

CALDEIRAS FOGOTUBULARES COM QUEIMA DE GÁS NATURAL

Por: Eng. Armando C. P. Ferreira
armando@thermoservice.com.br

Introdução:

Caldeira fogotubular, como o nome sugere, é uma caldeira em que a queima e os gases dela resultantes fluem dentro de tubos.

A queima processa-se no interior de um cilindro construído em chapa de aço, com dimensões tais que permitam a combustão completa de modo que, após a mesma, só fluam gases quentes para as demais passagens de gases.

Este tipo de caldeira é o mesmo que se adotava nas locomotivas a vapor e vem sofrendo transformações no sentido de que sejam mais seguras e eficientes.

São fabricadas no Brasil desde os anos 40 e um dos seus primeiros fabricantes é a ATA COMBUSTÃO TÉCNICA, que as produz desde 1954.

Tradicionalmente, estas caldeiras compõem-se de três passagens de gases, que são:

- Fornalha e Câmara de reversão traseira
- 2ª passagem de gases
- 3ª passagem de gases

São fabricadas também caldeiras de um, dois e quatro passagens de gases, porém o que predomina mesmo entre os fabricantes que mais modernizaram seus produtos, principalmente na Europa e Ásia, é a concepção de três passagens de gases.

A queima do combustível gera gases quentes que, após deixarem a fornalha, passam por uma Câmara de reversão e são encaminhados para a 2ª passagem de gases.

Essas caldeiras possuíam um só espelho traseiro que ancorava a fornalha e os tubos das duas passagens de gases. A câmara de reversão traseira era feita de material refratário (tipo Dry Back).

Os conceitos que norteavam todos os projetos dessas caldeiras originavam-se dos EE UU, um país que, tradicionalmente sempre cultuou caldeiras aquatubulares.

As taxas de vaporização situavam-se na faixa de 30 kg/h de vapor por m² de superfície de aquecimento. Considera-se superfície de aquecimento, a soma das superfícies das paredes da fornalha, câmara de reversão (Se for Wet Back) e tubos das segunda e terceira passagens de gases que recebem o calor proveniente da chama e dos gases quentes. A chapa mais usada para o casco, fornalha e espelhos era a ASTM A-285 Gr C.

As eficiências térmicas dessas caldeiras, ou seja, a energia correspondente ao vapor gerado, em relação à energia contida no combustível queimado no mesmo tempo, situava-se na faixa de 83%.

A produção máxima dessas caldeiras era de 10.000 kg/h de vapor e todas queimavam óleo combustível.

Em 1975, a ATA COMBUSTÃO TÉCNICA, então, uma empresa associada à Mitsubishi Heavy Industries, importou do Japão um novo projeto de caldeira fogotubular que revolucionou o mercado e contribuiu para modificar os conceitos em relação a este tipo de caldeira.

Trata-se do modelo MP. A sua taxa de evaporação chega a 80 kg/hm² de vapor e sua eficiência térmica é de 88%. Foi uma das primeiras caldeiras com câmara de reversão tipo Wet Back, ou seja, Câmara úmida, fabricadas no país.

O que diferenciou a MP das demais caldeiras que aportaram ao Brasil na época, foi a aplicação de tubos espiralados e o fato de que a queima e a segunda passagem dos gases se processam dentro da fornalha, que não é vazada.

Quando do lançamento das MP, todos os concorrentes da ATA “apregoaram aos quatro ventos” que essas caldeiras teriam vidas curtas porque, devido às suas baixas superfícies de aquecimento, os tubos e fornalhas sofreriam um stress além do permissível para os padrões da época.

A Maior das MP, a MP-815 tem capacidade para produzir 15.000 kg/h de vapor.

Hoje, passados mais de 30 anos de seu lançamento, mais de 1.000 caldeiras MP operam no Brasil, em perfeitas condições, suportaram bem suas transformações para a queima de Gás Natural, mantendo as capacidades de produção e eficiências térmicas, enquanto que quase todas as outras caldeiras apresentaram problemas com trincas em espelhos traseiros e tubos, ou tiveram suas capacidades

reduzidas, quando passaram a queimar o referido gás. As caldeiras MP foram fabricadas até meados da década de 90.

A partir do final dos anos 80, os fabricantes mais qualificados passaram a usar as chapas ASTM - A-516 em substituição à ASTM – A – 285.

No ano de 2000, a **AALBORG INDUSTRIES S.A**, uma empresa Dinamarquesa, líder mundial na fabricação de caldeiras navais, aquecedores de fluido térmico e utilidades térmicas para plataformas de petróleo OFF SHORE, que fabrica caldeiras em vários países, entre os quais, na China onde possui a maior fábrica do mundo, que produz cerca de 1.500 caldeiras por ano, adquiriu o controle acionário da ATA COMBUSTÃO TÉCNICA, líder no Brasil na fabricação de caldeiras fogotubulares.

A Aalborg fabrica caldeiras no Brasil desde meados da década de 80, destacou-se sempre pela excelência de seus produtos e produziu, antes da fusão com a ATA, algumas centenas de caldeiras fogotubulares que operam com excelentes performances.

Hoje, a Aalborg / ATA detém 68% desse mercado no Brasil.

Caldeiras Modernas

Após a aquisição da ATA, a Aalborg reuniu o que de melhor existia nas caldeiras de sua fabricação, as AR-4N e as AWN fabricadas pela ATA e aliado ainda à experiência adquirida nas outras fábricas da empresa, desenvolveu uma nova caldeira fogotubular, a **MISSION-3PASS (M-3P)**, que passou a ser a caldeira mundial da empresa. Este modelo de caldeira é produzido com capacidades de geração de vapor de 2.000 a 34.000 k/h. São fabricadas desde 2001 e já foram produzidas no Brasil mais de 350 unidades.

A Aalborg fabrica ainda as caldeiras **ATA-H3N** com capacidades até de 2.000 kg/h de vapor, Estas caldeiras têm preços mais competitivos e possuem Câmaras de vapor tipo Dry Back porque, devido às suas pequenas dimensões, não permitem a entrada em seus interiores de pessoas para operações de manutenção.

Mecanismos de transferência de calor:

Para melhor entendimento daqueles leitores não familiarizados com o assunto, tentaremos explicar do modo mais simplesmente possível, mecanismos de Transferência de Calor, conceitos básicos de Termodinâmica e citaremos alguns exemplos que, em nosso entender, são pertinentes ao assunto.

Exemplo 1:

Um ventilador, funcionando dentro de um ambiente fechado, ao contrário do que se pensa, não esfria esse ambiente. Se tal ambiente for isolado de tal modo que não troque calor com a vizinhança, ao fim de um determinado tempo, terá uma temperatura interna maior do que no início do processo. Isso ocorre porque o ventilador consome eletricidade e essa eletricidade transforma-se em calor, que pode ser sensível, aumentando a temperatura do ambiente, ou latente quando contribui para a evaporação de água nele contida.

Ocorre que uma pessoa dentro desse ambiente, ao receber o ar impulsionado pelo ventilador, terá a sensação de frescor.

Os porquê do emprego do ventilador e dos mecanismos que proporcionam essa sensação são áreas de dois ramos das ciências constantes dos cursos de alguns ramos de engenharia e que são os seguintes:

Termodinâmica

Transferência de calor

São áreas da Termodinâmica:

- O estudo sobre o ar impulsionado pelo ventilador.

- Os efeitos exercidos por esse ar, em contato com a pessoa ventilada.

A Termodinâmica embasa-se em dois enunciados denominados; leis da termodinâmica, que, simplificando, afirmam:

- 1ª Lei da Termodinâmica:
 - O calor contido em dois corpos em comunicação entre si, e isolados de outro meio, não pode ser criado ou destruído. Pode sim, transferir-se de um corpo para o outro até estabelecer-se equilíbrio térmico entre eles.
-
- 2ª Lei da Termodinâmica
 - O calor somente flui do corpo mais quente para o mais frio.

A Transferência de calor aborda os mecanismos através do qual o ar contata a pele da mesma pessoa. São três os mecanismos de transferência de calor, a saber:

- Radiação
- Convecção
- Condução

No exemplo 1, a pessoa recebe o calor proveniente do ambiente da sala, por radiação e o alívio desse calor, através do ventilador, por convecção.

Nas Caldeiras empregam-se os três mecanismos acima indicados.

Caldeiras Misson – 3 – Pass (M-3P)

Como já citamos acima, nas concepções mais adotadas por todos os fabricantes internacionais, estas caldeiras compõem-se de três passos de troca de calor, a saber:

- Fornalha e Câmara de reversão traseira
- 2ª passagem de gases ou 1º passo de tubos de convecção.
- 3ª passagem de gases ou 2º passo de tubos de convecção.

Uma breve descrição dos passos acima:

Fornalha

Troca de calor por Radiação.

É o componente mais importante da caldeira, porque:

- É onde ocorre a queima do Gás Natural, ou seja, onde se gera o calor necessário ao sistema.
- Em seu interior é que ocorre a maior temperatura.
- É onde se processa a maior troca de calor, com mais de 50% do total da caldeira.
- É a maior responsável pela limitação da capacidade da caldeira
- É onde um stress de material acarretaria maiores inconvenientes
- A harmonia entre sua forma geométrica e da chama, determina todo o equilíbrio térmico da caldeira.

Câmara de reversão traseira

Troca de calor por Radiação.

Situa-se no final da fornalha. Habitualmente é cilíndrica, com diâmetro suficiente para conter em seu interior um espelho que ancora a fornalha e aloja a extremidade traseira dos tubos da segunda passagem de gases. É construída em chapa de aço, e resfriada pela água do sistema (Wet-Back).

Em seu interior, os gases, após descreverem um ângulo de 180° em sua trajetória, são encaminhados para a segunda passagem

2ª Passagem

Troca de calor por Convecção.

É onde ocorre o primeiro estágio de troca de calor por convecção. Sofre toda a influência do desempenho da fornalha, tanto do seu dimensionamento, quanto do ajuste geométrico da chama à geometria da fornalha.

É responsável por mais de 35% da troca total de calor na caldeira.

3ª Passagem

Troca de calor por Convecção

É o feixe de tubos que encaminha os gases da 2ª passagem para a chaminé
Responde por cerca de 5% da troca total de calor na caldeira.

Conversão do Gás Natural em vapor

Combustão do Gás Natural

A combustão é um processo exotérmico de oxidação do combustível, que ao processar-se libera calor.

O Gás Natural é composto, em peso, de aproximadamente:

- 23% de Hidrogênio (H_2),
- 73% de Carbono (C)
- 4% de Dióxido de Carbono + Nitrogênio ($CO_2 + N$)

Produtos da combustão:

- 1 kg de Hidrogênio reage com 8,0 kg de Oxigênio e forma 9,0 kg de H_2O
- 1 kg de Carbono reage com 2,667 kg de oxigênio e forma 3,667 kg de CO_2 .

O ar contém, em peso, cerca de 23% de Oxigênio.

Assim, para combustão completa, um kg de Gás Natural necessita de 16,29kg de Ar, com 0% de excesso de ar (Mistura Estequiométrica).

Como é impossível a queima total de um combustível, com mistura estequiométrica, aplica-se à reação um excesso de ar cujo padrão médio é 15%.

Então, temos $16,29 \times 1,15 = 18,72$ kg de Ar / kg de Gás Natural e forma-se 19,72 kg de gases / kg de Gás Natural.

MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Embora em todas as fases de transferência de calor numa caldeira fogotubular, ocorram mecanismos combinados, predominam os seguintes:

Na fornalha e câmara de reversão traseira:**Radiação**

Nos tubos:**Convecção**

Entre as faces das paredes da fornalha e tubos:**Condução**

Radiação:

É um mecanismo de transferência de calor que não envolve transferências de materiais, pois se propaga mesmo no vácuo. É através deste regime que o Sol envia o calor à terra. Está relacionado com a temperatura da chama elevada à quarta potência.

Convecção:

Envolve transferências de massa. Fluidos passando através de uma superfície, cedem ou recebem calor da superfície se estiverem mais quentes ou mais frios do que ela.

Condução:

Quando, numa parede, suas faces estão com temperaturas diferentes, ocorre uma transferência de calor da face quente para a mais fria. Isso porque os elétrons ao serem enriquecidos com mais energia em

forma de calor têm suas velocidades, em relação aos seus spins, aumentadas e por isso colidem uns com os outros, transferindo assim o calor.

Fornalha – Radiação

Este é o mecanismo de transferência pelo qual o calor emitido pela chama do Gás Natural aquece a parede da fornalha. Suscita ainda dúvidas quanto ao modo como se processa. Há situações em que se comporta como se fosse transportado por ondas eletromagnéticas, em outras, como se fótons é que fossem seus condutores.

Sabe-se que está relacionado com o seguinte:

- Diferença das temperaturas absolutas (em °K) da chama e da parede da fornalha.
- Emissividades da chama e da parede da fornalha,
- Área de troca de calor da fornalha
- Fator de forma da fornalha /chama

Este trabalho não tratará, com profundidade, das propriedades de cada mecanismo de transferência de calor, porém, a título de curiosidade para quem não está familiarizado com o assunto, indicamos abaixo a expressão matemática pela qual se calcula a troca de calor por radiação e é a seguinte:

$$Q_R = E_{CH-F} \cdot A \cdot 4,96 ((T_{CH}/100)^4 - (T_F/100)^4), \text{ onde:}$$

- E – Emissividade da chama / fornalha
- A – Área de troca de calor da fornalha
- T_{CH} – Temperatura da chama
- T_F – Temperatura da parede da fornalha.

Emissividade

A emissividade de um corpo relaciona-se com a temperatura a que está submetido. É mais significativa a partir de 650°C. Este mecanismo ainda suscita dúvidas porque além do fator temperatura, os fenômenos de radiação são classificados por seu comprimento de onda característico. Sabe-se que as cores avermelhadas são mais irradiantes do que as brancas. Uma evidência de que essa afirmação é correta, é a seguinte:

Exemplo 2:

O filamento de uma lâmpada incandescente a 1000°C, (luz avermelhada) irradia, proporcionalmente, muito mais calor do que o sol que está a cerca de 5.500 °C, A cor da luz do sol é branca. Além disso, porque a temperatura a 10.000 m de altitude é de aproximadamente -30°C, se nessa altura não existem obstáculos para o fluxo da radiação proveniente do sol?

As respostas, segundo a ciência, são a confirmação de que as cores que mais se aproximam do infravermelho são mais irradiantes do as que estão mais perto do ultra-violeta e que a radiação não se faz sentir na ausência de um corpo reflexivo ou refratário.

Baseadas em dados experimentais, foram criadas tabelas de emissividades referentes a queima de Óleo Combustível pesado e Gás natural, no interior de fornalhas resfriadas, que transcreveremos abaixo:

Óleo BFF - diâmetro de chama menor 20 cm do que o diâmetro da fornalha.

Diâmetro da Chama	1,0	1,2	1,4	1,6
Emissividade da chama / Fornalha	0,60	0,64	0,67	0,68

OBS.: Na queima de óleo, o diâmetro da chama deve ser menor do que da fornalha para que as partículas de óleo não esbarrem na parede e deixem de queimar.

Se fosse possível o diâmetro da chama igual ao da fornalha, a emissividade aumentaria entre 6 e 8%.

Gás Natural - diâmetro da chama igual ao diâmetro da fornalha

Diâmetro da Chama	1,0	1,2	1,4	1,6
Emissividade da chama / Fornalha	0,27	0,31	0,34	0,36

Como se observa, a emissividade da chama/fornalha, na queima de Gás Natural, é de, aproximadamente 50% em relação à da queima de óleo e umenta com o diâmetro da chama.

Calor dissipado na fornalha

O Gás Natural, ao queimar na fornalha, cede a esta, por um mecanismo de radiação e convecção, em que predomina o primeiro, calor que, por condução, flui através da parede para a água.

A troca de calor referente à radiação deve-se principalmente à emissividade da chama (com temperatura adiabática de cerca de 1.800°C), embora os gases a cerca de 1300°C também emitam algum calor.

O calor remanescente, que a fornalha não absorveu, é encaminhado aos tubos da 2ª passagem, através dos gases formados na combustão.

Hoje, sabe-se que o maior responsável por trincas de espelhos traseiros e de tubos da 2ª passagem, é a alta temperatura dos gases na câmara de reversão traseira. Tal temperatura, quando superior a 950°C, acarreta o seguinte:

- Aumenta as tensões de cisalhamento no espelho traseiro e câmara de reversão, devido a maior variação de temperatura entre as faces de suas paredes.
- Aumenta a velocidade do fluxo dos gases na entrada dos tubos da 2ª passagem.
- Aumenta a troca de calor por radiação no início do feixe de tubos.

Para melhor entendimento vejamos o que ocorrerá em uma caldeira M-3P, fabricação Aalborg, para geração de 10t/h de vapor a 10,5 kgf/cm², com entalpia de 664,5 kcal/kg, queimando Gás Natural. Esta caldeira será abastecida com água a 20°C e sua eficiência térmica projetada, sem economizador, em 90,1%.

O Gás Natural tem o PCI de 11.246 kcal/kg e, queimando com 15% de excesso de ar, gera 19,72 kg de gases/kg de Gás Natural.

A temperatura dos gases, na entrada da 2ª passagem não deve exceder 950°C.

A entalpia dos gases a 950° e entrada do ar no queimador a 25°C, é de 268,37 kcal/kg.

Consumo de Gás Natural:

$$10.000 \times (664,5 - 20) / (11.246 \times 0,901) = 636 \text{ kg/h de Gás Natural}$$

Este Gás Natural gera na fornalha:

$$636 \times 11.246 = 7.153.163 \text{ kcal/h e:}$$

$$636 \times 19,72 = 12.543 \text{ kg/h de gases combustos.}$$

Calor que deixa a fornalha, com os gases a 950°C:

$$12.543 \times 268,37 = 3.366.165 \text{ kcal/h}$$

Calor dissipado na fornalha (transferido para a água do sistema)

$$7.153.163 - 3.366.165 = 3.786.998 \text{ kcal/h, que corresponde a 58,76% de todo o calor transferido na caldeira.}$$

Fornalha - Condução

O calor liberado na fornalha é absorvido pela sua parede, que da face quente, por condução, o transfere para a face fria que está em contato com a água do sistema, segundo a seguinte expressão matemática:

$Q_K = K S_a (T_Q - T_F) / s$, (kcal.m².Δt/hm) sendo:

- Q_K - Quantidade de calor trocado
- K - Condutibilidade do aço na temperatura média entre suas faces
- S_a - Superfície de aquecimento da fornalha
- T_Q - Temperatura na face quente
- T_F - Temperatura na face fria
- s - Espessura da chapa

A fluência deste calor, através de chapa, com espessura suficiente para suportar a pressão do vapor, tende a criar tensões de cisalhamento, tendo em vista que as duas faces estão em temperaturas diferentes. É importante o domínio técnico do fabricante da caldeira para projetar uma fornalha que proporcione a melhor transferência de calor com o mínimo de stress dos materiais. Vale lembrar que uma fornalha ideal seria aquela que tivesse:

- O maior diâmetro, para maior emissividade (vide tabelas de emissividades)
- A maior superfície de troca, para absorver mais calor.
- A espessura de parede mais fina possível, para evicção de tensões internas,
- Que seja construída com o aço que melhor conduza o calor e que resista mais longamente ao stress.
- Que sua geometria seja compatível com a geometria da chama.

Além das características ideais apontadas acima, existem recomendações normativas que devem ser respeitadas e que são, entre outras, as seguintes:

- A carga máxima de trabalho da fornalha não deve exceder 1,55 MW/m³.
- O limite de capacidade para uma fornalha não deve exceder 12 MW.
- A espessura da chapa da fornalha não deve exceder ¾"

As recomendações acima limitam as dimensões das fornalhas e, conseqüentemente, definem um bom ou mau projeto da caldeira fogotubular.

A Caldeira M-3P acima apresenta os seguintes valores:

- Carga de trabalho na fornalha: 1,52 MW/m³
- Capacidade da fornalha: 8.318 MW

IMPORTANTE: A Aalborg tem uma postura tal, em relação às fornalhas das caldeiras fogotubulares a que assiste, sejam de sua fabricação ou não, que limita suas capacidades de produção de vapor aos parâmetros ditados pela sua experiência de dezenas de anos em atividade.

O controle da temperatura acima referida é imprescindível para todas as caldeiras, independentemente de quem as fabrica. A não observância em relação a este ponto trará, com toda certeza, problemas futuros.

Convecção – 2ª Passagem

Já foi citado o quão é importante que os gases entrem nos tubos com temperatura controlada. Dentro dos espelhos, as pontas dos tubos têm sua refrigeração prejudicada e precisam manter suas propriedades mecânicas originais para se ancorarem firmemente. Após a câmara de reversão traseira, todo o calor trocado na caldeira será através dos feixes de tubos e o mecanismo de transferência de calor será, predominante, por convecção.

Voltemos ao exemplo 1

Afirmamos que o ventilador aumenta a energia interna contida na sala o que teoricamente aumentaria sua temperatura. Isso é verdade. Então o porquê do ventilador?

Ocorre, neste caso, que se a renovação do ar não provocar uma forte corrente na sala, as partículas desse ar, em contato com o corpo da pessoa, ficam estacionadas, formam uma película aderente à pele, e impedem a troca de calor. A ação do ventilador é criar uma forte corrente de ar que, em contato com o corpo da pessoa, arranca essa película, ajuda na evaporação da umidade da pele que, por sua vez, absorve calor para essa evaporação e cria a sensação de frescor desejada. Esse é o motivo pelo qual o fluxo de calor não deve ser constante sobre o corpo dessa pessoa porque provocaria desidratação e acarretaria um dispêndio de calor prejudicial à saúde.

Exemplo 3:

O mesmo princípio se aplica aos barriletes de água, de madeira, que os caminhões transportam dependurados nas carrocerias. O ar, quando o caminhão se movimenta, ventila o barrilete, que é

permeável, provoca a evaporação da sua umidade externa que por sua vez “rouba” calor da água contida em seu interior e com isso esfria-a.

Quando o caminhão pára, a água recomeça a esquentar porque se forma novamente uma película de ar em volta do barrilete que impede a troca de calor.

Fluxo de gás em um tubo

Do mesmo modo que nos exemplos acima, quando um gás escoar através de um tubo, todas as suas partículas não fluem na mesma velocidade. Se o gás flui em baixa velocidade, ou seja, em regime laminar, as partículas adjacentes à parede formam junto a esta uma película cuja velocidade é zero. Quando se aumenta a velocidade de escoamento, as partículas da película passam a deslizar, porém em velocidades muito baixas. A camada situada entre a parede e onde a velocidade média das partículas é 99% da máxima que ocorre dentro do tubo é denominada camada-limite.

À medida que as partículas se afastam da parede, suas velocidades vão aumentando até atingirem seu maior valor no centro do tubo. A camada limite é proporcional à rugosidade da parede interna do tubo e à viscosidade cinemática do fluido. Isto nos leva a concluir que, quanto maior for o diâmetro do tubo, menor será o efeito da camada limite.

Esta camada é um grande inibidor de troca de calor entre os gases e a parede do tubo.

Para que os efeitos da camada limite sejam minimizados, aumenta-se a velocidade dos gases, criando-se assim uma turbulência que a ataca. (efeito do ventilador)

Mais uma vez, a título de curiosidade, informamos que o tipo de escoamento, laminar ou turbulento é determinado pelo número de Reynolds (R_D) que tem a seguinte expressão $R_D = VD\rho / \mu$; sendo:

- V : Velocidade média do escoamento em m/s
- D : Diâmetro interno do Tubo em m
- ρ : Densidade do Gás em kg/m^3
- μ : Viscosidade dinâmica do Gás em Kgf.s/m^2

Quanto mais alto for o número de Reynolds, maior será a turbulência do escoamento e, por consequência, menor será a camada limite.

A velocidade média do escoamento dos gases é definida pela expressão Q / A , sendo:

- Q / s : Vazão volumétrica (m^3 / s)
- A : Área livre de passagem do tubo (m^2)

O volume dos gases varia diretamente com a sua temperatura absoluta.

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção empregam-se outros valores entre os quais; o n° de Prandtl que é uma função dos gases.

Voltando ao exemplo da caldeira M-3P, verificamos o seguinte:

Foram gerados 12.543 kg de gases / h

Adotemos que os gases correspondentes ao Gás Natural tenham a mesma densidade do ar.

A densidade do ar é 1,293 kg / Nm^3 .

Assim, estes gases terão um volume de 9.701 Nm^3 / h (a 0°C, ou 273°K e 1 bara de pressão).

Estes gases entrarão na 2ª passagem da caldeira a 950°C.

Nessa condição, a vazão desses gases será $9.701 \times (950+273) / 273 = 43.459 \text{ m}^3 / h$ ou $12,07 \text{ m}^3 / s$.

Se a soma das sessões de passagens dos tubos for, 0,35 m^2 , a velocidade de entrada será de 33,09 m/s.

Esses gases trocam calor durante seu percurso e saem da 2ª passagem a 330°C, com vazão de 5,95 m^3 / s .

Na condição de saída, a velocidade de escoamento dos gases será de 17,00 m/s.

Nos cálculos do coeficiente de troca de calor por convecção, empregam-se várias variantes, entre as quais o N° de Prandtl (Pr) que são constantes. A maior variação ocorre com o R_D e que na expressão matemática, é elevado à potência (- 0,2).

A expressão matemática que retrata a troca de calor por convecção é a seguinte:

- $Q_C = h_C \cdot A \cdot (\Delta T_L - T_s)$, em (kcal.m²/h°C), onde:
 - Q_C - Calor trocado por convecção/h
 - h_C - Coeficiente de troca de calor por convecção
 - A - Superfície de troca de calor dos tubos (N° tubos x $D_{int.}$ x L x π)
 - ΔT_L - Variação da temperatura média logarítmica do gás ao longo da passagem
 - T_s - Temperatura da face quente da parede do tubo

E a fórmula empregada para o cálculo do h_C é:

- $h_C = 0,023 R_D^{-0,2} Pr^{-2/3} C V \varphi$, onde:
 - R_D - N° de Reynolds
 - Pr - N° de Prandtl
 - C - Calor específico dos gases na TML
 - V - Velocidade médias dos gases na TML
 - φ - Densidade dos gases na TML

Nas expressões acima, as variáveis A ; T_s , são constantes e C ; Pr , variam muito pouco.

Daí, é fácil a dedução de que a variação da troca de calor por convecção em cada passagem dos gases é uma função das propriedades destes gases durante o percurso.

Na entrada dos tubos, há que se tomar cuidados para que a temperatura dos gases não ultrapasse um valor de segurança. (não esquecer que a temperatura é alta e a velocidade dos gases é a máxima) Quando assim se procede, as condições de troca de calor são ideais.

Na saída dos tubos, as condições de escoamento são insuficientes para uma boa troca de calor, porque:

- A velocidade dos gases é baixa
- A sua temperatura é muito menor

À medida que os gases caminham nos feixes tubulares, a troca de calor fica menor.

Se adotarmos para os gases seus valores correspondentes de ρ e μ para 950°C e 330°C e elevarmos os respectivos $R_D^{-0,2}$, constataremos que a troca de calor no início da 2ª passagem é cerca de 3 vezes maior do que no final da mesma.

Tubos espiralados

Superfície de aquecimento

Já citamos acima que a superfície de aquecimento é a soma das superfícies dos passos da caldeira expostos à ação do calor.

Quanto maior for a superfície de aquecimento da caldeira, menor será a taxa de vaporização, considerando-se uma produção de vapor constante.

Alguns fabricantes de caldeiras apresentam como vantagem grandes superfícies de aquecimento de seus produtos. Contestamos isso com a seguinte argumentação:

Exemplo 4:

Todos se lembram dos carros fabricados na década de 80, equipados com motores de 5.000 cm³ de cilindrada, ou mais, que desenvolviam potências de 200 cv, rodavam 4 km/l de gasolina e 160.000 km sem abrir.

Hoje um carro equipado com motor de 2.500 cm³ de cilindrada, desenvolve potência de 240 cv, roda 10 km/l de gasolina e roda 400.000 km sem abrir.

Isso, porquê?

Entende-se por cilindrada, a área da cabeça de um pistão vezes o seu curso em um tempo do motor.

Os motores antigos possuíam cilindros de pequeno diâmetro e longo curso. Assim os pistões percorriam, num ciclo completo, distâncias enormes, atritando com as paredes dos cilindros, provocando desgastes nas peças móveis e dissipando uma grande quantidade de calor.

Os motores modernos têm cilindros de maior diâmetro, os cursos dos pistões são curtos o que proporciona maior agilidade, menor desgaste e consumo menor de combustível.

Nas caldeiras ocorre algo parecido e aí entram os tubos espiralados.

Vejamos o seguinte:

Na caldeira M-3P já mencionada, atribuímos à segunda passagem a superfície de escoamento de 0,35 m². Se essa passagem for constituída de tubos com diâmetro de 2^{1/2}" terá 132 tubos com superfície de troca de calor de 26,33 m² / m de comprimento.

Se essa passagem for composta por tubos com diâmetro de 3^{1/2} " terá 66 tubos com superfície de troca de calor de 18,15 m² / m de comprimento.

Daí se vê que para a mesma área de passagem dos gases, os tubos com menores diâmetros apresentam superfícies de aquecimento maiores.

Apesar da maior superfície de aquecimento, as condições de troca de calor serão piores porque, como vimos acima, a influência da camada limite é função da superfície e não do diâmetro dos tubos.

Tubos Espiralados – Uma lembrança.

Muitas pessoas se lembram que havia um fabricante nacional de automóveis, totalmente contrário ao consumo de álcool nos mesmos e expunha enfaticamente seus motivos, desconsiderando que as grandes montadoras instaladas no Brasil, já haviam adaptado seus motores para este combustível.

Esse fabricante saiu do mercado e hoje o álcool coloca o país em evidência internacional, É um dos combustíveis em que todos apostam como sendo o mais cotado para o futuro.

Na introdução deste trabalho foi mencionado que a ATA fabricou, com grande sucesso, uma enorme quantidade de caldeiras modelo MP e que nessas caldeiras a terceira passagem de gases era constituída de tubos espiralados

O autor deste trabalho, assim como outros técnicos consideraram, erroneamente, estes tubos como sendo corrugados. Na verdade, suas paredes mantêm as rugosidades originais dos tubos ASTM-A-178-A. As espirais são um trabalho de forjaria a frio e provocam um movimento helicoidal dos gases dentro dos tubos, que ataca a camada limite e melhora a troca de calor em toda a extensão dos feixes tubulares. (De modo análogo ao trabalho que o ventilador realiza no exemplo 1)

Recentemente, um dos maiores fabricantes mundiais de caldeiras, turbinas a gás, sistemas de geração de energia elétrica e líder em desenvolvimento e produção de trens de grande velocidade, informou em seu site que substituiu os tubos lisos por espiralados nas caldeiras fogotubulares que fabrica e que, em estudos desenvolvidos em seus laboratórios, foi constatado um aumento de 100% na troca de calor com 20% de aumento da perda de carga do lado dos gases.

(Se o leitor desejar consultar esse site, informaremos o endereço)

Do mesmo modo que o ex-fabricante nacional de automóveis, mesmo sabendo-se que grandes empresas multinacionais:

- Possuidoras de recursos técnicos compatíveis com suas grandezas,
- Que investem em tecnologia, porque para isso têm recursos financeiros e humanos,
- Que, pelo seu gigantismo, têm enormes responsabilidades junto ao mercado,
- Que são fornecedoras de caldeiras para os países mais adiantados deste planeta,
- Adotam tubos espiralados, porque oferecem vantagens técnicas,

Existem correntes interessadas em contestar esta verdade sob a alegação que os tubos sofrem stress e não trazem vantagens técnicas.

Para provar a inverdade dessas correntes, verificamos que em algumas caldeiras modelo MP, foram aplicados tubos lisos em vez de corrugados, e, como conseqüências de tal, os gases passaram a sair da chaminé com temperaturas mais quentes cerca de 50°C.

Voltemos à caldeira Mission-3 Pass dos exemplos acima.

Temperatura dos gases na entrada dos tubos da 2ª passagem: 950°C Entalpia: 268,37 kcal/kg.
Temperatura dos gases na saída dos tubos da mesma passagem: 330°C Entalpia: 81,95 kcal/kg
Massa de gases da combustão: 12.543 kg/h
Superfície de aquecimento da segunda passagem: 88,5 m²
Espessura da parede dos tubos: 3,05 mm
Condutibilidade térmica do aço dos tubos à temperatura de 650°C: 29 kcal/h.m°C (a TML neste caso, é de 367°C)

Calor trocado na 2ª passagem: $12.543 \times (268,37 - 81,95) = \underline{2.338.266 \text{ kcal/h}}$ que corresponde 36,28% do calor trocado na caldeira.

Varição da temperatura nas faces da parede dos tubos: $2.338.266 \times 3,05 \times 10^{-3} / (88,5 \times 29) = 2,78^\circ\text{C}$.

A diferença média de temperatura entre as faces dos tubos é 2,78°C e chega a cerca de 5,0°C no início da tubulação.

Como se vê, é uma variação baixa, incapaz de provocar stress.

Além disso, as caldeiras ATA-MP comprovam esta tese, pois existem centenas de unidades em operação há mais de 30 anos, com taxas superiores ao dobro dos valores aqui apresentados, sem apresentarem problemas anormais.

Qual a real função das espiras nos tubos?

Do mesmo modo que o ventilador do exemplo 1, as espiras provocam um movimento helicoidal no escoamento dos gases.

Esse movimento faz com que os gases descrevam um determinado ângulo em relação às paredes dos tubos. Se tal ângulo for φ , e a distância x , então o trajeto dos gases será $x/\cos\varphi$, $> x$, o que implicará em maior velocidade e R_D .

Além disso, esse movimento combate os efeitos da camada limite.

Convecção – 3ª passagem

Nesta passagem da M-3P do exemplo acima transfere-se somente 4,96% do calor total do sistema e os gases chegam na entrada da chaminé com 30° de temperatura maior do que o vapor gerado.

Conclusão:

Este trabalho tem por finalidade a defesa das caldeiras de 3 passagens de gases que é a concepção adotada por todos os grandes fabricantes mundiais.

Nos EE UU, uns 2 ou 3 fabricantes, além de produzirem caldeiras de e passagens também fabricam de 4 passagens de gases, porém não defendem este tipo de caldeira. Simplesmente, citam-nas em seus sites.

Há alegação de que o modelo de 4 passagens favorece a baixa emissão de NO_x por facilitar a introdução no ventilador de gases combustos e assim baixar a temperatura na fornalha.

Esse recurso é discutível porque esses gases também poderiam ser re-circulados em caldeiras de 3 passagens de gases. O importante é que não contribuem para o aumento ou diminuição da energia para a caldeira. Aumentam a vazão mássica de gases com conseqüente perda de carga nos feixes convectivos e, tendem a diminuir a eficiência térmica da caldeira em seu trabalho de deslocamento da chaminé para o ventilador. Se esta solução contribuir para uma diminuição da troca de calor na fornalha,

isso se constituirá em grande prejuízo para a longevidade da caldeira, pois os gases chegarão muito quentes ao espelho traseiro.

A formação de NO_x está condicionada à temperatura e pressão no núcleo da chama e é muito mais função da adequação do queimador à fornalha.

Como nos motores mais modernos, nas caldeiras M-3P de 3 passagens de gases, estes caminham o suficiente para trocar calor com eficiência.

Recomendamos ceticismo a quem está envolvido em processos de escolha de caldeiras fogotubulares.

Se não for possível a contratação de um consultor competente, então que, pela internet, entre nos sites dos fabricantes internacionais para ver o que se faz lá fora.

Constatará que todos convergem para os mesmos pontos e, que os mais poderosos apresentam soluções novas, agora inéditas, mas que serão adotadas pelos menores com o passar do tempo.

Finalmente, o total de caldeiras fabricadas no Brasil pela ATA COMBUSTÃO TÉCNICA E PELA AALBORG já caminha para 12.000 unidades, aliado às que a AALBORG fabricou para o mundo inteiro.

Uma empresa que fabricou caldeiras para mais de 50% de todos os navios do mundo. Que fabrica os queimadores KB na Dinamarca e GOSFERN na Austrália, sendo este considerado um dos melhores do mundo. Que tem, junto com a ATA, uma experiência na fabricação de caldeiras de mais de 150 anos, aplicaria recursos e tempo para espiralar tubos sem que algum benefício daí resulte?

E porque não fabrica caldeiras com 4 passagens de gases? Será que não sabe como fazê-las?

É líder de mercado no Brasil e se esforça para ampliá-lo. Nem sempre é possível porque existem empresas impossibilitadas de pagar o preço de uma caldeira da Aalborg.

Quando uma dessas empresas pode e compra, junta-se aos outros 68% dos usuários deste tipo de caldeiras e forma, cada vez mais, uma maior família que nos envaidece e que sabe poder contar conosco.