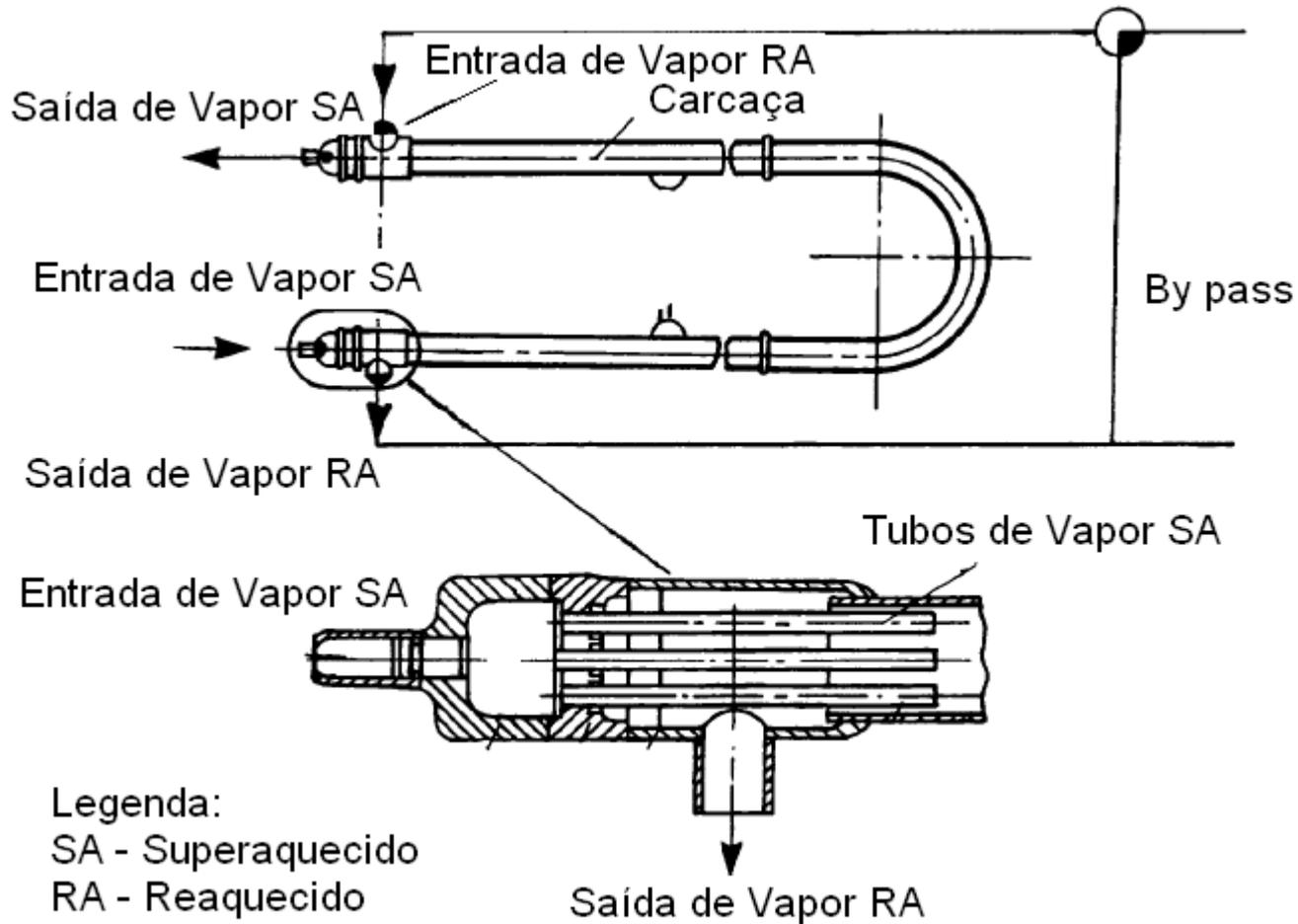


Figura 15.11 Atemperador do tipo termopermutador vapor-vapor



15.2 c) Atemperador do tipo superfície

A atemperador do tipo superfície é um permutador de calor tubular. Como a água de refrigeração não entra em contacto com o vapor de água, não existe qualquer limitação rígida sobre a qualidade da água. A sua concepção é simples, mas ele tem um atraso na resposta de controlo. É geralmente usado em caldeiras de baixa ou média pressão. Este tipo de atemperadores podem ser instalados na entrada do superaquecedor ou entre as duas secções do superaquecedor. A última disposição é hoje a mais usada. A água de arrefecimento é retirada do economizador. Ao alterar-se a quantidade de água de arrefecimento, a absorção de calor varia e portanto, a temperatura do vapor pode ser controlada. O atemperador do tipo superfície pode ser feito de um tubo em forma de U (Figura 15.12), ou de paredes de tubo duplo. Um atemperador de tubo em forma de U, disposto entre duas partes do superaquecedor, geralmente não funciona bem, devido à ruptura do tubo em U causada pela fadiga térmica.



15.2 c) Atemperador do tipo superfície

Algumas das medidas tomadas para evitar que o tubo chegue a ruptura consistem em:

- 1) Limitar o fluxo mínimo de água de refrigeração, variar a velocidade de fluxo com estabilidade (grandes variações não são permitidas);
- 2) Aumentar o raio de curva do tubo em forma de U;
- 3) Aumentar a temperatura da água de alimentação.

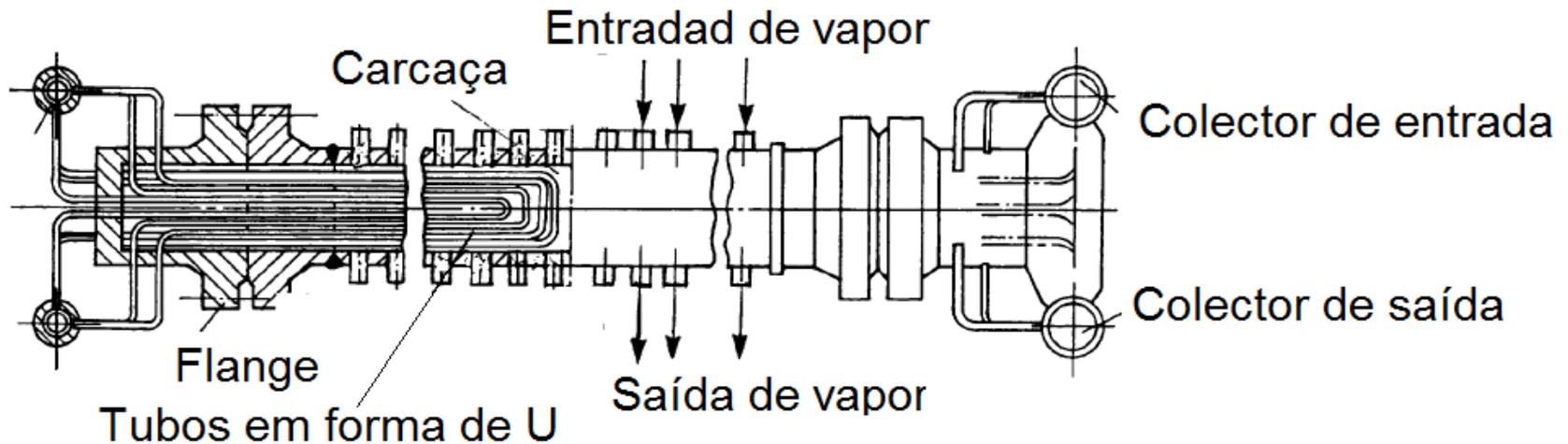


Figura 15.12 Atemperador do tipo superfície



15.2 c) Atemperador do tipo superfície

O atemperador de tubo com paredes duplas compreende tubos exterior e interior. A distância entre os tubos exterior e interior é de 3-5 mm. A água entra pelos tubos interiores e sai pelo anulo. As principais características deste tipo atemperador são as seguintes:

- 1) O tubos interior e exterior podem expandir livremente. Portanto, não há stress térmico. Isto evita a ruptura do tubo, o que é comum nos atemperadores em forma de U.
- 2) Não há limite para a quantidade da água de refrigeração utilizada. Assim, o intervalo de controle da temperatura do vapor é largo.
- 3) Partes dos tubos da parede dupla são dispostos num padrão cruzado, com tubos para a esquerda e para a direita, o que confere características de controlo de temperatura uniforme, e permite uma concepção simplificada dos tubos de saída.
- 4) Os tubos internos não transferem calor directamente. Assim a área de transferência de calor e de resistência ao fluxo é maior do que as dos tubos em forma de U.

Os atemperadores de paredes duplas são geralmente utilizados em caldeiras de baixa e de média pressão, em que os sistemas do superaquecedor são relativamente simples. No entanto, um problema importante é que o vapor pode corroer verticalmente os tubos exteriores.



15.2 d) By-pass dos produtos de combustão

Este método controla a temperatura do vapor de água através da variação da taxa de fluxo de gás de combustão ao longo do superaquecedor (Figura 15.13). Os coeficientes de transferência de calor alteram-se com a mudança da velocidade dos produtos de combustão, o que por sua vez altera a absorção de calor pelo superaquecedor.

O projecto de um sistema bypass dos produtos de combustão é simples e é fácil de se operar, mas a resposta ao controle é lenta. O Bypass dos gases é eficaz no intervalo de 0-40% da abertura do abafador. Para evitar deformações do abafador, ele deve ser disposto, onde a temperatura do gás esteja abaixo de 400-500 °C. Porém, atenção especial deve ser dada à possível erosão. A condução de gás deve ser estanque, para tal recomenda-se uma parede do tipo membrana.



15.2 d) By-pass dos produtos de combustão

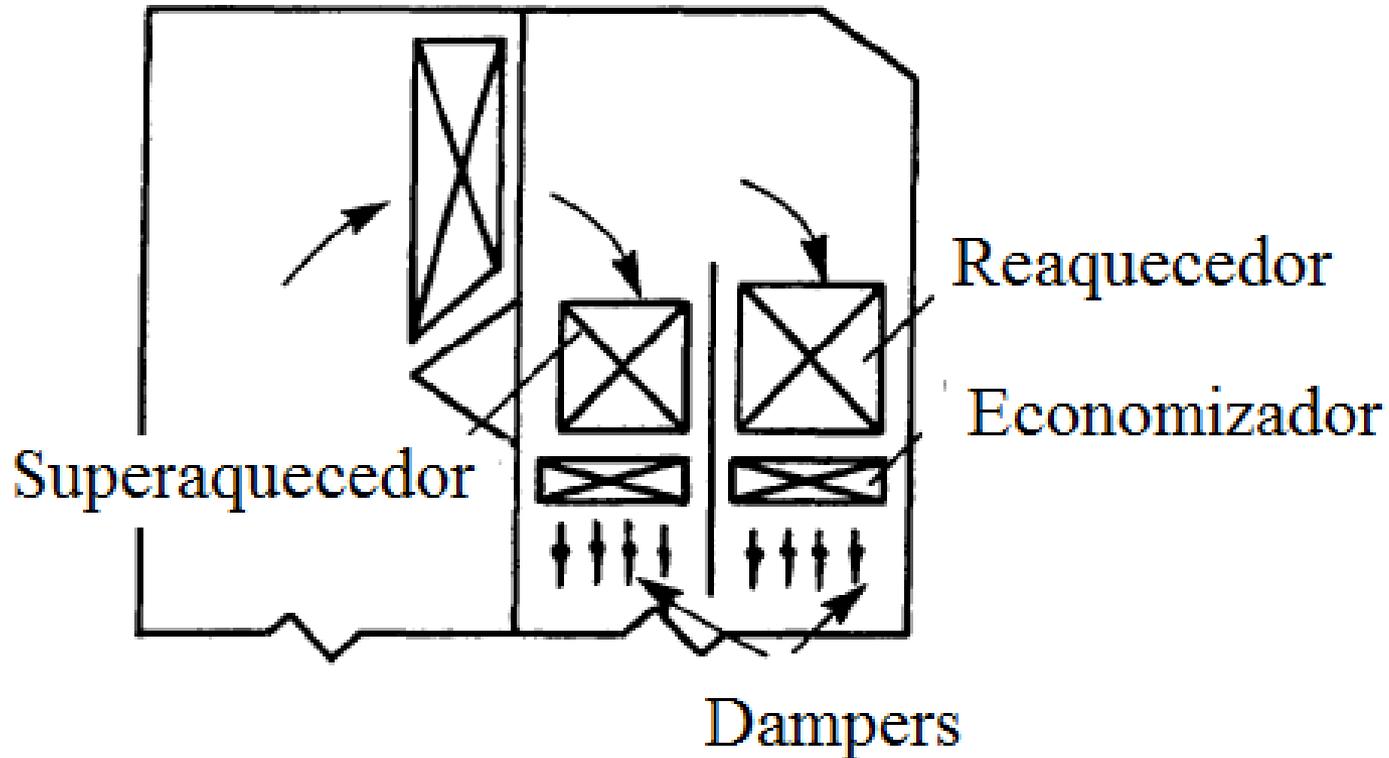


Figura 15.13 Bypass dos produtos de combustão

15.2 e) Variação do ângulo de inclinação dos queimadores

O controle da inclinação dos queimadores é normalmente usado em caldeiras de queima tangencial equipadas com queimadores de inclinação vertical. Ao orientar os bocais dos queimadores para cima ou para baixo, a localização da zona de combustão principal pode ser deslocada e, portanto, a temperatura de saída do gás da fornalha pode ser alterada.

Quando o queimador se inclina para cima ou para baixo 20-30°, a temperatura do gás à saída da fornalha varia entre 100-140°C. Este controle é preciso, e não necessita de superfícies de aquecimento adicionais ou consumo adicional de energia.

Para o carvão baixo ponto de fusão de cinzas, a variação da temperatura deve ser limitada para evitar depósitos de cinza nas paredes.



15.3 Economizador

O economizador pré-aquece a água de alimentação, utilizando o calor residual do gás de combustão. Assim, reduz a temperatura do gás de escape e poupa o combustível. As usinas modernas usam economizadores de tubos de aço. Algumas caldeiras pequenas e antigas ainda usam economizadores de ferro fundido.

Um economizador típico de tubo de aço compreende dois colectores linhas de tubos paralelos que os ligam (Figura 15.14). Se a superfície de aquecimento for grande, em vez de ter um banco de tubos de altura constante, o economizador se divide em várias secções (1-1,5 m de altura de cada) com cabeçalhos intermediários. Um espaço livre de 0,6-0,8 m é proporcionado entre duas secções para permitir o acesso para a manutenção e reparação dos tubos.



15.3 Economizador

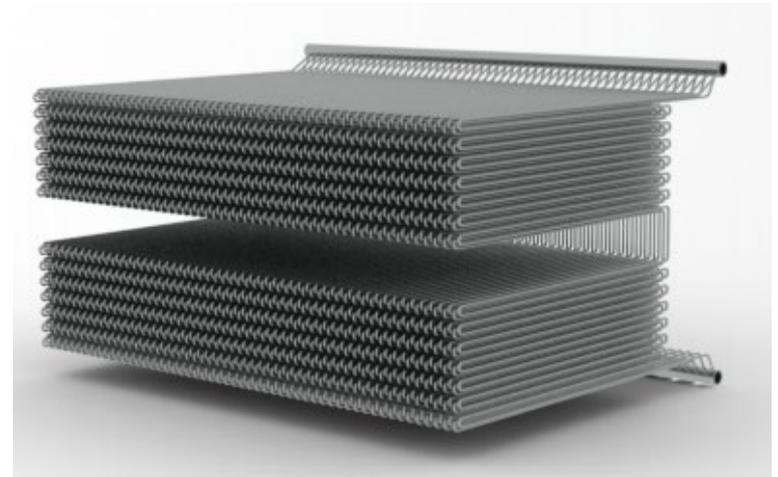
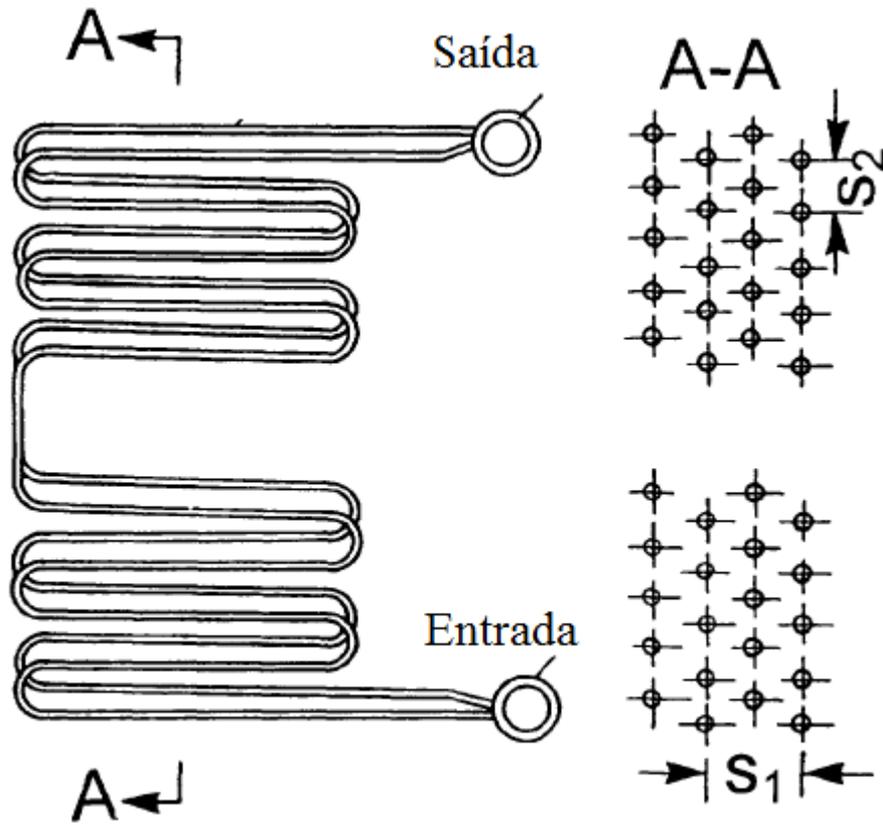


Figura 15.14 Arranjo típico dos tubos de um economizador

15.3 Economizador

O banco de tubos do economizador pode ser longitudinal ou transversal. No arranjo longitudinal (Figura 15.15a) os tubos são normais à parede traseira, enquanto no arranjo transversal são paralelos à parede traseira. A largura da parte traseira de passagem é maior do que o seu comprimento. Como resultado, o comprimento dos tubos paralelos num arranjo longitudinal é mais curto e há mais tubos em comparação com um colector num arranjo transversal. Assim, a velocidade da água através dos tubos é baixa, o que resulta numa menor queda de pressão. O gás de combustão que flui ao longo dos tubos tende a carregar mais cinzas para a extremidade mais distante dos tubos devido à força centrífuga. Assim, uma extremidade dos tubos está sujeita a um maior grau de erosão do que a outra, o que requer a substituição completa do banco de tubos devido a danos por erosão.



15.3 Economizador

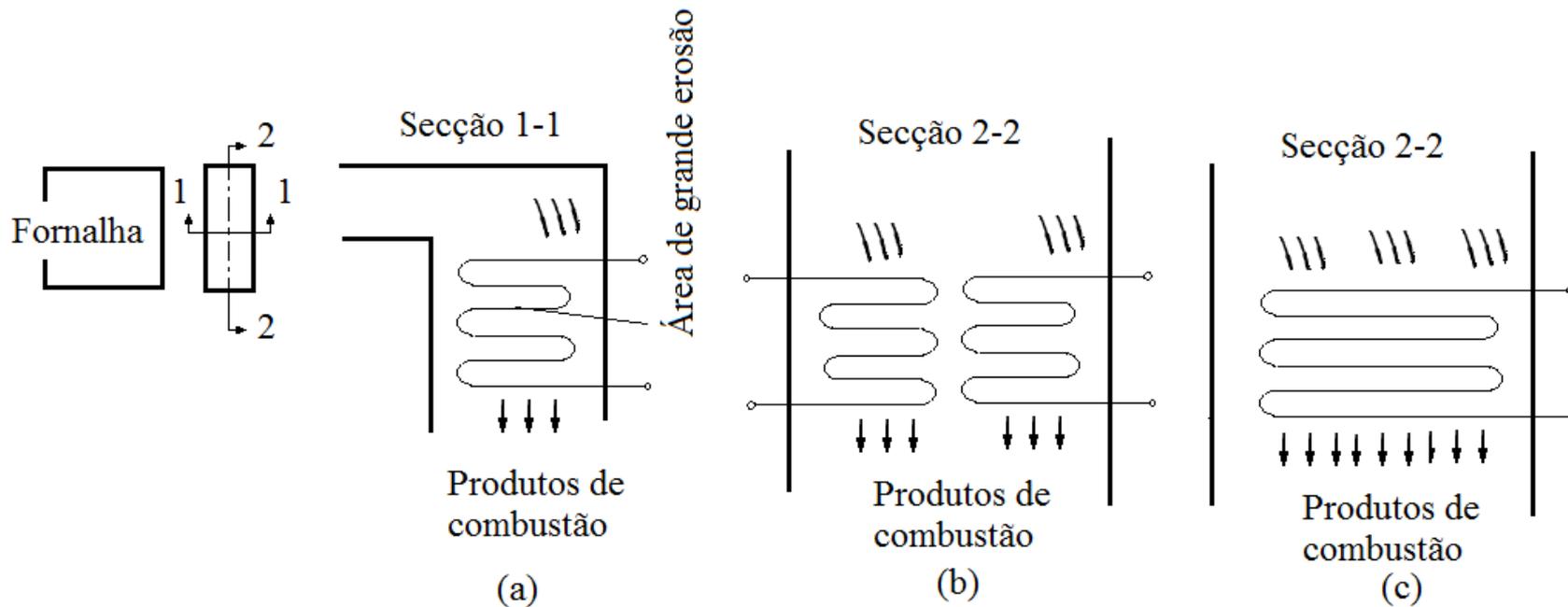


Figura 15.15 Arranjo típico dos tubos de um economizador

15.3 Economizador

Num arranjo transversal (Figura 15.15b e 15.15c), em que os tubos são paralelos à parede traseira, apenas os tubos mais distantes da parede traseira estão sujeitos à maior concentração de poeiras e, portanto, a maior erosão. Assim, os reparos envolvem substituição de tubos só afectadas. A resistência ao fluxo da água num arranjo transversal é, no entanto, elevada, porque esta disposição utiliza menor número de longos tubos paralelos.

Para tornar os economizadores, rectangular (Figura 15.16a) ou trapezoidal (Figura 15.16b) compactos são soldadas alhetas nos tubos do economizador. Tais alhetas podem reduzir o tamanho do economizador em 20-25%.



15.3 Economizador

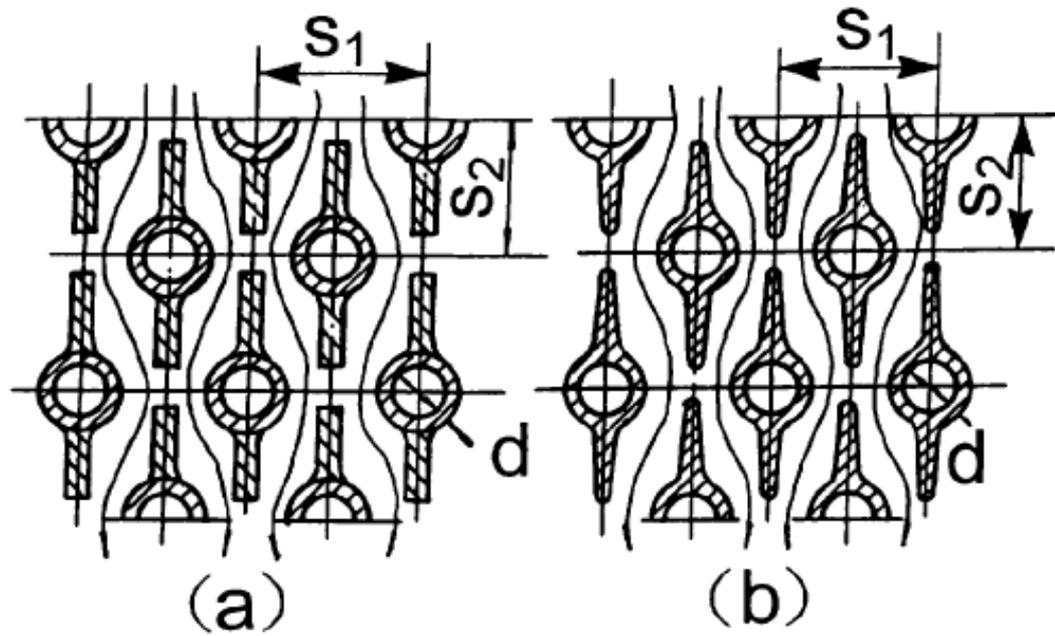


Figura 15.16 Superfícies estendidas dos economizadores. (a) alhetas rectangulares, (b) alhetas cónicas



15.3 Economizador

O diâmetro externo típico dos tubos do economizador é de 25-38 mm. Dependendo da pressão da caldeira, os tubos têm 3-5 mm de espessura. Num arranjo escalonado (Figura 15.10) a razão entre o afastamento lateral e o diâmetro (S_1/d) é escolhida na gama de 2,5-3,0, dependendo da velocidade do gás de combustão. A razão do espaçamento vertical e o diâmetros (S_2/d), é ditada pelo raio de curvatura do tubo de segurança e encontra-se geralmente no intervalo de 1,5-2,0. A velocidade do fluxo de água é escolhida no intervalo de 600-800 kg/m²s. A resistência ao fluxo torna-se muito grande, se a velocidade for elevada. A velocidade da água nos tubos usados como tubo de suspensão deve ser maior do que a dos outros para evitar o fluxo de água reverso. A resistência lateral de água do economizador não deve exceder 5% da pressão do *barrilet* para caldeiras de alta pressão de 8% para caldeiras de média pressão.



15.3 Economizador

A velocidade do gás num economizador varia de 7 a 13 m/s. Velocidades mais elevadas do gás aumentam a transferência de calor e conservam a superfície de aquecimento, mas conduzem a uma maior erosão dos tubos. Velocidades muito baixas do gás podem conduzir uma baixa transferência de calor e um grande depósito de cinzas sobre os tubos, minimizando o potencial de erosão. A velocidade do gás reduz com o aumento da percentagem de cinzas e com o crescimento da fracção de $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ nas cinzas.

Durante o processo de arranque de uma caldeira o fluxo de água através do economizador é descontínuo. Assim, quando a água de alimentação para, a água do economizador não flui, mas um pouco de água irá evaporar-se devido ao calor transferido dos produtos de combustão. O vapor de água pode depositar-se nas paredes interiores dos tubos ou na parte superior do economizador. Isso pode levar o tubo do economizador a queimar-se. Por conseguinte é necessário proteger o economizador durante o arranque.



15.4 Aquecedor de ar

Um aquecedor de ar pré-aquece o ar de combustão onde é economicamente viável. O pré-aquecimento ajuda no seguinte:

- A inflamar o combustível
- A melhorar a combustão: por exemplo (Clapp, 1991), um aumento de 22 °C do ar de combustão pode melhorar a eficiência da caldeira em 1%
- A secagem do carvão pulverizado no pulverizador
- A reduzir a temperatura do gás de escape e no aumento da eficiência da caldeira

Existem três tipos de aquecedores de ar:

1. Recuperativo (tubular ou tipo de placa);
2. Regenerativo rotativo;
3. Tubo de calor.



15.4 Aquecedor de ar

Em aquecedores de ar recuperativos o calor do gás quente flui para o ar frio através de uma placa ou das paredes dos tubos. Num aquecedor de ar regenerativo o calor flui directamente de um invólucro. O ar frio recebe calor do mesmo invólucro por onde passou o gás quente, quando ele se move para a secção seguinte. Um aquecedor de ar recuperativo não envolve quaisquer partes móveis, mas é muito maior do que o do tipo regenerativo. Por exemplo, o volume da câmara de ar de um aquecedor recuperativo pode chegar a ser até nove vezes superior ao do tipo regenerativo e o seu peso o dobro (Clapp, 1991). Uma das vantagens de um aquecedor de ar do tipo recuperativo é a baixa infiltração do ar na corrente de gás.



15.4 Aquecedor de ar

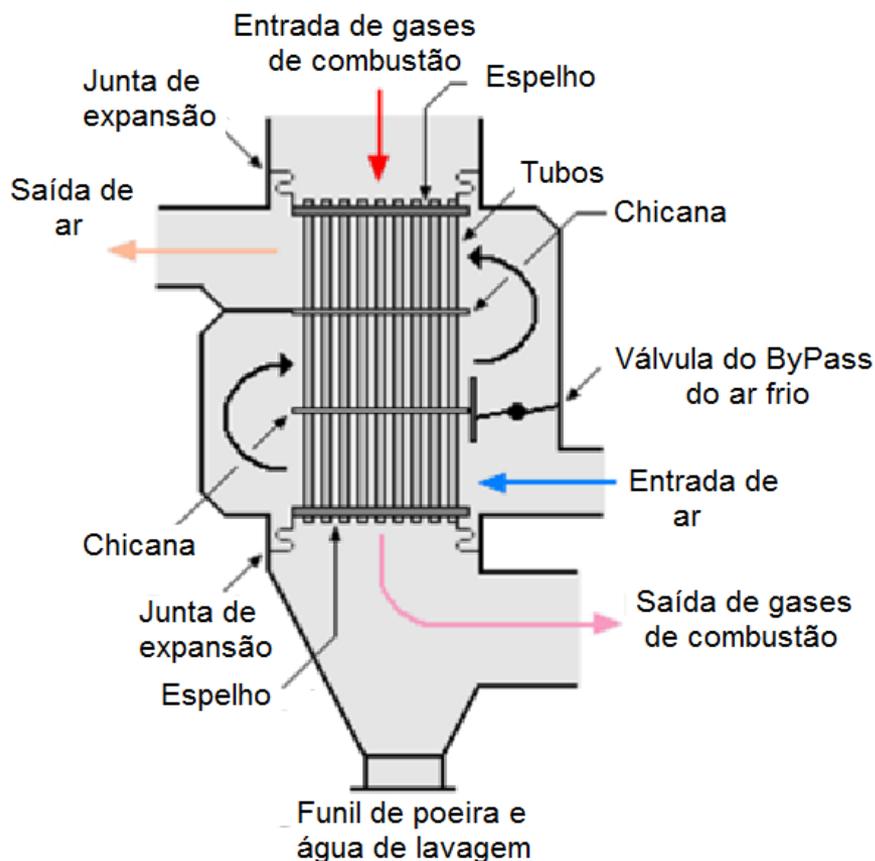


Figura 15.17 Aquecedor de ar tipo recuperativo

15.4.1 Aquecedor Recuperativo Tubular

A construção de um aquecedor de ar recuperativo tubular é apresentada na Figura 15.17. O gás de combustão flui longitudinalmente no tubo e o ar flui transversalmente ao longo do tubo.

Por conveniência construtiva de transporte e de instalação, os aquecedores de ar tubulares são geralmente fabricados em seções. Estas seções são soldadas no local.

O aquecedor de ar tubular é suportado na estrutura da caldeira. Durante o funcionamento, os tubos, a carcaça e a armação da caldeira expandem em diferentes graus, devido à temperatura dos seus diferentes materiais de construção. Então, são instaladas juntas de dilatação feitas de finas folhas de aço entre o tubo e carcaça, e entre o reservatório e a estrutura da caldeira. A junta de dilatação permite que as peças se movam umas em relação às outras, assegurando vedação hermética ao nível das articulações.



15.4.1 Aquecedor Recuperativo Tubular

Num arranjo típico (Figura 15.17) o gás de combustão passa directamente através dos tubos, mas o ar faz várias passagens sobre os tubos. Quanto maior é o número de passagens, mais próximo se encontra do arranjo do fluxo contra-corrente para a situação. Como resultado, a diferença média da temperatura gás - ar, e a velocidade do ar são maiores. Isto reduz a área de superfície para necessária, mas no entanto, um grande número de passagens aumenta a resistência ao fluxo.

A disposição de uma única passagem tem a vantagem de ter uma construção mais simples, maior área de fluxo de ar, e, por conseguinte, mais baixa resistência ao fluxo. No entanto, uma diferença de temperatura média menor e menor velocidade de ar iria necessitar de uma área maior do tubo. Assim, em caldeiras de grande capacidade, são utilizados arranjos de várias passagens.



15.4.1 Aquecedor Recuperativo Tubular

(I) Diâmetro do tubo e espaçamento entre tubos

- Os tubos são geralmente dispostos de modo escalonado. São geralmente utilizados tubos de aço de 37-63 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura. Para prolongar a vida da secção de baixa temperatura, pode-se utilizar um tubo de 38 mm de espessura e de 2 mm, ou um tubo de diâmetro 42 milímetros e espessura de 2 mm. A fim de reduzir o potencial de corrosão, na zona de baixa temperatura pode ser considerado o revestimento dos tubos em vidro. o escalonada
- A disposição dos tubos alternada é geralmente a usada. Os espaçamentos dos tubos utilizados estão na gama de $S_1/d=1,5-1,9$ e $S_2/d=1,0-1,2$. O espaçamento exacto depende de fatores como a transferência de calor, a resistência ao fluxo, e a vibração.



15.4.1 Aquecedor Recuperativo Tubular

(2) Altura da câmara de ar do aquecedor

- A altura da secção de alta temperatura não pode exceder 12 m (Bel, 1991). A câmara de aquecimento ou a caixa de ar devem ser suficientemente fortes e ter um bom acesso para a limpeza da cinza do invólucro. A altura da secção de baixa temperatura é normalmente de 1,5-4,5 m, o que é conveniente para a reparação e manutenção.

3) Velocidade do fluxo de gás e ar

- A velocidade do gás num aquecedor de ar tubular vertical está na faixa de 10 - 16 m/s para combustível sólido. A velocidade do fluxo de ar é geralmente metade da velocidade do gás. Combustíveis relativamente limpas, como os óleos pesados ou gás, permitem a utilização de uma velocidade mais elevada.



15.4.2 Aquecedor Recuperativo tipo Placa

- Em vez de tubos, são utilizadas placas paralelas para formar as passagens do gás e do ar neste tipo de recuperadores. A passagem do gás é 12-16 mm de largura, enquanto a passagem de ar é de cerca de 12 mm de largura. Um canal aberto de recuperação pré-aquecedor de ar (BEL, 1991) fornece uma boa alternativa para um pré-aquecedor de ar regenerativo.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

Num aquecedor de ar do tipo regenerativo o gás quente e o fluxo de ar frio fluem a partir de um conjunto de superfícies de armazenagem de calor que se movem entre o gás quente e ar frio alternadamente.

As superfícies de transferência de calor absorvem o calor do gás de combustão quente e transferem-no para o ar frio. O calor flui a partir da superfície quente da matriz para o ar frio. A direcção do fluxo de calor inverte-se quando as superfícies passam pelo gás quente. Os aquecedores de ar regenerativos podem ser do tipo de placa rotativa (Lungstrom) e do tipo de placa estacionária (Rothe Muhle).



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

a) aquecedor de ar do tipo Placa rotativa

- No aquecedor de ar do tipo placa rotativa (Figura 15.18) os elementos de placa de armazenamento de calor rodam com o rotor a uma velocidade baixa de cerca de 0,75 rpm. Uma parte dos elementos da placa de armazenamento de calor passam pelos gases quentes de combustão. Os elementos são aquecidos e o gás de combustão é arrefecido. Outra parte dos elementos de placas de armazenamento de calor é varrido pelo ar frio, aquecendo o ar. O elemento rotativo deste tipo de aquecedor de ar pode ser mais pesado que 500 toneladas, mas a sua construção é compacta.
- O aquecedor de ar rotativo, tipo placa é constituído por um rotor, equipamento de vedação, carcaça, etc. O rotor está dividido em 12 ou 24 sectores, com 12 ou 24 placas de separação radial.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

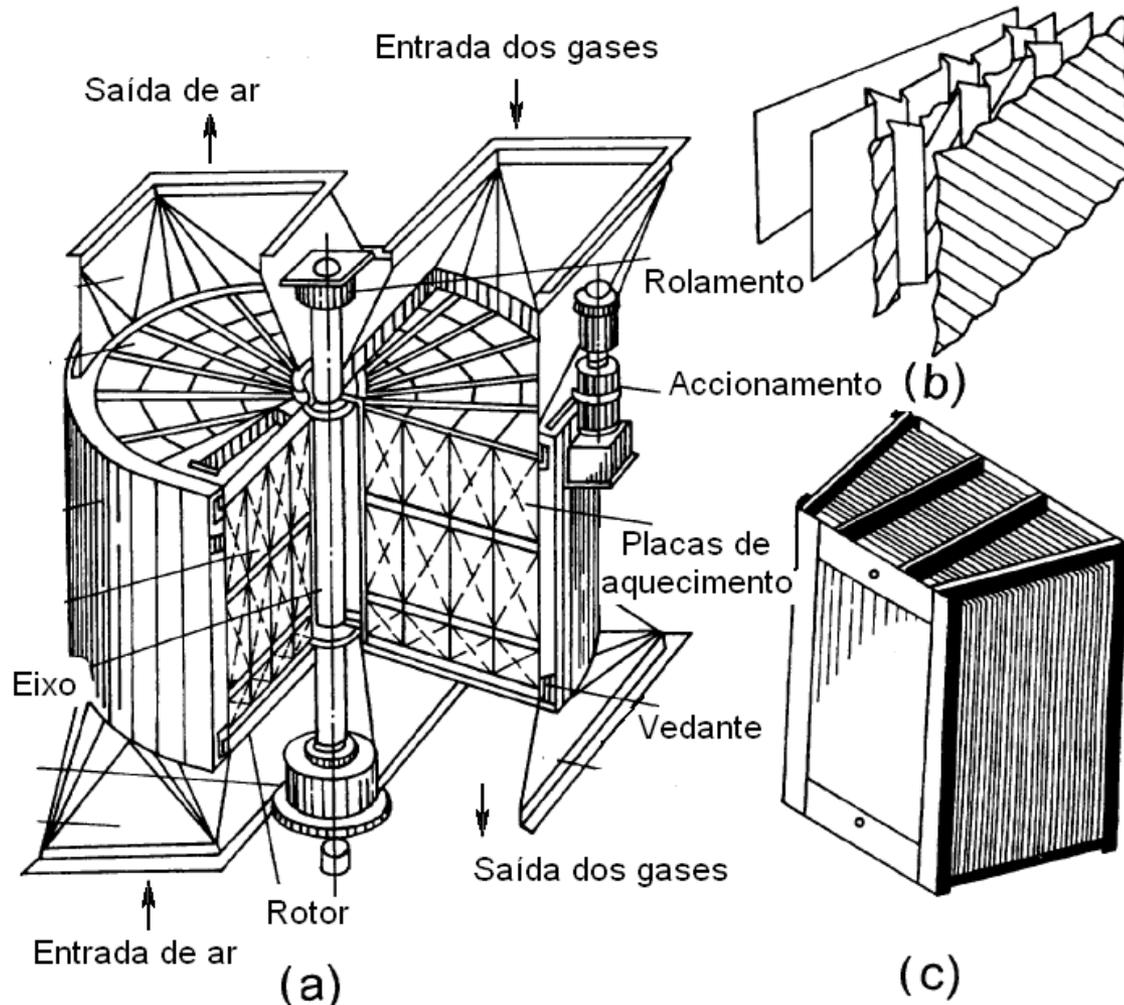


Figura 15.18 Aquecedor de ar tipo recuperativo

15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

- Cada sector é dividido em várias secções trapezoidais com placas de divisão transversais. As placas de armazenagem de calor são colocadas nela. A secção de baixa temperatura do rotor é feita de tal forma que permite uma fácil substituição dos elementos de armazenamento de calor.
- O peso do rotor é suportado por um rolamento axial. A vedação é essencial para o controlo de fugas de ar para o lado do gás de baixa pressão. O aquecedor de ar usa normalmente vedações radiais, axiais, e circunferenciais. Entre estas, o vedante radial tem a maior influência sobre o vazamento de ar. O sistema de vedação radial consiste de uma peça de vedação radial e uma secção de placa de vedação. São instalados afinadores de vedação no sector da placa de vedação. O sistema de vedação periférico é geralmente instalado no eixo central e na periferia exterior do rotor.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

b) aquecedor de ar estacionário do tipo placa

- Este aquecedor de ar regenerativo tipo é um pouco diferente do tipo Lungstrom (Figura 15.19). Aqui os elementos de armazenamento de calor são estáticos, mas a secção de fluxo de ar/gás é giratória. As placas de armazenamento são colocados no estator. Quando o gás flui através do estator do lado de fora da capa de ar, os elementos de armazenagem de calor são aquecidas. O ar em movimento contra-corrente, na campânula. Absorve calor dos elementos de armazenamento de calor. Quando o exaustor de ar rotativo gira uma volta completa, são concluídos dois ciclos de aquecimento e arrefecimento.
- As partes rotativas deste tipo de aquecedor de ar são leves, mas a sua concepção é complicada. Este aquecedor é constituído por um estator, um sistema de vedação e o exaustor de ar. O projecto do estator é semelhante ao do rotor acima mencionado. O estator encontra-se dividido em vários sectores. A vedação é ainda um grande problema neste tipo de aquecedores. É geralmente usado um sistema de vedação regulável, situado entre a cobertura de ar e o rotor.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

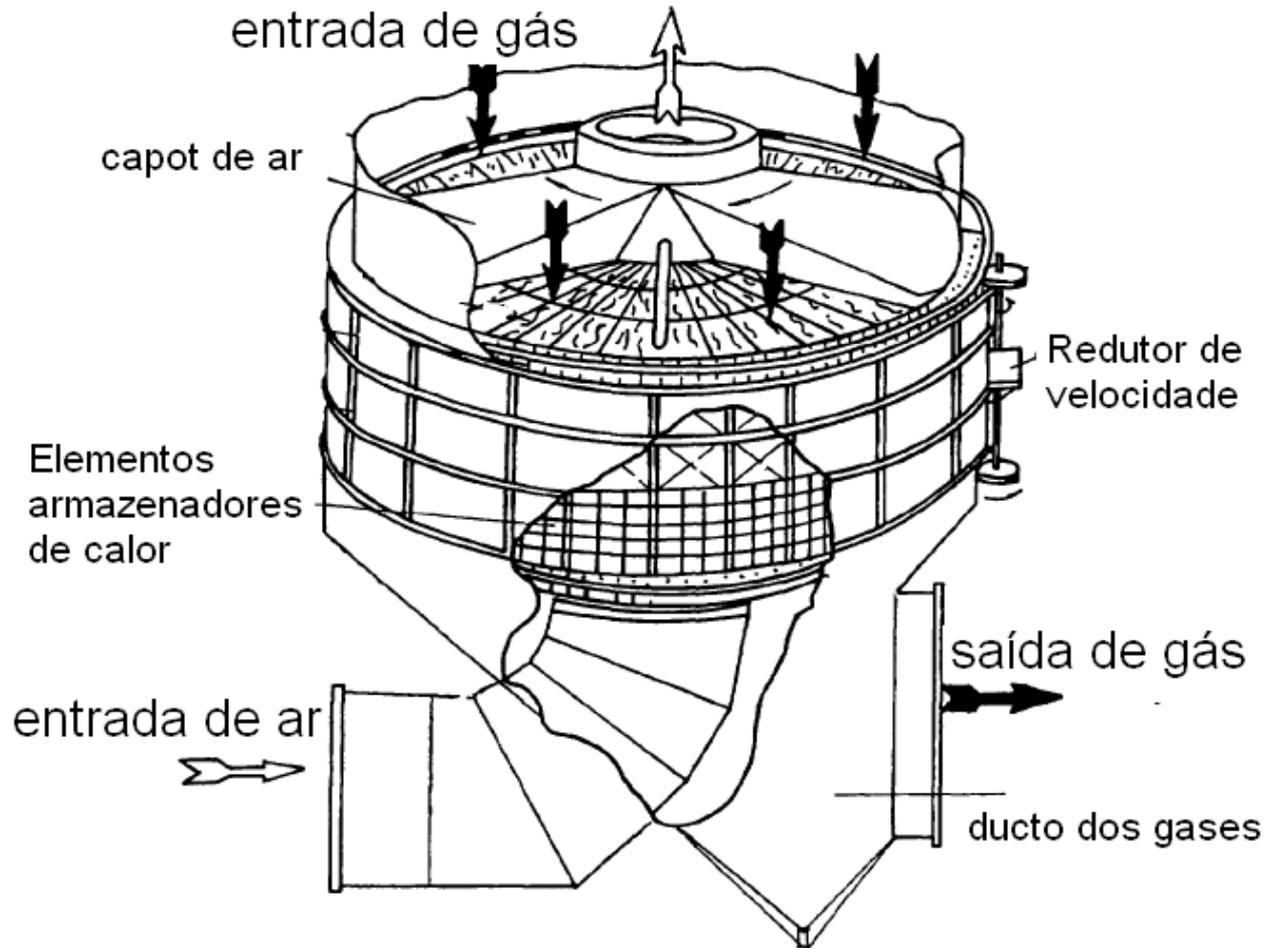


Figura 15.19 Aquecedor de ar tipo recuperativo

15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

A vedação de tipo U compreende vedantes tipo placa, peças da armação da vedação, peças vedantes do tipo U componentes reguláveis. As placas de vedação são fixadas na armação de vedação e a armação de selagem é ligada com a parte inferior do exaustor pelas peças de vedação do tipo U. Quando a tampa roda, o quadro de vedação também gira. O peso do sistema de vedante é equilibrado pelo peso da placa vedante de tipo U e a força elástica da mola. A placa de vedação contacta com as extremidades do estator com uma pequena força de contacto. A peça vedante do tipo U pode seguir o movimento relativo entre o sistema de vedação e a tampa de ar. Como resultado consegue-se um bom efeito de vedação .

Um sistema anelar de vedante regulável é um outro tipo usado. Encontra-se localizado entre a capa e a conduta fixa de ar. É constituído por um bloco de vedação de ferro fundido e equipamento de ajuste do vedante. O sistema de vedação anular é fixado na conduta do fluxo de ar e o efeito de vedação pode ser ajustado de acordo com a mola do equipamento de ajuste.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

c) Principais Considerações sobre o projecto

A rotação típica e a razão entre as áreas de fluxo são apresentados na Tabela 15.4.

(1) Velocidade e Tamanho de Aquecedores

As velocidades do gás e do ar encontram-se geralmente na gama de 8-12 m/s. A velocidade do gás é próxima da do ar. O diâmetro do aquecedor de ar é normalmente de 4,8; 8,0; 8,5 e 9,5 m. O ângulo do sector da cabine é geralmente de 7,5°; 15° e 30°.

(2) Tipo de elementos de armazenamento de calor

Na Figura 15.18b apresenta-se um tipo de elemento de armazenamento de calor. Para os elementos da secção de alta temperatura, deve ser prestada mais atenção ao efeito de transferência de calor, enquanto para os elementos na secção de baixa temperatura, existe o problema da corrosão e da deposição de cinzas. Existem dois tipos de unidades utilizados para o rotor: tipo central e tipo periférico. O tipo periférico é o mais comumente usado.



15.4.3 Aquecedor de ar Regenerativo ou Rotativo

Tabela 15.2 Comparação entre aquecedores de ar de placa rotativa e de placa estacionária

Tipo de aquecedor de ar	Tipo Placa Rotativa	Tipo Placa Estacionária
Rotações (RPM)	1,5-4	0,75-1,40
Área do fluxo do gás como % do Total	40-50	50-60
Área do fluxo de ar como % do Total	30-45	35-45
Área de vedação como % do Total	8-17	5-10

