



KLS

Geração e Distribuição de Vapor

Geração e Distribuição de Vapor

Alexandre Diório

© 2019 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

André Luís Delvas Fróes

Pedro Donizeti Bolanho

Roberto Mac Intyer Simões

Editorial

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Diório, Alexandre

D593g Geração e distribuição de vapor / Alexandre Diório.–

Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

200 p.

ISBN 978-85-522-1405-2

1. Geração e distribuição de vapor. 2. Caldeiras de vapor. 3. Vasos de pressão. I. Diório, Alexandre. II. Título.

CDD 628

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2019

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 — Londrina — PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1	
Introdução à geração de potência	7
Seção 1.1	
Sistemas de potência a vapor	9
Seção 1.2	
Ciclo de Rankine.....	24
Seção 1.3	
Melhoria de desempenho do ciclo de potência a vapor	37
Unidade 2	
Geração de vapor: combustão em caldeiras industriais	53
Seção 2.1	
Combustíveis industriais	55
Seção 2.2	
Combustão de gases	68
Seção 2.3	
Combustão de líquidos	83
Unidade 3	
Geração de vapor: equipamentos	101
Seção 3.1	
Queimadores	103
Seção 3.2	
Caldeiras flamatubulares	117
Seção 3.3	
Caldeiras Aquatubulares.....	132
Unidade 4	
Equipamentos, dispositivos de controle e segurança, distribuição de vapor	147
Seção 4.1	
Caldeiras de recuperação, superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar	149
Seção 4.2	
Dispositivos de controle e segurança	166
Seção 4.3	
Tubulações de vapor.....	181

Palavra do autor

Os processos de geração e distribuição de vapor são cruciais para as Ciências Térmicas e Fluidos ao produzirem o vapor necessário para o movimento de turbinas durante o processo de geração de energia elétrica. Além disso, tais processos fornecem energia na forma de calor para diversos processos produtivos, por exemplo, a destilação do etanol e de outros combustíveis, o cozimento de cavacos de madeiras para produção de celulose e papel entre outros produtos. O vapor também é empregado em processos de umidificação, de limpeza e esterilização. Com isso, entender como o vapor é produzido e as maneiras adequadas de transportá-lo até os pontos necessários de uma fábrica de forma eficiente, isto é, com a mínima perda de calor possível, é de fundamental importância para a sua formação profissional.

Com esse objetivo em mente, é importante que você conheça e compreenda a geração de vapor pelo ciclo de Rankine e os combustíveis industriais gasosos e líquidos que são utilizados como comburentes nos equipamentos geradores de vapor, ou seja, como a energia química do combustível pode ser empregada para aquecer e vaporizar a água até o seu estado de vapor. Além disso, você também deve conhecer e compreender as características e o funcionamento dos geradores de vapor que são divididos em flamatu-bulares e aquatubulares, seus dispositivos de segurança, controle e também as técnicas de distribuição de vapor desde seu ponto de origem até o local de sua utilização.

Este livro se inicia com a Unidade 1 introduzindo os sistemas de geração de potência a vapor e as características fundamentais do ciclo de Rankine. Na sequência, a Unidade 2 aborda os diferentes tipos e as características dos combustíveis líquidos e gasosos empregados na combustão para geração de vapor. Já a Unidade 3 trata sobre os diferentes tipos de queimadores e os geradores de vapor flamatu-bulares e aquatubulares, suas características e aspectos construtivos básicos. Por fim, a Unidade 4 encerra o estudo da geração e distribuição de vapor apresentando as partes acessórias dos geradores de vapor como, economizadores, pré-aquecedores de ar e superaquecedores. A unidade também aborda os sistemas de controle do processo

de geração de vapor e as técnicas utilizadas pela indústria para distribuir o vapor conforme a necessidade de seus setores produtivos.

A geração e distribuição eficiente de vapor através de uma indústria pode fazer a diferença entre um processo economicamente viável e seguro para outro processo fadado ao fracasso. Portanto, assimile os conceitos contidos neste livro, pois eles serão úteis para que você possa analisar adequadamente um ciclo de geração de vapor, otimize sua eficiência e se destaque no mercado de trabalho. Bons estudos!

Unidade 1

Introdução à geração de potência

Convite ao estudo

Você provavelmente conhece ou até mesmo já visitou uma usina hidrelétrica. Nela, a energia mecânica da queda de água é utilizada para produzir energia elétrica por meio da movimentação de uma turbina hidráulica. No entanto, não existem quedas d'água disponíveis apropriadamente nem economicamente em todos os lugares. Então, como as indústrias químicas, alimentícias, refinarias, destilarias e outras empresas que são grandes consumidores de energia fornecem a energia necessária aos seus processos industriais? A resposta está relacionada com os ciclos de geração de potência. Diferentemente da energia mecânica, neste caso, é a energia química de um combustível que será responsável pelo funcionamento da indústria. Mas o que é um ciclo de potência? Essa é uma pergunta que você saberá responder ao final desta disciplina e, para isso, fará uso do seu raciocínio crítico e de resolução de problemas, além de exercer sua curiosidade para se perguntar como a produção e geração de vapor ocorrem em um ciclo de potência.

Ao longo do estudo desta unidade, você irá conhecer os componentes de um sistema de potência a vapor a fim de compreender a modelagem desse processo pelo ciclo de Rankine e como ambos atuam na geração de potência. Esses conhecimentos vão auxiliá-lo na identificação das principais perdas e reversibilidades do ciclo de Rankine para que, com isso, seja capaz de analisar um ciclo de geração de potência e saiba realizar a melhoria do desempenho do ciclo, ou seja, propor soluções capazes de aumentar a eficiência do referido ciclo.

Para aprendermos os conteúdos desta unidade, imagine que você acaba de se formar em Engenharia Mecânica e foi aprovado em um processo seletivo para ser trainee de uma grande empresa. Como trainee, você foi alocado no departamento de projetos em que atuará sob a supervisão de um engenheiro chefe, e está inserido em uma equipe multidisciplinar com engenheiros, tecnólogos e diversos profissionais de várias áreas do conhecimento. Você e essa gama de profissionais integram uma equipe capacitada a atuar nos projetos de engenharia que visam otimizar, avaliar, modificar e reestruturar todas as áreas que compõem a empresa em que você trabalha ou as empresas parceiras que contratam seus serviços de consultoria, conforme as necessidades dos projetos apresentados. Nos primeiros meses, enquanto

trainee de engenharia, você irá se deparar com três projetos distintos que englobam a produção e distribuição de potência.

O primeiro projeto refere-se à avaliação e à otimização do ciclo de potência de um equipamento utilizando os conhecimentos adquiridos com o estudo de Introdução aos Sistemas de Potência a Vapor, Política de Construção de Usinas de Energia, Transmissão e Distribuição de Energia e Usinas a Vapor. No segundo projeto você avaliará a eficiência do Ciclo de Rankine após a reestruturação de um processo industrial e utilizará os conhecimentos adquiridos com o estudo de Modelagem do Ciclo de Rankine, Ciclo Ideal de Rankine, Efeitos das Pressões na Caldeira e no Condensador e Principais Perdas e Irreversibilidades. Por fim, seu terceiro projeto tratará da otimização da geração de potência em um processo industrial utilizando conhecimentos de superaquecimento, reaquecimento e ciclo supercrítico, ciclo de potência a vapor regenerativo, aquecedores de água de alimentação, fluido de trabalho, cogeração, captura e armazenamento de carbono.

O que é e quais são as etapas de um ciclo de potência? Quais as características de um ciclo de Rankine? Como otimizar a geração de potência? As respostas a essas questões vão auxiliá-lo no desenvolvimento dos seus projetos. Vamos começar!

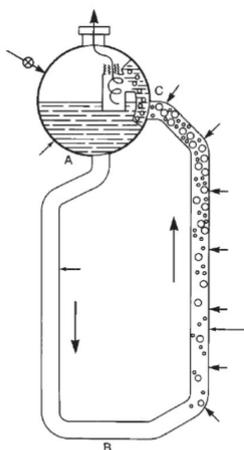
Sistemas de potência a vapor

Diálogo aberto

Como profissional de Engenharia Mecânica, você atuará com processos que requerem a produção de potência a partir do vapor, como na operação de caldeiras ou de turbinas em centrais elétricas, ou trabalhará com algum equipamento que utiliza a potência líquida produzida por um sistema de potência a vapor como os diversos equipamentos encontrados em indústrias de processamento. Portanto, é importante que você conheça os componentes necessários para a geração e distribuição de vapor, desde a entrada de água nesses sistemas até a saída do vapor e a produção líquida de potência.

Lembre-se de que você está inserido como um trainee em uma equipe multidisciplinar de projetos de engenharia de uma grande empresa. Você está incumbido, nesse primeiro momento, de otimizar um ciclo de potência de um equipamento que foi desativado pois suas condições de operação estavam muito abaixo do necessário. O engenheiro-chefe da divisão de projetos da empresa em que você é trainee iniciou, então, um projeto para avaliar as condições do equipamento apresentado na Figura 1.1 e solicitou a você que faça um relatório qualitativo identificando as partes constituintes do equipamento e que aponte as melhorias que podem ser realizadas, a fim de otimizar a produção de potência pelo equipamento.

Figura 1.1. | Esquema de circulação do equipamento gerador de vapor a ser avaliado



Fonte: Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

Quais componentes do equipamento apontado pertencem ao ciclo de geração de potência? Existem elementos desse ciclo que estão ausentes no equipamento avaliado?

As respostas desses questionamentos vão ajudá-lo a concluir o projeto e, para isso, você precisará conhecer as características e os equipamentos componentes dos sistemas de potência a vapor. Vamos começar!

Não pode faltar

Sem dúvida alguma, a Revolução Industrial surgida no final do século XVII só foi possível graças ao desenvolvimento de tecnologias que produzem o vapor e convertem parte de sua energia em potência útil. O vapor tem importância imensa e inegável para a indústria, pois é utilizado na destilação de combustíveis, em algumas reações químicas, em sistemas de trocadores de calor, em turbinas geradoras de potência entre outros sistemas a vapor. Além disso, o vapor apresenta uma importante função, também, nos lares domésticos e em alguns estabelecimentos comerciais, pois é a pressão do vapor a responsável por movimentar as válvulas controladoras de pressão de painéis de pressão que cozinham alimentos de forma rápida, por exemplo.

No tocante à realidade industrial, não é surpresa, portanto, que uma importante atribuição do profissional de engenharia seja a responsabilidade por suprir a demanda de vapor para a fábrica de forma apropriada e econômica. Para entender melhor a importância do vapor, podemos fazer um paralelo entre uma usina hidrelétrica e uma indústria de processo.

Uma usina hidrelétrica tem a função de converter a energia potencial gravitacional da água em energia elétrica. Para essa finalidade, a usina necessita de um reservatório de água com grande diferença de altura entre a superfície da água (topo) e a localização da turbina (fundo). Dessa forma, a energia potencial da água é convertida em energia cinética por meio da sua vazão através da turbina. Esse escoamento da água é realizado de tal modo a rotacionar um eixo na turbina capaz de converter parte da energia cinética em energia elétrica ou potência útil como parte de um sistema de geração de potência.

Na indústria de processo a situação é semelhante, à exceção de que não é viável possuir um grande reservatório de água, ou seja, a origem da energia que é convertida em potência provém de outra fonte. Nesse caso, os engenheiros perceberam que não era possível utilizar a água líquida para movimentar o eixo de uma turbina, mas sim o vapor de água – para simplificar, simplesmente escreveremos vapor ao invés de vapor de água, exceto

se dito o contrário. Como o vapor tem grande energia cinética, ela poderia ser captada por uma turbina e transformada em potência sendo fornecida prontamente para os processos industriais sem a necessidade de um grande desnível, como a queda d'água. A energia para vaporizar a água provém, na maioria das indústrias, da queima de algum tipo de combustível. Além disso, é importante ressaltar que essa energia do vapor também pode ser utilizada para outros sistemas, que não apenas de geração de potência, como o processo de aquecimento de fluidos industriais (destilação, trocadores de calor, reatores aquecidos entre tantos outros).



Exemplificando

Diversas fontes de energia podem ser empregadas para a vaporização da água. Por exemplo:

- Caldeiras podem utilizar a energia química liberada pela queima de biomassa, combustível fóssil ou ambos.
- Usinas nucleares aproveitam a energia liberada a partir de reações nucleares do urânio que são muito bem controladas.
- Usinas solares empregam a radiação solar para vaporizar o fluido de trabalho.
- Outras fontes utilizadas em menor escala incluem gases de exaustão, alguns resíduos químicos, resíduos municipais e energia geotérmica.

Nosso objetivo neste material é analisar e compreender o sistema de geração de potência a vapor e o seu estudo é realizado por meio de uma idealização do sistema de potência a vapor.



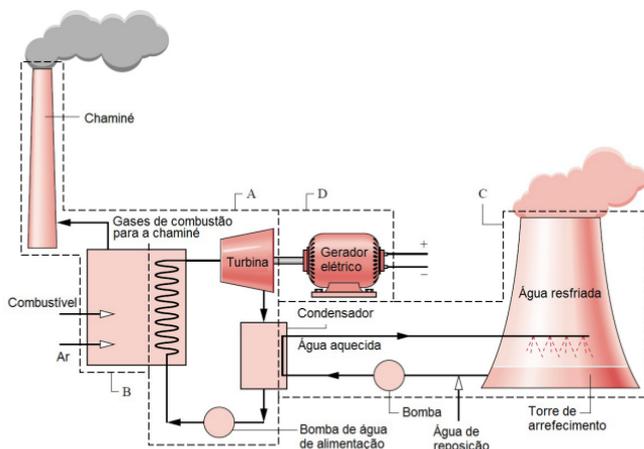
Assimile

O **Sistema de Potência a Vapor** consiste em uma instalação formada por um conjunto de equipamentos com a finalidade de **produzir potência líquida** a partir da queima de um combustível fóssil, da energia solar ou nuclear utilizando, na maioria das vezes, água como fluido de trabalho.

O primeiro estágio na análise de um sistema de geração de potência consiste em idealizar suas etapas constituintes em um modelo simples, pois a realidade do processo é muito complexa. Todos os modelos empregados não representam exatamente a realidade, mas suas idealizações fornecem informações valiosas para o entendimento dos ciclos termodinâmicos que regem o processo de geração de potência a vapor. É por meio das hipóteses

simplificadoras que podemos entender a realidade do sistema de potência a vapor e facilmente extrair informações sobre o seu desempenho, seus parâmetros de operação, entender como a variação desses parâmetros influenciam a geração de potência entre outras informações úteis. Um exemplo simples de um sistema de produção de potência a vapor é apresentado na Figura 1.2.

Figura 1.2. | Esquema de um simples sistema para geração de potência a vapor



Fonte: adaptada de Moran et al. (2003, p. 186).



Pesquise mais

Pesquise mais sobre a configuração de sistemas de potência a vapor cuja fonte de energia são nuclear, solar e geotérmica lendo as páginas 431 e 432 de Moran et al. (2011).

O esquema apresentado na Figura 1.2 é composto por quatro subsistemas identificados pelas letras A, B, C e D. Vamos estudar a importância de cada um deles para a produção de potência começando pelo subsistema B. Este é o local em que algum combustível específico é queimado para fornecer energia térmica necessária ao aquecimento e vaporização da água ou de outro fluido de trabalho. Uma vez que o vapor foi produzido no subsistema B, o qual consideraremos uma caldeira típica, ele percorre o subsistema A onde ocorre uma das principais etapas do processo: **a conversão do calor em trabalho**. O vapor sob alta temperatura e pressão produzidos em B são forçados através de uma turbina projetada de tal forma que na sua saída o vapor esteja com pressão e temperatura menores que na entrada. Dessa forma, a diferença

de energia do fluido entre a entrada e saída da turbina é aproveitada para movimentar o eixo do equipamento que fica acoplado a um gerador elétrico (subsistema D).



Refleta

Seria possível que a diminuição de pressão ao longo da turbina produza água no estado líquido juntamente com o vapor de baixa pressão, isto é, o vapor pode condensar dentro da turbina?

O vapor de baixa pressão que deixa a turbina é encaminhado para um condensador para ser condensado e resfriado através da troca de calor com água de arrefecimento. A água de arrefecimento aquecida é resfriada na torre de arrefecimento compreendida pelo subsistema C. O equipamento de arrefecimento consiste em uma torre cuja finalidade é particular à água quente em gotículas, ou seja, aumentar a área específica da fase líquida que entra em contato com o ar ambiente. Devido à diferença de temperaturas ocorre o resfriamento da água e o aquecimento do ar, e o aumento da área específica é fundamental para aumentar as taxas de troca térmica desse processo. Parte da água de arrefecimento é perdida para a atmosfera devido à evaporação natural e precisa ser reposta antes de ser recirculada através do condensador. A circulação de água é forçada por bombas instaladas apropriadamente ao longo das tubulações de processo. Se uma linha de processo for muito extensa, pode ser necessário mais de uma bomba na mesma linha a fim de suprir a perda de carga do escoamento e garantir a vazão necessária ao processo.

A qualidade da água de arrefecimento é um grande gerador de problemas na produção de potência a vapor, pois a presença de sais, gases dissolvidos e microrganismos na água acarretam corrosão e depósitos que prejudicam o desempenho do subsistema C.

Você pode estar se perguntando o porquê da necessidade do subsistema C. Posto que a água de arrefecimento não entra em contato com produtos do processo (ausência de contaminação), não seria possível captar água, digamos, de um rio, passá-la pelo condensador e descartá-la no rio novamente? A resposta é não! A água de arrefecimento deixa o condensador com uma temperatura elevada e não é própria para o despejo direto em corpos receptores hídricos. A prática de despejar água aquecida em um corpo receptor hídrico é conhecida como poluição térmica, que é proibida por lei no Brasil, podendo causar algum tipo de desequilíbrio ambiental devido à morte de fauna e flora.



Assimile

A Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e trata dos diversos tipos de poluição de corpos hídricos, incluindo a poluição térmica. Fica a cargo do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) fiscalizar o cumprimento da lei.

O subsistema B também tem preocupações ambientais muito fortes envolvidas, principalmente quando o combustível a ser queimado for fóssil ou nuclear, visto que seus resíduos são notoriamente poluentes e perigosos. A distinção ao problema ambiental encontra-se nas usinas movidas a energia solar. Estes sistemas de geração de potência a partir da radiação solar têm pouco impacto no ambiente sendo considerados, portanto, sistemas não-poluentes; mas ainda assim as instalações solares não estão presentes em muitos locais do mundo devido às razões diversas, muitas vezes de cunho político ou econômico.

Com base na discussão dos parágrafos anteriores, note que escolher o local para implantar uma usina de potência a vapor não é tarefa trivial. Os responsáveis devem estar atentos para a legislação ambiental vigente, disponibilidade de água, a qualidade da água disponível, a disponibilidade de combustível, sua segurança durante o processamento e as formas de transporte disponíveis, custos, questões políticas envolvidas, questões de cunho social, o controle de descargas poluentes para a atmosfera, corpos hídricos e resíduos sólidos, topografia, condições climáticas, entre outras.

O poder público tem grande peso na produção energética de um país ao fornecer subsídios que viabilizem a operação econômica de uma usina deste segmento. Além disso, o subsídio pode ser válido para a operação com um tipo específico de combustível, digamos, a energia solar. Dessa maneira, políticas públicas podem ser criadas visando um sistema energético menos dependente de combustíveis fósseis, menos poluidor de resíduos, com matriz energética mais versátil entre outras características.



Pesquise mais

Pesquise mais sobre como alguns parâmetros que impactam na otimização de um sistema de potência a vapor são selecionados visando a melhoria do seu desempenho. Leia as páginas 273-275 de Rocco e Morabito (2012).

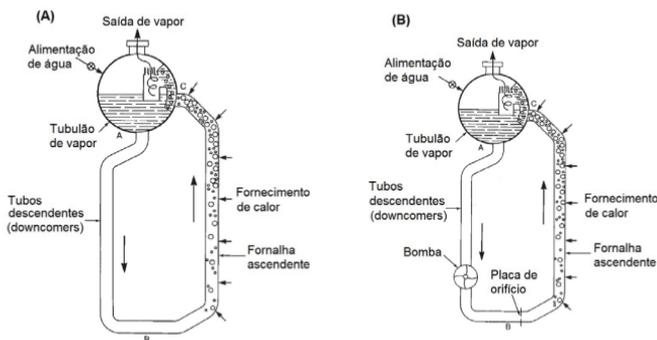
Neste momento, gostaríamos de chamar a sua atenção para a principal utilidade do vapor, que é a produção de energia elétrica. A necessidade por energia elétrica tem aumentado à medida que a quantidade de consumidores também

aumenta, isto é, a industrialização e o aumento populacional, porém a distribuição de energia elétrica praticamente não se alterou desde sua concepção, ocasionando sobrecarga da rede distribuidora, falta de energia em regiões localizadas, perdas econômicas e problemas de segurança. Obviamente esses problemas devem ser abordados e resolvidos para garantir um fornecimento adequado, confiável e barato tanto para as indústrias e comércio quanto para a população. Outra preocupação com o fornecimento de energia elétrica é a sua fonte de energia, atualmente muito dependente de fontes não renováveis. É preciso utilizar um sistema inteligente de transmissão e distribuição de energia que seja capaz de trabalhar com fontes diversas, renováveis, não renováveis e mistas, mantendo sua eficácia nos períodos de alta e de baixa demanda energética. Além disso, essa rede de distribuição energética deve ser capaz de assimilar a demanda elétrica que os carros elétricos exigirão num futuro próximo sem que, com isso, os custos da energia sofram aumento excessivo.

O sistema de potência a vapor como um todo sofreu avanços incríveis desde sua primeira concepção em 200 a.C. por um grego chamado Hero. Atualmente, o sistema de potência pode ser considerado como uma das aplicações mais complexas já desenvolvidas pelo ser humano. A escolha pela água como fluido de trabalho mais utilizado se deve ao fato da água estar disponível abundantemente em diversas regiões e do vapor produzido não ser tóxico. A produção de vapor pode variar muito entre os sistemas de potência, indo desde uma vazão mássica de apenas **0,1 kg/s** até mais de uma tonelada por segundo com o vapor podendo apresentar até mais de 30 MPa e temperaturas de 600 °C ou mais.

A conversão do calor em trabalho é uma etapa fundamental dos sistemas de potência a vapor, e anteriormente dissemos que ela ocorre no subsistema B da Figura 1.2. Vamos olhar mais de perto esse tipo de subsistema. Para isso, observe a Figura 1.3, que apresenta dois tipos distintos de subsistemas B.

Figura 1.3 | Sistemas de geração de potência a vapor com circulação natural (A) e forçada (B)



Fonte: adaptada de Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

Como podemos observar na Figura 1.3 existem dois tipos de sistemas para a vaporização da água. Na Figura 1.3 (A) não há mecanismo propelente do fluido e todo o movimento de convecção é natural; já na Figura 1.3 (B) existe uma bomba que impulsiona o fluido ainda na sua fase líquida e a diferença de pressão entre a bomba e a placa de orifício controla a vazão. Ambos os sistemas apresentam em comum a produção contínua de vapor, a presença de um tubulão (parte grande e cilíndrica das caldeiras) por onde a água é alimentada no estado líquido e separa-se do vapor produzido, além da presença dos tubos descendentes por onde o fluido de trabalho circula sem aquecimento (segmento AB). Além disso, ambos os sistemas possuem uma fornalha que é a parte da caldeira responsável pelo recebimento do combustível, sua mistura com ar e combustão propriamente dita, formando os gases quentes que irão transferir sua energia para o aquecimento e vaporização da água no segmento BC com a formação de vapor, ilustrado como bolhas na Figura 1.3 (A) e (B).



Assimile

O segmento BC na Figura 1.3 (A) e (B) é composto por uma mistura de água líquida e vapor. Como a água é mais densa que o vapor, naturalmente a gravidade restringe seu movimento pela fornalha ascendente ao passo que o vapor produzido é separado e deixa a fornalha pela porção superior, estando aquecido ou até mesmo superaquecido dependendo da configuração do equipamento (altura, pressão de operação, taxa de fornecimento de calor e área de seção transversal para escoamento dos fluidos).

Vamos refletir um pouco sobre as informações que acabamos de ler.



Refleta

O que aconteceria com o desempenho do sistema de potência a vapor da Figura 1.3 se a pressão de operação fosse elevada? E se na fornalha fosse queimado um combustível capaz de fornecer maior taxa de calor ao sistema?

Difícilmente um sistema de vapor será constituído por um único caminho para circulação do fluido de trabalho e, ainda, dificilmente o processo necessitará de vapor em uma única pressão-temperatura específica. Normalmente os processos possuem vários equipamentos distintos que requerem vapor a diferentes pressões e temperaturas. Nestes casos, como fazer a distribuição da energia de vapor?

Uma prática usual consiste em produzir o vapor na sua condição mais rigorosa requerida pelos processos. Por exemplo, imagine uma empresa de papel e celulose que necessita de vapor a 63 MPa para o processo de cozimento dos cavacos de madeira, vapor a 42 MPa para os processos de geração de potência (isto é, vapor que alimenta uma turbina e um gerador elétrico), vapor a 11 MPa para os processos de fabricação de papel e vapor com 0,2 MPa para outros processos. Existem várias maneiras de distribuir a potência de vapor necessária a esses processos, sendo que uma delas consiste em utilizar duas caldeiras, ou seja, dois sistemas de potência de vapor.

Uma caldeira seria a responsável por queimar combustível e biomassa residual dos processos de papel e celulose para produzir vapor com uma pressão maior do que a máxima necessária, isto é, vapor a 70 MPa para alimentar os processos de cozimento a 63 MPa. Essa diferença de pressão é necessária pois o escoamento do vapor entre seu ponto de geração e o local de consumo (tanque digestor) acarreta a perda de calor e a perda de carga (pressão) devido ao escoamento do fluido e aos acidentes (cotovelos, juntas, flanges, etc.) nas tubulações. Uma vez que o vapor realiza o cozimento dos cavacos, ele deixará a etapa de cozimento obrigatoriamente a uma baixa temperatura e pressão, podendo formar uma mistura de água e vapor, inclusive, que pode ser reaquecida e re- evaporada para, digamos, formar o vapor de 42 MPa necessário à turbina.

Continuando com o nosso exemplo, a segunda caldeira seria responsável por produzir o vapor necessário aos processos de baixa pressão (11 MPa e 0,2 MPa). A caldeira atuaria produzindo o vapor de 11 MPa, e por meio da queda de pressão na linha de processo e de válvulas redutoras de pressão, a distribuição de energia para os demais processos pode ser ajustada em 0,2 MPa.



Pesquise mais

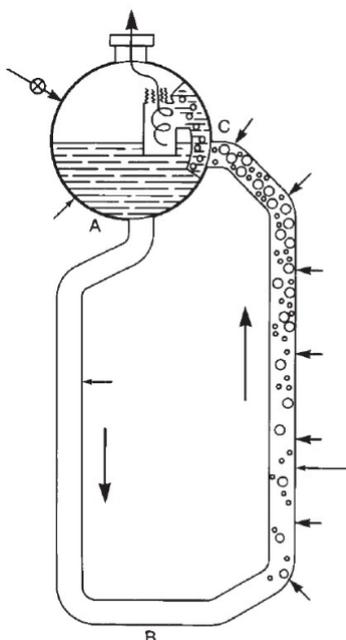
Uma infinidade de arranjos de distribuição de energia de vapor é possível e o engenheiro responsável pelo projeto deve analisar muitas variáveis até definir o *layout* industrial. Leia mais sobre a distribuição de vapor em uma indústria, nesse caso em uma petroquímica, lendo as páginas 25-32 em Magalhães (2006).

Sem medo de errar

Lembre-se de que você é recém-formado em Engenharia Mecânica e foi contratado como trainee para atuar no departamento de projetos de uma grande empresa. Você atua juntamente com profissionais de outras áreas

e, neste momento, foram escalados pelo engenheiro-chefe para avaliar e otimizar o ciclo de potência do equipamento apresentado na Figura 1.1, o qual foi desativado devido a sua perda de eficiência ao longo dos anos de uso.

Figura 1.1 | Esquema de circulação do equipamento gerador de vapor a ser avaliado

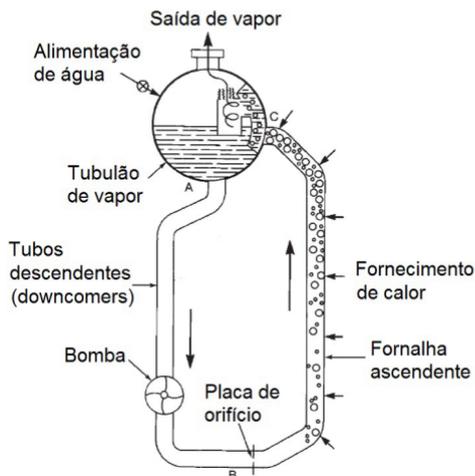


Fonte: Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

A primeira etapa do projeto consiste em avaliar o equipamento para, a partir daí, sugerir as mudanças de otimização necessárias. O equipamento apresentado consiste em um conjunto de tubulão e tubos de circulação de água para produção de vapor. O caminho AB representa o conjunto de tubos que encaminham a água líquida do reservatório (tubulão) para a fornalha onde será vaporizada (segmento BC). O segmento BC consiste em um conjunto de tubos que são aquecidos pela energia proveniente da queima de algum combustível, sendo as setas pequenas da Figura 1.1 indicativas das taxas de calor. As bolhas indicadas nesse equipamento ilustram que vapor é gerado e deixa o sistema pela parte superior do tubulão após a água não evaporada (água de arraste) e condensada serem separadas.

Você pode notar que não existe a presença de uma bomba, ou sistema de bombas, para realizar a movimentação do fluido. Uma das sugestões para otimizar a produção do vapor seria a instalação de uma bomba no segmento AB, conforme apresenta a Figura 1.4.

Figura 1.4 | Estrutura do equipamento gerador de vapor após ser otimizado



Fonte: adaptada de Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

É necessária a instalação de uma placa de orifício após a posição da bomba pois a queda de pressão entre ambos fornece o controle de vazão do processo. Além disso, encurtar as seções AB e BC faz com que a perda de carga do escoamento e a perda de calor para o ambiente sejam diminuídas, favorecendo, portanto, a produção de vapor. O encurtamento, no entanto, não pode ser exagerado devido às restrições de vazões mínimas, perda de carga, aumento da pressão de operação, separação da mistura líquido/vapor na fornalha ascendente entre outras considerações.

Uma última proposta que pode ser realizada neste equipamento, consiste em modificar a fornalha ascendente. Pode-se considerar instalar uma fornalha na qual o combustível queimado possa ser variado, por exemplo, por um óleo de alto poder calorífico quando uma maior necessidade de vapor for necessária. Para que o equipamento produza uma maior quantidade de vapor, é necessário maior fornecimento de energia de vaporização e isso pode ser atingido aumentando o comprimento da fornalha (o que é limitado uma vez que o equipamento já existe) ou fornecendo calor via combustível, que foi a sugestão que acabamos de propor.

Esta é uma das formas de otimização possível neste equipamento. A partir da análise feita, você considerou transformar a convecção natural em forçada, pela introdução de uma bomba (melhoria da eficiência de troca térmica) e a modificação dos segmentos AB e BC, que auxiliam na produção de uma quantidade maior de vapor com maior pressão, conforme foi requisitado pelo engenheiro-chefe. Bom trabalho!

Projeto preliminar de um novo sistema de potência a vapor

Descrição da situação-problema

Um cliente da empresa na qual você trabalha solicitou um projeto para o desenvolvimento de um novo sistema de geração de potência a vapor para sua indústria. Neste primeiro momento, você fará uma análise preliminar e descreverá quantas válvulas redutoras de pressão e quantas caldeiras serão necessárias ao processo (subsistema A) enquanto o restante da sua equipe elabora uma análise dos demais subsistemas. Sabe-se que o cliente necessita de vapores nas seguintes pressões, para seus processos: 63 MPa, 42 MPa, 11 MPa e 2 MPa. Sabe-se, também, que as caldeiras disponíveis podem produzir vapor a 72, 40, 30 e 15 MPa e que as válvulas redutoras trabalham reduzindo até 15 MPa de cada vez.

Resolução da situação-problema

Existem várias possibilidades para a linha de distribuição de potência; vejamos um exemplo constituído por duas caldeiras, uma de 72 MPa (alta pressão) e outra de 15 MPa (baixa pressão).

A primeira caldeira será para a linha de alta pressão produzindo vapor 72 MPa. A perda de carga entre a caldeira e o processo de 63 MPa reduzirá um pouco a pressão e o que não for reduzido pelo escoamento deverá ser ajustado por uma válvula redutora de pressão. O vapor que deixar este processo pode ser reaquecido na própria caldeira para fornecer o vapor na linha de 42 MPa sendo necessário, portanto, uma segunda válvula redutora de pressão, que calibrará a pressão necessária.

A segunda caldeira deverá ser instalada na linha de baixa pressão (15 MPa). Uma válvula redutora precisa ser instalada na linha a fim de ajustar a pressão para o nível mais baixo de 2 MPa, já a seção do processo que necessita de 11 MPa pode ser atingida mediante perda de carga com o próprio escoamento e uma segunda válvula redutora para ajustar a pressão na entrada do processo.

Com isso, a análise preliminar do sistema de distribuição de vapor consiste em duas caldeiras e 4 válvulas redutoras de pressão. As informações aqui analisadas deverão ser agrupadas com os demais subsistemas a fim de compor o novo sistema de geração de potência.

1. A água é o fluido de trabalho mais utilizado para a produção de potência, devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade. Para isso, é necessário vaporizar a água e submeter o vapor a uma série de etapas que tem o objetivo de transformar seu calor em trabalho.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente todas as etapas presentes em um típico sistema de potência a vapor.

- a) Alimentação de água, uso da energia solar somente para vaporização da água alimentada, encaminhamento do vapor para uma turbina acoplada a um gerador, bombeamento de água para realimentação do processo e resfriamento da água de arrefecimento.
- b) Alimentação de água, aquecimento da água com um combustível, uso da energia solar somente para vaporização da água alimentada, encaminhamento do vapor para uma turbina acoplada a um gerador, bombeamento de água para realimentação do processo e resfriamento da água de arrefecimento.
- c) Alimentação de água, queima de combustível para aquecimento e vaporização da água alimentada, encaminhamento do vapor para uma turbina acoplada a um gerador, condensação do vapor de saída da turbina com água de arrefecimento, bombeamento da água para realimentação do processo e despejo da água de arrefecimento em um corpo receptor hídrico.
- d) Alimentação de água, queima de combustível para aquecimento e vaporização da água alimentada, encaminhamento do vapor para uma turbina acoplada a um gerador, condensação do vapor de saída da turbina na torre de arrefecimento e bombeamento do condensado para realimentação do processo.
- e) Alimentação de água, queima de combustível para aquecimento e vaporização da água alimentada, encaminhamento do vapor para uma turbina acoplada a um gerador, condensação do vapor de saída da turbina com água de arrefecimento, bombeamento do condensado para realimentação do processo e resfriamento da água de arrefecimento.

2. Um sistema de geração de potência em uma indústria provém da energia armazenada no vapor de água. Para que isso seja possível, a água deve ser aquecida até a sua temperatura de ebulição, vaporizada e possivelmente superaquecida. O fornecimento da energia necessária a esse processo provém de diversas fontes distintas, cuja escolha depende fortemente de aspectos econômicos e políticos. Tais fontes energéticas são apresentadas nos itens abaixo.

I – Biomassa.

II – Combustíveis fósseis.

III – Energia solar.

- IV – Resíduos de processos químicos.
- V – Gases de exaustão de processos químicos.
- VI – Energia nuclear.
- VII – Incineração de resíduos municipais.
- VIII – Energia geotérmica.
- IX – Biocombustíveis.
- X – Energia eólica.
- XI – Células combustíveis.

Assinale a alternativa que apresenta os itens referentes apenas às fontes de energia para os sistemas de potência a vapor.

- a) I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII, apenas.
- b) I, II, VI e VII, apenas.
- c) I, III, V e VI, apenas.
- d) II, IV, VI, VII, VIII, IX e X, apenas.
- e) I, II, III, IX, X e XI, apenas.

3. As operações industriais são conduzidas visando a melhor eficiência monetária possível. Para isso, a torre de resfriamento de um processo de geração de potência a vapor foi desligada a fim de reduzir os custos com a operação deste equipamento e, dessa forma, melhorar a competitividade da empresa no mercado. Deste modo, o processo de geração de potência captaria água de arrefecimento diretamente de um córrego próximo às instalações industriais e, após o uso, seria devolvido ao mesmo corpo hídrico. Esta prática é comum em sistemas de geração de potência a vapor devido ao fato da água de arrefecimento não entrar em contato com nenhuma substância do processo, o que mantém a qualidade inicial da água e, portanto, possibilita o seu despejo em um corpo receptor hídrico diretamente após uso.

Assinale a alternativa que apresenta a correta análise sobre a decisão de desligar a torre de resfriamento.

- a) A decisão está correta, porém a justificativa está errada. A água de arrefecimento pode ser diretamente despejada em um corpo receptor hídrico após a realização de análises que comprovem que sua composição físico-química não se alterou desde o momento de sua captação.
- b) A decisão está correta, porém a justificativa está errada. A água de arrefecimento pode ser diretamente despejada em um corpo receptor hídrico após a realização de análises que comprovem a ausência de microrganismos patógenos.
- c) A decisão está errada e vai contra leis ambientais vigentes. É necessário resfriar a água de arrefecimento antes de despejá-la no corpo receptor hídrico pois, apesar da sua composição ser idêntica à do momento de captação, a temperatura elevada pode causar desequilíbrio ambiental do corpo hídrico.

- d) A decisão está errada e vai contra leis ambientais vigentes. É necessário resfriar a água de arrefecimento pois nesse processo ocorre a morte de microrganismos que porventura se desenvolveram na água e, também, a precipitação de impurezas. Somente então a lei permite seu despejo em um corpo receptor hídrico.
- e) A decisão está errada, pois desligar a torre de arrefecimento não irá melhorar a lucratividade da empresa, visto que esta perderá dinheiro por meio da depreciação do equipamento desativado.

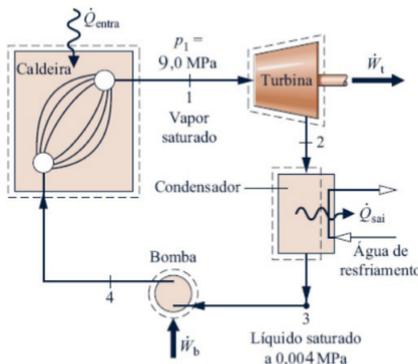
Ciclo de Rankine

Diálogo aberto

Você provavelmente já assistiu a algum filme antigo sobre o velho oeste no qual um maquinista de trem alimenta carvão em uma fornalha. A queima desse carvão irá aquecer e vaporizar a água que fica armazenada na locomotiva, aquele primeiro grande vagão do trem que libera bastante fumaça. Esse procedimento tem o objetivo de utilizar a energia armazenada no vapor para impulsionar o movimento de todo o trem. Esta série de etapas, quando idealizadas, aproximam-se do que chamamos de ciclo de Rankine, que é o nosso assunto nesta seção. É importante citar que praticamente todas as indústrias utilizam do ciclo de Rankine para suprir a demanda de vapor de seus processos produtivos (na destilação e em trocadores de calor, por exemplo) ou em turbinas para produção de energia elétrica, por exemplo.

Lembre-se de que você está atuando como trainee em uma equipe de projetos de uma grande empresa de engenharia. Neste momento, o projeto no qual você foi alocado envolve otimizar o ciclo de Rankine de uma indústria, pois a eficiência de geração de potência do ciclo diminuiu ao longo dos anos devido à deterioração de alguns equipamentos, falta de manutenção adequada, inspeções irregulares e outros fatores que justificaram a sua modificação. No projeto de reestruturação desta seção da indústria, foi-lhe solicitado avaliar a nova eficiência do processo de produção de 150 MW de potência considerando o ciclo Rankine ideal apresentado na Figura 1.5, assim como quantificar a vazão mássica de vapor oferecida pelo sistema.

Figura 1.5 | Ciclo de Rankine ideal



Fonte: adaptada de Moran et al. (2018, p. 361).

Você pode considerar que a entalpia e a entropia do vapor saturado a 9 MPa são, respectivamente, $2742,1 \text{ kJ/kg}$ e $5,6772 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ e que as propriedades do fluido saturado a 0,004 MPa são: $h_{\text{liq}}^{\text{sat}} = 121,46 \text{ kJ/kg}$, $h_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 2554,4 \text{ kJ/kg}$, $S_{\text{liq}}^{\text{sat}} = 0,4226 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$, $S_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 8,4746 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ e $\nu = 1,0040 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Quais considerações idealizam o ciclo de Rankine? Quais equações são válidas a fim de determinar a eficiência desse ciclo? As respostas dessas perguntas te ajudarão a resolver este projeto e, para isso, você precisa conhecer as idealizações do ciclo de Rankine, suas perdas e irreversibilidades, assim como quais equações são válidas a fim de determinar a eficiência do ciclo. Vamos aprender sobre estes assuntos nas próximas páginas. Bom estudo!

Não pode faltar

O sistema de geração de potência a vapor constitui um importante sistema utilizado em indústrias como usinas de álcool e açúcar, refinarias de petróleo, companhias de papel e celulose entre muitas outras. Essa importância se deve ao fato desse sistema fornecer a energia necessária aos equipamentos de processo da indústria mediante a queima de um combustível apropriado. Como a combustão do combustível impacta diretamente nos custos de operação (quanto mais combustível for queimado para fornecer a mesma quantidade de vapor, menor o lucro) e as etapas que constituem o sistema de geração de potência a vapor, ou seja, transferência de calor de uma fonte de energia para o fluido de trabalho, expansão do fluido de trabalho na turbina – a partir da elevação de sua temperatura e pressão –, condensação de vapor e bombeamento de condensado impactam diretamente no aproveitamento da energia de vapor, é necessário avaliar os sistemas de geração de potência a fim de identificar irreversibilidades e perdas de energia que possam ser mitigadas ou minimizadas. Dessa forma, melhora-se a eficiência do sistema de potência, aproveita-se uma maior quantidade de energia do vapor e a lucratividade da empresa cresce.

A análise da eficiência de um sistema de potência a vapor consiste em realizar balanços de massa e de energia aliados à segunda lei da Termodinâmica. Tais balanços podem ser aplicados no sistema global e em cada equipamento constituinte do processo de geração de vapor. O modelo termodinâmico que se origina desses balanços é denominado de ciclo Rankine.



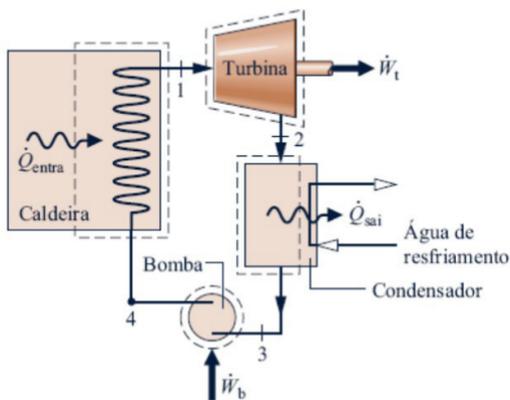
Assimile

O ciclo Rankine é um modelo termodinâmico que surge da aplicação de balanços de massa, energia e da segunda lei da termodinâmica para cada equipamento que constitui uma máquina de geração de potência

a vapor formada por trocador de calor (caldeira), turbina, condensador e por um sistema de bombeamento de água, nos quais as propriedades não variam ao longo do tempo, isto é, o sistema encontra-se em regime estacionário.

Vamos analisar o sistema para geração de potência a vapor apresentado na Figura 1.6. Desconsiderando perda de calor para o ambiente, a direção indicada pelas setas é a direção positiva para a transferência de energia e os números de 1 a 4 representam os estados de referência do fluido de trabalho no ciclo em análise.

Figura 1.6 | Transferência de calor e trabalho em sistema de geração de potência a vapor



Fonte: Moran et al. (2018, p. 358).

O estado 1 é formado por vapor produzido na caldeira e caracterizado por um estado de elevada pressão e temperatura. O vapor se expande ao longo da turbina, cedendo parte de sua energia para a produção de trabalho útil por meio da rotação do eixo do equipamento. Ao deixar a turbina no estado 2, o vapor encontra-se com temperatura e pressão menores, podendo, inclusive, apresentar-se condensado – também denominado de título ou de qualidade.

A qualidade do vapor na saída da turbina é determinada termodinamicamente, isto é, a condição de equilíbrio entre o vapor e o condensado na saída da turbina é calculada por meio de uma propriedade termodinâmica (considerando a saturação). Normalmente, a propriedade escolhida é a entropia S , pois permite avaliar os casos ideais (isentrópicos) e o caso real (com irreversibilidades). A expressão que determina a qualidade do vapor é dada por:

$$x_2 = \frac{S_2 - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}}{S_{\text{vap}}^{\text{sat}} - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}}$$



Refleta

A quantidade de condensado formado durante o processo de expansão na turbina é muito importante para determinar a eficiência da turbina e suas condições de operação. Como é possível utilizar um balanço de massa na turbina para determinar as vazões de condensado e vapor?

Para simplificação, vamos considerar sempre que não há condensação na turbina, exceto se dito o contrário. O balanço de energia ao redor da turbina (região tracejada apresentada na Figura 1.6) fornece que:

$$0 = \dot{Q}_{cv} - W_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Como a turbina é um equipamento horizontal, a sua entrada e saída estão na mesma cota e a energia potencial gravitacional é anulada. Além disso, considera-se que a diferença de velocidade do fluido na entrada e saída do equipamento é desprezível, de modo que sua diferença é nula. Não há, também, perdas de calor para o ambiente. Dessa forma, o balanço energético se resume a:

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

Em que W_t é a potência gerada pela turbina (W); \dot{m} é a vazão mássica (kg/s) e h representa a entalpia específica nos estados 1 e 2 (kJ/kg) de entrada e saída, respectivamente.

Seguindo para o próximo equipamento do ciclo, realizamos um balanço de energia no condensador. Neste caso, o calor que é cedido pelo fluido de trabalho se iguala ao que é recebido pela água de resfriamento, desconsiderando as perdas para o ambiente. O balanço de energia é realizado sobre o fluido de trabalho, tal que vale a expressão:

$$\frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

Em que \dot{Q}_{sai} representa a quantidade de calor transferida por tempo pelo fluido de trabalho (W).

A bomba devolve a água no estado líquido para o trocador de calor a fim de ser vaporizada para um novo ciclo de geração. O processo requer o fornecimento de energia (\dot{W}_b) cujo balanço é:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_4 - h_3$$

Ao chegar no trocador de calor, o fluido recebe energia da caldeira de tal modo a aquecer e vaporizar a água novamente, completando o ciclo termodinâmico ou ciclo de Rankine. O balanço de energia no trocador de calor pode ser escrito por:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{entra}}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

Em que \dot{Q}_{entra} representa a energia recebida pelo fluido de trabalho por tempo (W).



Refleta

Para os balanços apresentados, reflita qual a diferença entre representar apenas o termo energético (\dot{Q} ou \dot{W}) ou a razão apresentada no lado esquerdo dos balanços $\left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \text{ ou } \frac{\dot{W}}{\dot{m}}\right)$?

A eficiência do ciclo é determinada avaliando a porcentagem de energia aproveitada, ou seja, convertida em trabalho líquido de saída (útil ou disponível), em relação à quantidade de calor que é fornecida ao ciclo, isto é, gerado pela caldeira. Lembre-se de que uma parte do trabalho produzido deve ser gasto no bombeamento do fluido. Dessa forma, como a quantidade total de energia que entra no sistema é igual à energia que deixa o sistema global, podemos escrever a eficiência térmica do ciclo de potência como:

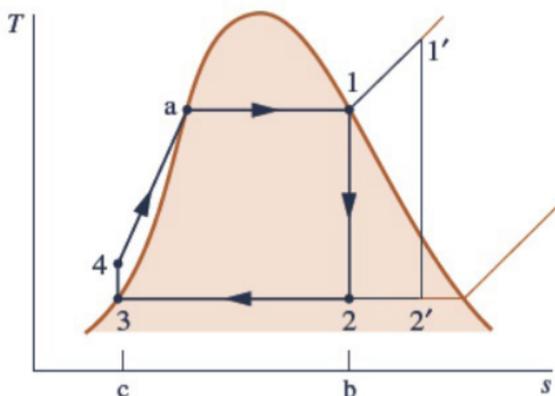
$$\eta = \frac{\text{Trabalho líquido gerado}}{\text{Energia total fornecida}} = \frac{(\dot{W}_t - \dot{W}_b) / \dot{m}}{\dot{Q}_{\text{entra}} / \dot{m}} = \frac{(\dot{Q}_{\text{entra}} - \dot{Q}_{\text{sai}}) / \dot{m}}{\dot{Q}_{\text{entra}} / \dot{m}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$

Caro aluno, observe que o equacionamento desenvolvido até o momento depende fundamentalmente dos estados 1 a 4 do fluido de trabalho (água). Isto quer dizer que podemos avaliar a eficiência do ciclo por meio dos balanços apresentados, a partir do conhecimento das propriedades termodinâmicas do fluido nos estados mencionados, tanto para o processo ideal quanto para o real no qual irreversibilidades e perdas estão presentes.

Vamos, agora, analisar o ciclo de Rankine na ausência de irreversibilidades e, na sequência, investigar quais perdas se fazem presentes em um ciclo real e suas implicações.

Considere um ciclo ideal de Rankine quando não há presença de forças dissipativas, como a ausência de fricção (atrito) no escoamento do fluido. Além disso, outras irreversibilidades que devem estar ausentes são: ausência de perda de calor para o ambiente, conversão de energia em trabalho isentropicamente pela turbina e bombeamento ideal. Dessa forma, podemos descrever o ciclo ideal de Rankine por meio de quatro processos internamente reversíveis que são apresentados graficamente pelo diagrama T-s, na Figura 1.7.

Figura 1.7 | Diagrama T-s para o ciclo de Rankine ideal



Fonte: Moran et al. (2018, p. 361).

Processo do estado 1 para 2: processo de expansão isentrópica na turbina até a pressão do condensado.

Processo do estado 2 para 3: processo de transferência de calor a pressão constante no condensador com formação de água saturada.

Processo do estado 3 para 4: processo de compressão isentrópica na bomba (adiabática) até a pressão da caldeira (o comprimento da linha 3-4 é muito pequeno e foi ampliado para facilitar a visualização na Figura 1.7).

Processo do estado 4 para 1: processo de transferência de calor a pressão constante na caldeira; de 4 para o ponto *a* tem-se o aquecimento do líquido subresfriado até a saturação; de *a* para 1 ocorre sua vaporização; e quando o vapor é superaquecido e atinge o estado 1' condensando até 2' na saída da turbina, temos uma melhoria no desempenho do ciclo, chamado de superaquecimento.

Normalmente a entalpia do estado 2 é desconhecida pois não sabemos a quantidade de vapor que condensa durante o processo de expansão na turbina. A determinação dessa propriedade pode ser feita utilizando uma regra de mistura e a qualidade do vapor conforme apresentado na seguinte expressão:

$$h_2 = (1 - x_2) \cdot h_{\text{liq}}^{\text{sat}} + x_2 \cdot h_{\text{vap}}^{\text{sat}}$$



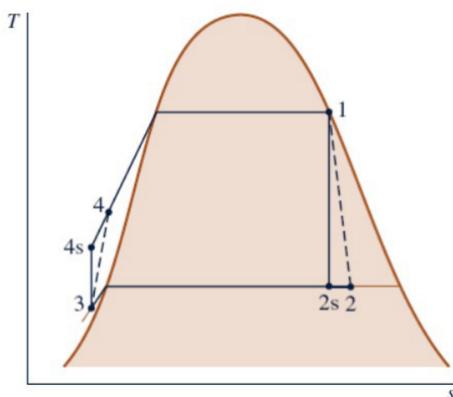
Pesquise mais

Conheça mais sobre os quatro processos que compõem o ciclo ideal de Rankine lendo as páginas 62-64.

STUCHI, G. A. D.; TACONELLI, M.; LANGHI, V. A. B. **Geração termelétrica:** principais componentes e tipos de centrais termelétricas. 2015. 130 f. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

No ciclo de Rankine, as irreversibilidades atuam nos processos de 1 para 2 e de 3 para 4, pois os processos que produzem e utilizam o trabalho não são isentrópicos devido às forças dissipativas do sistema. Nos ciclos reais, o comprimento da linha 3-4 é mais acentuado devido à necessidade de a bomba fornecer energia suficiente para vencer o atrito do escoamento. Além disso, quanto menor for a ineficiência da turbina, maior será a inclinação da linha 1-2 (ou 1'-2') no sentido anti-horário conforme mostrado na Figura 1.8.

Figura 1.8 | Ciclo de Rankine com a presença de forças dissipativas



Fonte: Moran et al. (2018, p. 366).

Observe a Figura 1.8 e note que as forças dissipativas ocasionam aumento na entropia do ciclo (deslocamento do ponto 2 e 4 para a direita). Dessa forma, a eficiência de um ciclo ideal pode ser determinada pela equação já apresentada, utilizando as entalpias do processo isentrópico e a eficiência do processo real utilizando as entalpias correspondentes ao ciclo 1-2-3-4-1.



Exemplificando

Considere a produção de potência por vapor a 8600 kPa e 500 °C ($h_1 = 3391,6$ kJ/kg) em uma turbina cujo vapor de descarga (título de 80,47%) encontra-se saturado a 10 kPa ($h_{liq}^{sat} = 191,8$ kJ/kg e $h_{vap}^{sat} = 2584,8$ kJ/kg). O condensador produz líquido saturado

na mesma pressão sendo, então, bombeado novamente para a caldeira. Compare a eficiência do ciclo de Rankine ideal com o real, considerando eficiência de 0,75 para a turbina e para a bomba. Considere o trabalho da bomba igual a 8,7 kJ/kg e que a caldeira introduz 3191,1 kJ/kg de energia no processo ideal (adaptado de SMITH et al., 2011).

Solução:

O trabalho isentrópico produzido pela turbina (ciclo ideal) é determinado pela variação de entalpia do fluido na condição de 10 kPa e de 8600 kPa, portanto:

$$\dot{W}_t = \Delta h = h_2 - h_1 = [(1 - x_2)h_{liq}^{sat} + x_2 \cdot h_{vap}^{sat}] - h_1$$

$$\dot{W}_t = (0,1953 \cdot 191,8 + 0,8047 \cdot 2584,8) - 3391,6 = -1274,2 \text{ kJ/kg}$$

O trabalho líquido gerado pelo ciclo de Rankine ideal é a soma do trabalho da turbina e da bomba, isto é:

$$W_{ciclo}^{ideal} = -1274,2 + 8,7 = -1265,5 \text{ kJ/kg}$$

A eficiência é determinada por:

$$\eta^{ideal} = \frac{W_{ciclo}^{ideal}}{Q_{caldeira}} = \frac{1265,5}{3191,1} = 39,66\%$$

Para o ciclo Rankine com irreversibilidades, temos:

$$W_{ciclo}^{real} = -0,75 \cdot 1274,2 + \frac{8,7}{0,75} = -944,05 \text{ kJ/kg}$$

E o calor transferido pela caldeira se torna:

$$Q_{caldeira} = 3391,6 - (191,8 + 11,6) = 3188,2 \text{ kJ/kg} .$$

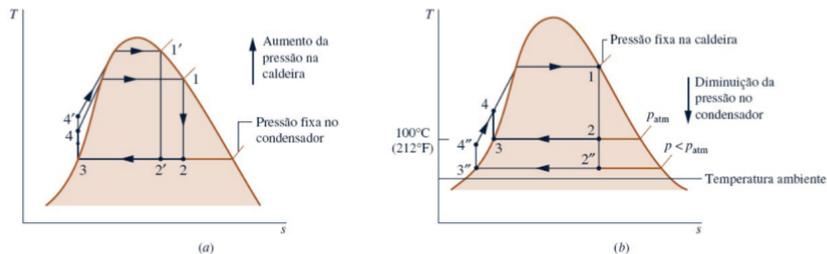
Assim, a eficiência real é determinada pela expressão a seguir:

$$\eta^{real} = \frac{W_{ciclo}^{real}}{Q_{caldeira}} = \frac{944,05}{3188,2} = 29,61\%$$

Notamos, portanto, que as irreversibilidades causam diminuição da eficiência do ciclo, já que parte da energia é utilizada para vencer as forças dissipativas.

Observe que do exemplo anterior podemos melhorar a eficiência tanto do ciclo Rankine quanto do ciclo ideal modificando as condições de operação da caldeira e do condensador. Para analisarmos esses efeitos sobre a eficiência, observe a Figura 1.9 que apresenta o ciclo ideal de Rankine para a geração de vapor considerando (a) diferente temperatura na caldeira e (b) diferente pressão no condensador.

Figura 1.9 | Efeito no ciclo ideal de Rankine considerando modificações nas operações da (a) caldeira e do (b) condensador



Fonte: Moran et al. (2018, p. 364).

No diagrama (a) da Figura 1.9 o ciclo ideal de Rankine marcado com os números 1'-2'-3'-4'-1' opera com pressão na caldeira maior que o ciclo ideal 1-2-3-4-1, e ambos apresentam a mesma pressão no condensado. Essa diferença na caldeira proporciona vapor com maior saturação (1' está em uma temperatura acima da temperatura do ponto 1) favorecendo, portanto, a conversão de energia na turbina e, dessa maneira, melhorando a eficiência do ciclo total.

Para o diagrama (b) da Figura 1.9, a operação da caldeira é idêntica para os ciclos 1-2-3-4-1 e 1''-2''-3''-4''-1'', porém a pressão no condensado é menor neste último ciclo – menor do que a pressão atmosférica. Dessa maneira, a rejeição de calor pelo ciclo se dá para um reservatório frio com temperatura menor do que no ciclo 1-2-3-4-1, o que favorece a eficiência do ciclo de Rankine.

O impacto de tais efeitos sobre a eficiência pode ser facilmente observado a partir da definição de eficiência do ciclo de Rankine, a qual é dada pela expressão:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{\text{entra}}} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

Em que T_F representa a temperatura absoluta da fonte fria (reservatório para o qual o condensador transfere calor), T_Q representa a temperatura absoluta da fonte quente (reservatório do qual a caldeira recebe calor) e \dot{W} representa o trabalho líquido produzido no ciclo.

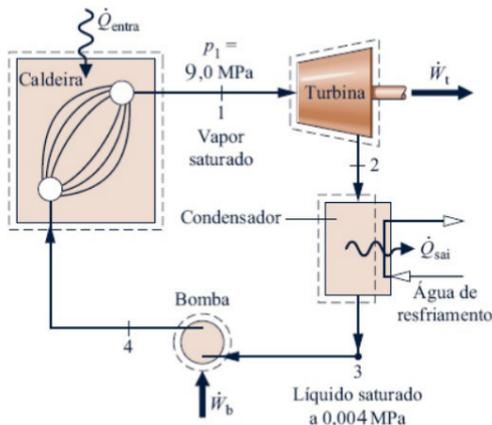


Refleta

Como as diferentes condições de operação da caldeira e do condensador mostradas na Figura 1.9 refletem nas temperaturas T_F e T_Q ? E como isso influencia na eficiência do ciclo de Rankine?

Lembre-se de que você está atuando como trainee em uma empresa de engenharia e, neste momento, irá solucionar o projeto de uma empresa que está modificando seus processos a fim de melhorar sua eficiência na produção de 150 MW de potência utilizando vapor. O engenheiro-chefe da sua equipe de trabalho o encarregou de otimizar o ciclo ideal de Rankine para um sistema de geração de potência a vapor, apresentado na Figura 1.5, sistema este que será instalado na empresa.

Figura 1.10 | Ciclo de potência a vapor otimizado com reaquecimento



Fonte: adaptada de Moran et al. (2003, p. 199).

Como o ciclo em questão pode ser considerado isento de irreversibilidades e de forças dissipativas, podemos determinar sua eficiência considerando que: as propriedades do fluido no regime permanente, a turbina e a bomba operam adiabaticamente e podemos desprezar, também, a energia cinética e potencial, pois, são muito pequenas se comparadas com a entalpia do fluido.

Para determinar a eficiência do ciclo precisamos conhecer as entalpias de cada estado do fluido. Conhecemos a entalpia do estado 1 pelas condições de projeto (vapor saturado à 9 MPa). Para o estado 2, precisamos conhecer a sua qualidade dada pela expressão:

$$x_2 = \frac{S_2 - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}}{S_{\text{vap}}^{\text{sat}} - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}} = \frac{5,6772 - 0,4226}{8,4746 - 0,4226} = 0,6526$$

E a entalpia nesse estado é fornecida pela seguinte regra de mistura:

$$h_2 = (1 - x_2) \cdot h_{\text{liq}}^{\text{sat}} + x_2 \cdot h_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 0,3474 \cdot 121,46 + 0,6526 \cdot 2554,4 = 1709,20 \text{ kJ/kg}$$

Após o condensador (3), o líquido é saturado e conhecemos sua entalpia de líquido saturado 0,004 MPa das condições de projeto (h_{liq}^{sat}). Para o líquido saturado bombeado (4), podemos determinar sua entalpia substituindo a definição de trabalho na seguinte expressão:

$$h_4 = h_3 + \frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_3 + \nu_3(p_4 - p_3) = 121,46 + (1,0040 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})(9 - 0,004) \text{ MPa} \left| \frac{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ MPa}} \right|$$

Portanto,

$$h_4 = 130,49 \text{ kJ/kg}$$

Neste momento, temos todas as propriedades necessárias para determinar a eficiência do ciclo a partir da sua definição, isto é:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{l\text{quido}}}{\dot{Q}_{\text{entra}}} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_{\text{entra}}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

Note que as diferenças entálpicas apresentadas na expressão anterior são referentes às condições de entrada e saída de cada equipamento. Dessa forma, substituindo as entalpias, a eficiência do ciclo ideal de Rankine vale:

$$\eta = \frac{(2742,1 - 1709,2) - (130,49 - 121,46)}{2742,1 - 130,49} = 0,3920$$

A vazão mássica de vapor produzido no ciclo pode ser obtida subtraindo o balanço de energia do da turbina, resultando em:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_t}{h_1 - h_2} - \frac{\dot{W}_p}{h_4 - h_3} = \frac{150 \text{ MW} \cdot \left| \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \right|}{[(2742,1 - 1709,2) - (130,49 - 121,46)] \text{ kJ/kg}} = 527410,71 \text{ kg/h} = 527 \text{ ton/h}$$

Portanto, baseado nas hipóteses de que o ciclo Rankine para geração de potência a vapor opera idealmente, você foi capaz de determinar a quantidade de vapor necessária para produzir 150 MW de potência com aproximadamente 40% de eficiência e, com isto, encerra seu projeto. Bom trabalho!

Avançando na prática

Avaliação de um novo ciclo de potência a vapor

Descrição da situação-problema

Você trabalha em um escritório do governo que analisa o pedido de patentes dos mais variados produtos e processos também. Neste momento,

você precisa decidir se deve dar prosseguimento para análise técnica ou não ao pedido de patente de um inventor que clama ter desenvolvido um novo ciclo de geração de potência, baseado no ciclo de Rankine, com eficiência de 45%. Os dados fornecidos pelo inventor para os estágios do ciclo (imediatamente após o fluido deixar cada equipamento) são: $H_{\text{caldeira}}^{(1)} = 2609,7 \text{ kJ/kg}$, $H_{\text{turbina}}^{(2)} = 1483,52 \text{ kJ/kg}$, $H_{\text{condensador}}^{(3)} = 251,40 \text{ kJ/kg}$ e $H_{\text{bomba}}^{(4)} = 333,33 \text{ kJ/kg}$.

Resolução da situação-problema

A decisão sobre a proposta de invenção, se ela é plausível ou não, se resume, basicamente, em determinar a eficiência do ciclo ideal de Rankine. Como as propriedades foram fornecidas, se a eficiência do ciclo for menor do que a eficiência de 45% fornecida pelo inventor, então, com certeza, a invenção é uma enganação, pois é impossível que a eficiência do ciclo real seja maior que a do ciclo ideal.

Dessa maneira, a eficiência do ciclo ideal de Rankine é determinada pela seguinte expressão:

$$\eta = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} = 1 - \frac{1483,52 - 251,40}{2609,7 - 333,33} = 0,5413$$

Como você determinou que a invenção pode atingir eficiência ideal de 54%, aproximadamente, então é plausível que o inventor realmente tenha conseguido um ciclo com eficiência de 45% e o pedido de patente pode ter prosseguimento para a etapa de avaliação técnica.

Faça valer a pena

1. A turbina é um importante equipamento do ciclo de Rankine, pois nele ocorre a expansão do vapor. A energia dessa etapa de expansão do vapor é convertida em trabalho, que é utilizado na movimentação de um eixo para fornecer potência para diversos processos.

Considere a alimentação de uma turbina com vapor saturado a 8 kPa ($h_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 2577,0 \text{ kJ/kg}$ e $S_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 8,2287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$). Assinale a alternativa que apresenta a qualidade do vapor após a expansão isentrópica em uma turbina, sabendo que o vapor na saída da turbina está saturado a 4 kPa ($S_{\text{liq}}^{\text{sat}} = 0,4226 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ e $S_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 8,4746 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$). Utilize quatro casas decimais nos cálculos.

- a) 90%.
- b) 95%.
- c) 96%.
- d) 97%.
- e) 98%.

2. Em determinado sistema de geração de potência a vapor foi instalada uma turbina capaz de operar com eficiência de 75%. Com a utilização do equipamento ao longo dos anos e devido a uma série de más recomendações, a eficiência do equipamento foi reduzida. Atualmente, a turbina utiliza vapor superaquecido a 0,10 MPa e 500 °C ($h = 3488,1 \text{ kJ/kg}$) e libera uma mistura líquido-vapor saturado a 0,06 MPa ($h_{\text{liq}}^{\text{sat}} = 151,53 \text{ kJ/kg}$ e $h_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 2567,4 \text{ kJ/kg}$) de qualidade 50%.

Assinale a alternativa que indica a eficiência da turbina atualmente.

- a) 60%.
- b) 61%.
- c) 62%.
- d) 63%.
- e) 64%.

3. Uma planta para geração de potência a vapor operando conforme o ciclo Rankine utiliza vapor a 600 °C e 0,5 MPa ($h_1 = 3701,7 \text{ kJ/kg}$) como alimentação da turbina. Após a expansão do vapor para geração de potência, obtém-se uma mistura vapor-líquido de qualidade 45,25% saturada a 10 kPa ($h_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 2584,7 \text{ kJ/kg}$ e $h_{\text{liq}}^{\text{sat}} = 191,83 \text{ kJ/kg}$), a qual é condensada em um condensador operando na mesma pressão de saturação. O líquido resultante da condensação (líquido que se forma quando o vapor que deixa a turbina é condensado) é, então, bombeado para a caldeira necessitando de 12 kJ/kg de energia para o seu transporte. A combustão na caldeira introduz, aproximadamente, 3,5 MJ/kg de energia para vaporização e superaquecimento do fluido de trabalho. Considere que a bomba e a turbina operam com eficiência de 80%.

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, a eficiência ideal e a real do ciclo de Rankine.

- a) 60,0% e 50,0%.
- b) 60,4% e 50,5%.
- c) 60,0% e 50,0%.
- d) 70,4% e 50,5%.
- e) 60,4% e 70,4%.

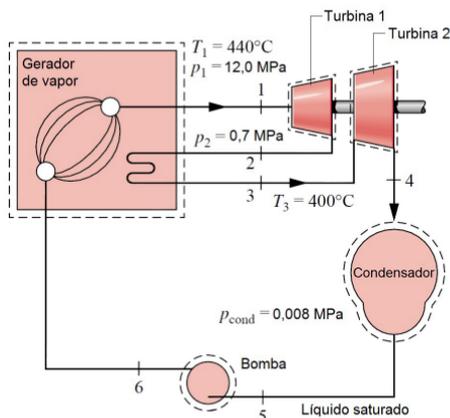
Melhoria de desempenho do ciclo de potência a vapor

Diálogo aberto

Caro aluno, para cozinhar alimentos, como vegetais, normalmente os submergimos em água fervente e aguardamos alguns minutos. Entretanto, algumas pessoas também mantêm uma peneira suspensa acima do nível da água para cozinhar outros legumes no vapor. Esse tipo de procedimento consiste em uma otimização da energia do vapor, sendo muito utilizado nas indústrias nos ciclos de geração de potência a vapor, porém com uma tecnologia diferente. A melhoria da eficiência desses ciclos consiste em empregar tecnologias de reaquecimento, superaquecimento, regeneração e outras técnicas que estudaremos ao longo desta seção.

Para abordar tais conceitos e outras propriedades importantes dos sistemas de geração de potência a vapor, lembre-se de que você foi alocado como trainee no departamento de projetos de uma grande empresa. Como a produção da empresa na qual você trabalha cresceu muito, o consumo de potência dos processos aumentou consideravelmente. Para suprir essa nova demanda, o engenheiro-chefe do departamento de projetos otimizou o processo de geração de potência a partir da utilização de um sistema de reaquecimento, apresentado na Figura 1.10, e solicitou a você que determinasse a nova eficiência térmica do ciclo e a vazão mássica de vapor produzida pelo ciclo otimizado.

Figura 1.10 | Ciclo de potência a vapor otimizado com reaquecimento



Fonte: adaptada de Moran et al. (2003, p. 199).

Para resolver essa problematização, você pode considerar que a entalpia e a entropia no estado 1 são, respectivamente, 3246,1 kJ/kg e 6,5190 kJ/(kg·K); as entalpias e entropias de líquido e vapor saturado do estado 2 são, respectivamente, 697,22 kJ/kg, 2763,52 kJ/kg, 1,9922 kJ/(kg·K) e 6,7080 kJ/(kg·K); para o vapor superaquecido no estado 3 a entalpia e entropia são, respectivamente, 3268,7 kJ/kg e 7,6350 kJ/(kg·K); as entalpias e entropias de líquido e vapor saturado do estado 4 são, respectivamente, 173,88 kJ/kg, 2580,43 kJ/kg, 0,5926 kJ/(kg·K) e 8,2287 kJ/(kg·K); o estado 5 é líquido saturado com entalpia igual a 173,88 kJ/kg; e a entalpia na saída da bomba (estado 6) é igual a 181,94 kJ/kg.

A resolução deste projeto envolve conhecer as propriedades do ciclo de Rankine com reaquecimento, as quais serão apresentadas nas próximas páginas. Além disso, você também verá os ciclos com superaquecimento, supercrítico e ciclo a vapor regenerativo. Além disso, estudaremos a função dos aquecedores de água de alimentação bem como os fluidos de trabalho, sistema de cogeração e captura e armazenamento de carbono.

Estude todos esses assuntos com bastante interesse e resolva o projeto apresentado para testar seu aprendizado, pois os assuntos aqui tratados são importantes para a sua formação em Engenharia Mecânica. Vamos começar nosso estudo!

Não pode faltar

As usinas de geração de potência a vapor desenvolveram modificações em seus ciclos de geração com a finalidade de melhorar o desempenho do ciclo gerador de potência. As melhorias mais comuns encontradas nas usinas são a utilização dos ciclos por reaquecimento e por superaquecimento, porém, menos comum é a melhoria por vapor supercrítico ou por vapor regenerativo.

Ao passar pelo interior da turbina, parte da energia do vapor é convertida em potência, ocasionando a formação de líquido. Caso uma quantidade muito grande de líquido seja formada, suas gotículas podem ocasionar a erosão das pás da turbina devido a sua elevada energia cinética o que, por sua vez, diminuiria o desempenho do ciclo, tendo em vista a manutenção excessiva e custos associados. O ideal, a fim de melhorar o desempenho do equipamento, consiste em operar a turbina, cujo vapor de saída apresenta título maior ou igual a 90%. Para isso pode-se empregar o superaquecimento do vapor. A energia adicional para superaquecimento do vapor deve ser transferida pelo superaquecedor antes de alimentar o vapor à turbina.

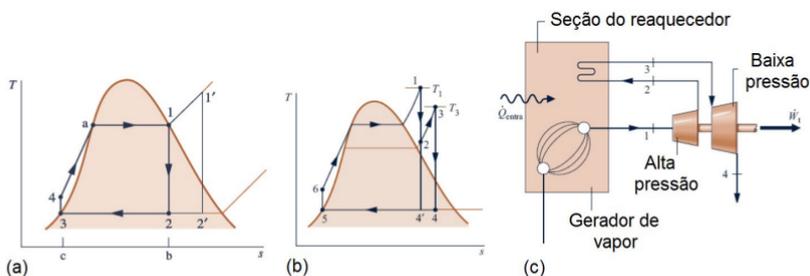


Assimile

O superaquecedor é uma seção presente em alguns tipos de caldeiras que tem a finalidade de fornecer energia ao vapor saturado transformando-o em superaquecido. O conjunto caldeira-supaquecedor é denominado gerador de vapor.

A Figura 1.11 (a) apresenta o diagrama Temperatura versus Entropia para um ciclo de Rankine comum (1-2-3-4-1) e outro com vapor superaquecido (1'-2'-3-4-1'). Note que a temperatura em 1' é maior que em 1 e isto faz com que a temperatura média do ciclo seja maior e, portanto, que sua eficiência térmica seja melhorada.

Figura 1.11 | Diagramas temperatura versus entropia para o ciclo com superaquecimento (a), reaquecimento (b) e seção de reaquecimento do ciclo de potência a vapor (c)



Fonte: adaptada de Moran et al. (2018, p. 361 e 369).

Realizar o reaquecimento do vapor após este percorrer uma seção de alta pressão da turbina, para, então, reintroduzi-lo à seção de baixa pressão, também é uma técnica válida para melhorar o desempenho do ciclo gerador de potência a vapor. O reaquecimento permite a evaporação de parte do líquido que se origina dentro da turbina e possibilita a operação da caldeira com uma pressão mais elevada (comparando com o caso de não haver o reaquecimento), o que impacta positivamente na eficiência térmica do ciclo de Rankine conforme apresentado na Figura 1.11 (b). Note, na Figura 1.11 (c), que no reaquecimento o vapor é retirado em uma seção intermediária da turbina, o que não ocorre no caso do vapor superaquecido, o qual percorre inteiramente a turbina.



Refleta

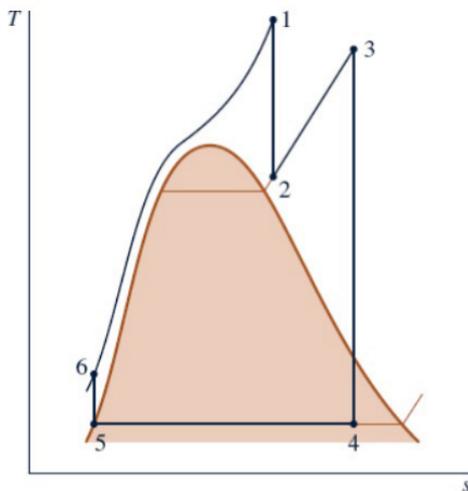
Analisando os diagramas T-S da Figura 1.11 (a) e (b), notamos que as entropias nos estados superaquecido e reaquecido (2' e 4' respectivamente)

mente) são maiores do que no ciclo comum de Rankine. O aumento de entropia para tais condições aumenta, diminui ou não modifica a composição do vapor?

Agora vamos contrastar essas duas técnicas (reaquecimento e superaquecimento), que são comuns nas usinas de geração de potência a vapor, com as plantas supercríticas. Em tais plantas o vapor é gerado em uma condição superior ao ponto crítico da água, ou seja, com pressão acima de 22,1 MPa, justificando o nome de plantas supercríticas. A operação do ciclo de potência nessa condição rigorosa de trabalho só foi possível graças ao advento de novos materiais capazes de suportar as rigorosas tensões geradas pelo movimento do fluido. Dessa forma, o ciclo de Rankine supercrítico é operado com temperatura média elevada; o gerador de vapor pode ser operado com uma pressão elevada e a caldeira também, favorecendo a eficiência do ciclo e permitindo um melhor aproveitamento energético do combustível utilizado na caldeira, além de diminuir os impactos ambientais da operação da usina.

Apesar do custo de instalação da usina supercrítica ser superior ao da subcrítica, sua operação mais eficiente é capaz de recuperar o investimento em um curto período. Observando o diagrama T-S para um ciclo supercrítico ideal com reaquecimento apresentado na Figura 1.12, temos que o esquema de uma planta de potência operando nessas condições seria idêntico ao já apresentado na Figura 1.11(c) com exceção das propriedades das correntes de fluido.

Figura 1.12 | Diagrama T-S para um ciclo supercrítico ideal com reaquecimento



Fonte: Moran et al. (2018, p. 370).

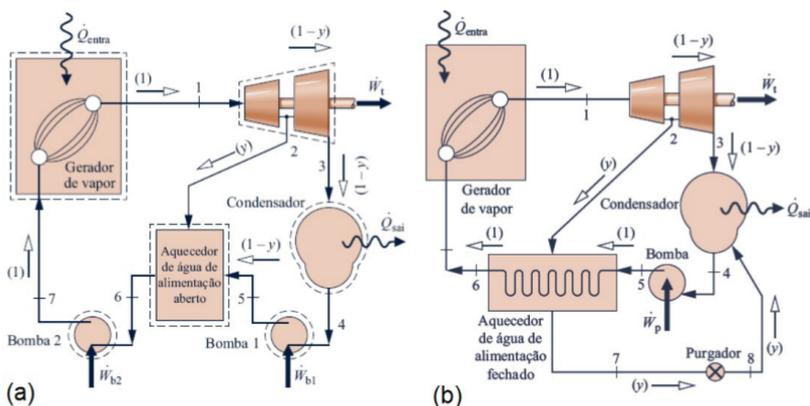


Pesquisa mais

As superligas metálicas são os materiais empregados nas estruturas dos equipamentos que compõem um ciclo de potência a vapor supercrítico. Elas permitiram ampliar a eficiência térmica de 47% para 50%, atingindo pressões de operação de 35 MPa e temperaturas de até 750 °C. Conheça mais sobre as superligas lendo as páginas 604 e 605 em: CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

Ainda é possível melhorar o desempenho de um ciclo de potência a vapor trabalhando-se com a regeneração, isto é, com o aquecimento regenerativo da água de alimentação, cuja fonte pode ser um sistema aberto ou fechado. Vejamos as características de cada um destes sistemas exemplificados respectivamente na Figura 1.13 (a) e (b).

Figura 1.13 | Geração de potência a vapor regenerativo em sistema aberto (a) e fechado (b)



Fonte: adaptada de Moran et al. (2018, p. 374 e 378).

Quando o aquecimento da água de alimentação é realizado em um sistema aberto, não existe queda de pressão no gerador de vapor, condensador e no aquecedor de água, porém a mistura neste ocasiona irreversibilidade no sistema, e a turbina e as bombas operam isentropicamente. Para o sistema regenerativo fechado não existe mistura entre o vapor extraído e a água de alimentação, uma vez que o reaquecedor contém um purgador, que permite apenas a passagem do líquido para o condensador. Dessa forma a turbina e a bomba operam isentropicamente, mas o purgador não, e há uma queda de pressão.



Assimile

No caso de aquecimento com sistema aberto (Figura 1.13 (a)) o aquecimento da água bombeada de volta ao gerador de vapor ocorre do estado 7 para o 1 necessitando de um menor consumo de energia, que é um efeito desejado. Em comparação, no caso sem regeneração (Figura 1.11 (a)) o aquecimento seria do estado (a) até o 1 ou 1'. Para o caso do sistema fechado (Figura 1.13 (b)) o aquecimento ocorre do estado 6 para o estado 1.

Somente uma parte do escoamento total se expande através da turbina de segundo estágio (Processo 2-3), portanto, o ciclo desenvolve uma quantidade menor de trabalho.

A determinação da fração de vapor, y , que deve ser encaminhada para o aquecimento no caso do sistema aberto é determinada pela razão entálpica dos estados 2, 5 e 6. Matematicamente:

$$y_{\text{aberto}} = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}$$

Para o caso de ciclo fechado, a diferença no denominador envolve o estado 7, isto é:

$$y_{\text{fechado}} = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$

Para ambos os tipos de regeneração, as quantidades de energia (trabalho ou calor) transferidas pela turbina (\dot{W}_t), bomba (\dot{W}_b), caldeira (\dot{Q}_{entra}) e condensador (\dot{Q}_{sai}) são determinadas por meio de balanços de energia. Esses balanços resultam respectivamente nas seguintes expressões:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1 [(h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3)]$$

$$\dot{W}_b = \dot{m}_1 [(h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4)]$$

$$\dot{Q}_{\text{entra}}^{\text{caldeira}} = \dot{m}_1 (h_1 - h_7)$$

$$\dot{Q}_{\text{sai}}^{\text{condensador}} = \dot{m}_1 [(1 - y)(h_3 - h_4)]$$

Em que \dot{m} representa a vazão mássica, h a entalpia e os índices representam os estados de referência.

A diferença entre ambos os ciclos regenerativos e o ciclo apresentado na Figura 1.11(a) consiste na etapa de aquecimento. Nos casos com regeneração, o fluido é alimentado na caldeira com uma temperatura superior à do estado 4 ocasionando, portanto, melhor eficiência térmica da caldeira e do ciclo gerador de potência como um todo.



Pesquise mais

É possível definir um ciclo de geração de potência a vapor combinando tanto o sistema de regeneração aberto quanto o fechado. Para conhecer esse tipo de ciclo leia a página 379 e o exemplo da página 380.

MORAN, et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

Vejamos um exemplo prático sobre os conteúdos abordados até o momento.



Exemplificando

Considere um ciclo regenerativo com sistema de regeneração do tipo fechado idêntico ao apresentado na Figura 1.13 (b). Determine a eficiência desse ciclo sabendo que $h_1 = 3391,6 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 2827,4 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 2435,9 \text{ kJ/kg}$, $h_4 = 200,0 \text{ kJ/kg}$, $h_5 = 771,1 \text{ kJ/kg}$, $h_6 = 973,0 \text{ kJ/kg}$, $h_7 = 999,0 \text{ kJ/kg}$ e $y = 0,11$.

Resolução:

Começamos determinando as energias específicas transferidas pela turbina, pela bomba e pela caldeira respectivamente.

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_2) + (1 - y)(h_2 - h_3) = (3391,6 - 2827,4) + (0,89)(2827,4 - 2435,9)$$

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_1} = 912,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}_1} = (h_7 - h_6) + (1 - y)(h_5 - h_4) = (999 - 973) + (0,89)(771,1 - 200) = 534,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{caldeira}}}{\dot{m}_1} = (h_1 - h_7) = 3391,6 - 999,0 = 2392,6 \text{ kJ/kg}$$

Dessa maneira, a eficiência do ciclo é determinada dividindo-se a potência líquida do ciclo pela quantidade de energia fornecida pela caldeira, isto é:

$$\eta = \frac{(\dot{W}_t - \dot{W}_b) / \dot{m}_1}{\dot{Q}_{\text{caldeira}} / \dot{m}_1} = \frac{912,6 - 534,3}{2392,6} = 15,8\%$$

Portanto, finalizando, temos que a eficiência encontrada tem um valor muito baixo para esse tipo de ciclo.



Faça você mesmo

Você seria capaz de propor novas condições que melhorem a eficiência do processo? Por exemplo, se utilizássemos $\gamma = 0,30$ e se estivessem fixadas as entalpias, isto nos forneceria uma eficiência de 17,24%.

Toda a nossa discussão nesta seção se baseou, até o momento, em modificações no ciclo de Rankine com o intuito de melhorar o desempenho da geração de potência a partir do vapor. No entanto, existem outros fatores que impactam no desempenho do ciclo, os quais serão discutidos nas próximas páginas. São eles: o tipo de fluido de trabalho do ciclo, o sistema de cogeração de potência e a captura e armazenamento de carbono.

O fluido de trabalho mais empregado para ciclos de geração de potência é a água. As vantagens em se utilizar a água como fluido de trabalho se deve ao fato de ela apresentar baixo custo, ser quimicamente estável, de baixa corrosividade (quando realizado um pré-tratamento de desmineralização), disponível em grande quantidade, e o mais importante: ela é um fluido capaz de armazenar uma quantidade significativa de energia específica quando vaporizada. Uma desvantagem da utilização da água como fluido de trabalho consiste no seu ponto crítico atrapalhar a operacionalização das melhorias de desempenho, por exemplo, de reaquecimento, superaquecimento e regeneração, visto que o ponto crítico limita a pressão máxima de operação da caldeira.

Algumas usinas de geração de potência utilizam fluidos diferentes de acordo com a característica da fonte térmica, por exemplo. No caso de usinas geotérmicas ou de coletores solares, como a temperatura média de operação é visivelmente mais baixa que em um ciclo a base de combustíveis fósseis, pode-se utilizar um fluido de trabalho de baixo ponto de ebulição como a amônia ou hidrocarbonetos. O óleo silicone também é empregado com a mesma finalidade.

As usinas que operam com a cogeração de energia nos ciclos de geração de potência são muito bem vistas na sociedade, pois empregam combinadamente o uso de eletricidade e de vapor a partir de uma mesma matéria-prima como fonte energética. O exemplo mais clássico deste tipo de indústria no Brasil são as usinas de álcool e açúcar, que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível na fonalha de suas caldeiras produzindo, dessa maneira, vapor para seus processos e energia elétrica para suas instalações e, possivelmente, vendendo o excedente de energia gerada ao município no qual a usina está instalada.

As usinas de cogeração apresentam menor impacto ambiental, devido ao manejo de seus resíduos como combustível energético, e também possuem

menor custo produtivo, o que aumenta a competitividade de seus produtos. Outro exemplo marcante de uma usina de cogeração são as indústrias de papel e celulose que queimam resíduos e cascas de árvores na caldeira, e utilizam resíduos químicos em um processo de recuperação, produzindo um excedente de energia elétrica.



Pesquise mais

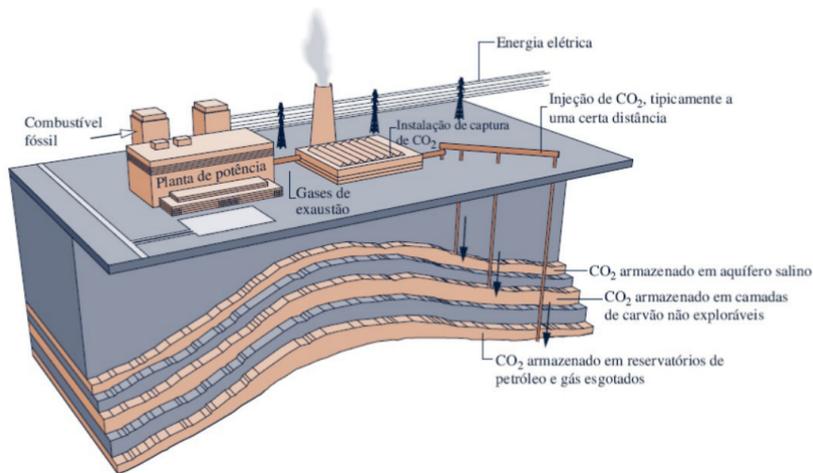
Pesquise mais sobre as tecnologias disponíveis para cogeração de energia: plantas de contrapressão (*pressure steam turbines*) e plantas de extração (*condensing-extraction steam turbines*) lendo as páginas 50-53 em:

BURIN, E. L. K. **Plantas de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro Assis- tidas por Concentradores Parabólicos**. 2015. 157f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

Os ciclos de geração de potência discutidos são, em sua maioria, dependentes da queima de combustíveis fósseis. É impossível não associar, nos dias atuais, tal atividade com a emissão de gases do efeito estufa e com o acúmulo de carbono na atmosfera. Como o setor energético tem se preocupado cada vez mais com o meio ambiente, devido à pressão popular e governamental, é comum que as usinas que empregam a combustão de materiais em seus ciclos adotem práticas para minimizar seus impactos ambientais. Em relação às emissões de carbono, estas podem ser reduzidas melhorando-se a eficiência do ciclo de potência, pois o melhor aproveitamento energético do combustível implica na redução do seu consumo e da sua queima. Além disso, as empresas têm procurado alterar suas matrizes de combustíveis não renováveis para fontes renováveis como a energia solar, hidrelétrica e eólica, ou então têm buscado minimizar as emissões de carbono, para um futuro próximo, utilizando combustíveis fósseis menos poluentes (preferindo-se a combustão de gás natural ao invés da de carvão, por exemplo).

Outra prática realizada pelas empresas para reduzir a emissão de compostos de carbono consiste em capturar esses componentes nas torres de emissão de gases antes que eles sejam lançados para a atmosfera para, então, realizar o armazenamento destes conforme exemplificado na Figura 1.14.

Figura 1.14 | Exemplo de uma planta de potência que captura e armazena CO₂ no subsolo



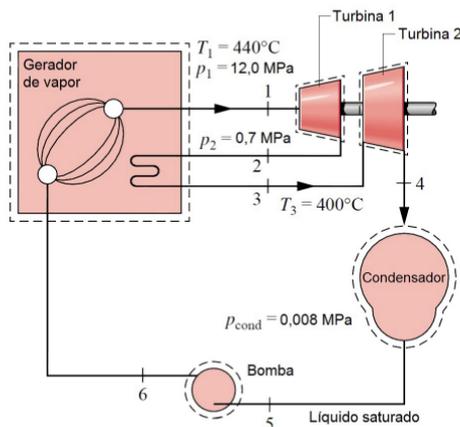
Fonte: Moran et al. (2018, p. 385).

Ainda se sabe pouco acerca dos efeitos ambientais que o armazenamento de gases como CO e CO₂ no subsolo podem trazer à natureza. Além disso, os cientistas desconhecem o tempo em que tais gases permanecerão apropriadamente armazenados. Estes tipos de incertezas têm atrasado o desenvolvimento e a aplicação dessas tecnologias. Além disso, é difícil realizar a separação dos gases e sua armazenagem sem grandes custos.

Sem medo de errar

Agora é o momento para resolvermos o projeto proposto. Lembre-se de que você é um engenheiro mecânico recém-graduado, contratado como trainee em uma grande empresa, e que está atuando no departamento de projeto junto com outros profissionais. Agora, você tem em mãos um projeto referente à otimização da geração de potência a vapor desenvolvido pelo engenheiro-chefe, que lhe atribuiu a função de determinar a eficiência térmica deste novo ciclo que utiliza um sistema de aquecimento e, também, de vazão mássica de vapor. O sistema está apresentado na Figura 1.10.

Figura 1.10 | Ciclo de potência a vapor otimizado com reaquecimento



Fonte: adaptada de Moran et al. (2003, p. 199).

A primeira etapa na solução deste projeto consiste em determinar as entalpias e a qualidade dos fluidos retirados após o estágio 2 e 4 da turbina. Isto é feito por meio das entropias de cada corrente, conforme mostrado a seguir:

$$x_2 = \frac{S_2 - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}}{S_{\text{vap}}^{\text{sat}} - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}} = \frac{6,5190 - 1,9922}{6,7080 - 1,9922} = 0,9599$$

Note que $S_2 = S_1$ devido à expansão isentrópica, como discutimos anteriormente para o reaquecimento.

Assim, por uma regra de mistura, a entalpia da corrente 2 é dada por:

$$H_2 = x_1 \cdot H_{\text{liq}}^{\text{sat}} + x_2 \cdot H_{\text{vap}}^{\text{sat}} = (1 - x_2) \cdot H_{\text{liq}}^{\text{sat}} + x_2 \cdot H_{\text{vap}}^{\text{sat}}$$

Substituindo os valores dos parâmetros, temos que:

$$H_2 = 0,0401 \cdot 697,22 + 0,9599 \cdot 2763,52 = 2680,66 \text{ kJ/kg}$$

Analogamente, para a corrente 4, desta vez com $S_4 = S_3$, segue que:

$$x_4 = \frac{S_4 - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}}{S_{\text{vap}}^{\text{sat}} - S_{\text{liq}}^{\text{sat}}} = \frac{7,6350 - 0,5926}{8,2287 - 0,5926} = 0,9223$$

$$H_4 = (1 - x_4) \cdot H_{\text{liq}}^{\text{sat}} + x_4 \cdot H_{\text{vap}}^{\text{sat}} = 0,0777 \cdot 173,88 + 0,9223 \cdot 2580,43 = 2393,44 \text{ kJ/kg}$$

Com isso, temos condições de determinar a eficiência térmica do ciclo realizando a divisão entre a potência líquida produzida ($\dot{W}_t^{1-2} + \dot{W}_t^{3-4} - \dot{W}_b$)

pela energia alimentada pela caldeira (\dot{Q}_{entra}^{1-6}) e utilizada no reaquecimento (\dot{Q}_{entra}^{3-2}). Em termos específicos, (por unidade de massa) utilizamos as equações do balanço de energia para escrever a eficiência em termos das entalpias das correntes que resultam na seguinte expressão:

$$\eta = \frac{(\dot{W}_t^{1-2} + \dot{W}_t^{3-4} - \dot{W}_b) / \dot{m}_1}{(\dot{Q}_{entra}^{1-6} + \dot{Q}_{entra}^{3-2}) / \dot{m}_1} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

Portanto,

$$\eta = \frac{(3246,1 - 2680,66) + (3268,7 - 2393,44) - (181,94 - 173,88)}{(3246,1 - 181,94) + (3268,7 - 2680,66)} = \frac{1432,64}{3652,22} = 0,3923$$

A determinação da vazão mássica de vapor produzida pode ser obtida reescrevendo-se a expressão para a potência líquida do ciclo como:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{W}_t^{1-2} + \dot{W}_t^{3-4} - \dot{W}_b}{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}$$

Entretanto, o engenheiro-chefe não especificou a potência líquida do sistema. Quando isto ocorre, devemos considerar uma base de cálculo, por exemplo, 100 MW. Assim, quando a potência for de fato especificada (200 MW, por exemplo), apenas multiplicamos o resultado obtido para o cálculo com 100 MW. Dessa forma, segue que:

$$\dot{m}_1 = \frac{100 \text{ MW} \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \right|}{1432,64 \text{ kJ/kg}} = 2,51 \times 10^5 \text{ kg/h}$$

Assim você encerra seu projeto informando ao engenheiro-chefe que o ciclo com reaquecimento é capaz de produzir 250 toneladas de vapor por hora e é capaz de extrair 100 MW de potência com eficiência de 40% aproximadamente. Bom trabalho!

Avançando na prática

Estimando a necessidade de manutenção em um sistema de arrefecimento

Descrição da situação-problema

Você trabalha como engenheiro responsável pela unidade de arrefecimento de uma usina geradora de potência e suspeita que o sistema de arrefecimento está operando de maneira ineficiente devido à falta de manutenção,

o que tem gerado um consumo excessivo de água. As condições de projeto estipulam que a geração de 150 MW de potência deveria consumir 370 ton/h de água. Sabendo que a diferença de entalpia no arrefecimento é de 2254,62 kJ/kg, determine se o sistema necessita de manutenção ou não.

Resolução da situação-problema

Um balanço de energia no condensador de água de arrefecimento, utilizando a vazão mássica de água e a diferença de entalpia dados, fornecerá a quantidade de energia transferida no equipamento. Se esta for maior que os 150 MW estipulado em projeto, então o sistema necessita de manutenção. Dessa forma, temos que:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = m \cdot \Delta h = \frac{(370 \text{ ton/h})(2254,62 \text{ kJ/kg}) \left| \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \right|}{\left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \right|} = 230,7 \text{ MW}$$

Como $230 \text{ MW} > 150 \text{ MW}$ o sistema de arrefecimento está consumindo cerca de 130% a mais de água do que o necessário, segundo suas condições de projeto. Acionar a equipe de manutenção é mandatório neste caso. Bom trabalho!

Faça valer a pena

1. Usinas que queimam combustíveis fósseis e/ou biomassa como fonte energética para a geração de potência a vapor normalmente apresentam modificações em seus ciclos com o intuito de melhorar a sua eficiência térmica. Dessa forma, é possível gerar potência consumindo menos combustível e tornando a operação da usina economicamente vantajosa. Algumas modificações são apresentadas nos itens de I a V a seguir:

- I. Reaquecimento e/ou superaquecimento.
- II. Regeneração.
- III. Inserir purgadores nas linhas de condensado.
- IV. Combustão de materiais renováveis.
- V. Confecção de equipamentos em ligas especiais.

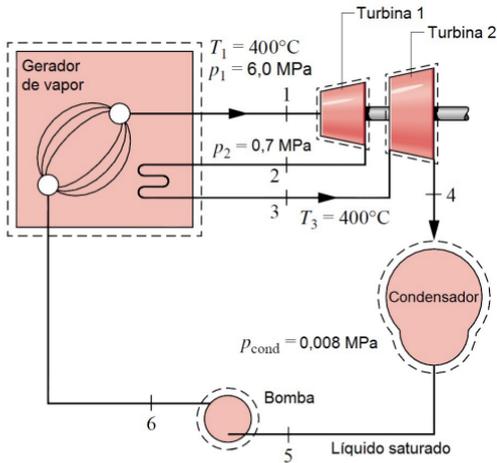
Assinale a alternativa que contenha, apenas, os itens referentes às modificações que melhoram o desempenho do ciclo de Rankine.

- a) I e II, apenas.
- b) I, II e III, apenas.
- c) II, III e IV, apenas.

- d) I, II e V, apenas.
 e) I, II, IV e V, apenas.

2. Considere o ciclo de potência a vapor com reaquecimento apresentado na figura a seguir.

Figura | Ciclo de potência a vapor com reaquecimento



Fonte: adaptada de Moran et al. (2003, p. 199).

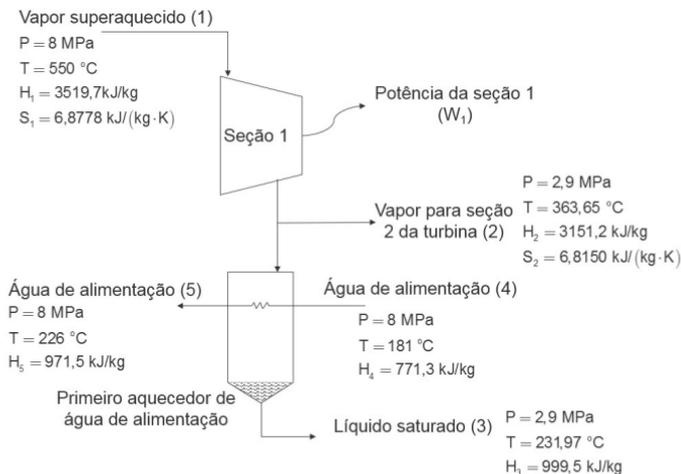
Sabendo que a entalpia e a entropia no estado 1 são, respectivamente, 3177,2 kJ/kg e 6,5408 kJ/(kg·K); as entalpias e entropias de líquido e vapor saturado do estado 2 são, respectivamente, 697,22 kJ/kg, 2763,52 kJ/kg, 1,9922 kJ/(kg·K) e 6,7080 kJ/(kg·K); para o vapor superaquecido no estado 3 a entalpia e entropia são, respectivamente, 3268,7 kJ/kg e 7,6350 kJ/(kg·K); as entalpias e entropias de líquido e vapor saturado do estado 4 são, respectivamente, 173,88 kJ/kg, 2580,43 kJ/kg, 0,5926 kJ/(kg·K) e 8,2287 kJ/(kg·K); o estado 5 é líquido saturado com entalpia igual a 173,88 kJ/kg; e a entalpia na saída da bomba (estado 6) é igual a 181,94 kJ/kg.

Assinale a alternativa que apresenta a eficiência térmica do ciclo apresentado. Utilize 4 casas decimais para os cálculos.

- a) 37,9%.
 b) 38,1%.
 c) 38,3%.
 d) 38,5%.
 e) 38,7%.

3. Uma turbina geradora de potência opera com vapor superaquecido e foi confeccionada em cinco seções das quais são extraídas uma parte do vapor para aquecimento de água de alimentação. A primeira seção da turbina e as propriedades das correntes são apresentadas na figura a seguir.

Figura | Primeira seção da turbina com aquecedor de água de alimentação



Fonte: adaptada de Smith, Van Ness e Abott (2011, p. 222).

Considere a alimentação de 1 tonelada por hora de vapor na turbina como base de cálculo e que o aquecedor possui a mesma vazão de água líquida.

Assinale a alternativa que indica a vazão da corrente 3, ou seja, a vazão de vapor que é extraído da seção 1 e encaminhada para o aquecedor de água de alimentação.

- 90 kg/h .
- 91 kg/h .
- 92 kg/h .
- 93 kg/h .
- 94 kg/h .

BRASIL, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 de jan. de 1997. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=370>. Acesso em: 18 ago. 2018.

BURIN, E. L. K. **Plantas de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro Assistidas por Concentradores Parabólicos**. 2015. 157f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169305>. Acesso em: 12 set. 2018.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. Tradução Sérgio Murilo Stamile. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. O que é o CONAMA? **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 18 ago. 2018.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam** – its generation and use. The Babcock & Wilcox Company, 41. ed, Barberton, Ohio, U.S.A, 2005.

MAGALHÃES, E. G. **Otimização da Distribuição de Vapor e Energia Elétrica de uma Indústria Petroquímica**. 2006. 194f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10068>. Acesso em: 10 set. 2018.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Tradução e Revisão Técnica de Robson Pacheco Pereira et al. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 859 p.

_____. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7. ed. John Wiley & Sons, Inc. 2011.

_____. **Introduction to Thermal Systems and Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer**. John Wiley & Sons, Inc. 2003.

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.19, n. 2, p. 273-286, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/gp/v19n2/v19n2a04>. Acesso em: 18 ago. 2018.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. Tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 626 p.

Unidade 2

Geração de vapor: combustão em caldeiras industriais

Convite ao estudo

Caro aluno, praticamente todo ano no período compreendido entre o final do inverno e início da primavera, o governo brasileiro inicia a operação de usinas termelétricas para geração energética com o intuito de poupar a água dos reservatórios das usinas hidrelétricas, na maioria das vezes com baixo nível de água devido ao inverno seco. Com isso, inevitavelmente, a conta de luz dos brasileiros sobe, pois as usinas termelétricas, para aquecer água e gerar vapor e energia, precisam queimar combustíveis, tais como o carvão mineral e derivados do petróleo como óleos combustíveis, gás natural, gás de xisto, entre outros que apresentam um custo de operação (produção, tratamento, transporte e queima) mais elevado do que o custo de operação de uma hidrelétrica.

Nesta unidade, iremos conhecer e compreender os combustíveis industriais e a tecnologia empregada para a sua combustão e vamos utilizar nossa curiosidade para saber identificar a composição e as propriedades desses combustíveis que são utilizados na geração de energia, assim como utilizaremos o raciocínio crítico para saber analisar o processo de combustão desses gases e líquidos.

Para atingir essa finalidade, imagine que você, recém-formado, está trabalhando em um laboratório de controle de qualidade de combustíveis que também atua na área de energia. Dentre os serviços prestados pela empresa, além de projetos, estão a análise de propriedades, características e qualidade de combustíveis que são utilizados em equipamentos de geração de potência para diversas indústrias nacionais. Nos primeiros meses de trabalho, você irá atuar em três projetos sobre a qualidade de diferentes combustíveis industriais e irá emitir um relatório técnico contendo uma análise do serviço requisitado e o memorial de cálculo quando necessário. O primeiro projeto será realizado na refinaria de uma petrolífera com o intuito de auxiliar na reestruturação do controle de qualidade do refino de petróleo, o segundo envolverá estimar a duração dos combustíveis contidos nos reservatórios de uma pequena empresa e, por fim, o terceiro projeto avaliará as características de diferentes equipamentos para aquisição pela empresa em que trabalha. Os relatórios desses projetos serão encaminhados para o supervisor para validação antes de serem submetidos aos clientes.

Quais os tipos de combustíveis mais utilizados pelas empresas? Como eles diferem um dos outros quanto à suas propriedades e poder calorífico? Quais equipamentos disponíveis para realizar a combustão dos combustíveis sólidos e líquidos? A resposta dessas perguntas irá guiá-lo na resolução dos projetos. Para respondê-las, estudaremos a composição de diferentes tipos de combustíveis na primeira seção. Na segunda seção, veremos a tecnologia de combustão de gases, jatos, chamas de gás e o limite de inflamabilidade. A terceira seção aborda as propriedades dos combustíveis líquidos, sua estabilidade e compatibilidade. Além disso, estudaremos as características dos óleos combustíveis brasileiros e os sistemas de alimentação de óleo combustíveis. Vamos iniciar nosso estudo!

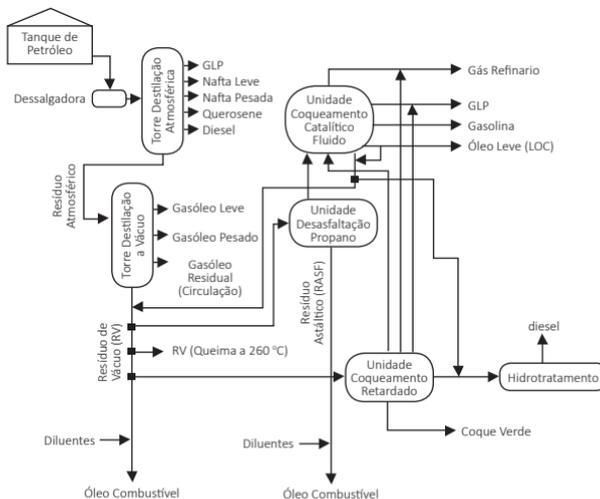
Combustíveis industriais

Diálogo aberto

Quando você anda de moto, carro, ônibus, caminhão ou avião, está fazendo uso da energia química de um combustível, que é queimado no motor do veículo, transformando essa energia em movimento. As indústrias de processamento fazem uso da mesma energia de combustão de combustíveis como óleos, diesel, gases, dentre outros mais, porém, com a finalidade de transferir o calor liberado para a geração de vapor e de potência que irá garantir o bom funcionamento de diversos equipamentos, como unidades fluido-catalíticas, colunas de destilação, torres de absorção, trocadores de calor, entre outros.

Lembre-se de que você foi contratado para trabalhar em uma empresa que realiza análises laboratoriais de qualidade em combustíveis e projetos na área de energia. Neste momento, uma empresa petroquímica solicita os serviços da empresa em que você trabalha, pois está realizando uma reestruturação das análises de qualidade do seu processo de refino de petróleo, visando obter uma certificação internacional de qualidade em combustíveis, e você foi encarregado de realizar uma análise do esquema de refino da fábrica apresentado na Figura 2.1, sendo a sua responsabilidade indicar os locais em que devem ser realizadas coletas de material para controle da qualidade, bem como as características desejadas no ponto de coleta.

Figura 2.1 | Esquema de refino de petróleo da empresa-cliente



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 43).

Quais componentes químicos compõem os derivados do petróleo? É necessário remover contaminantes? Quais? As respostas dessas perguntas podem orientá-lo na análise do processo de refino da empresa-cliente e, para respondê-las, devemos conhecer a composição dos combustíveis industriais e dos derivados da destilação do petróleo. Também estudaremos sobre o gás natural, óleo de gás de xisto e o monóxido de carbono. Vamos começar!

Não pode faltar

As indústrias de processamento, de modo geral, necessitam de uma fonte energética para alimentarem seus processos de geração de vapor e/ou de produção de potência. Em particular, as fontes mais comuns para tais finalidades consistem em captar a energia da radiação solar, a energia liberada por reações nucleares rigorosamente controladas e, também, a energia de combustão obtida a partir da queima de um combustível industrial.

Neste material, restringiremos o nosso estudo à análise do processo de combustão em caldeiras, pois estes são os principais equipamentos para geração de vapor e de potência nas indústrias de processamento, mas vale ressaltar que os princípios aqui estudados podem ser facilmente estendidos para outras situações. Além disso, ressaltamos também que o interesse industrial da combustão consiste em maximizar a quantidade de calor produzida otimizando, portanto, a eficiência de uso do combustível. Primeiramente, vamos descobrir o que são os combustíveis industriais e como podemos definir o processo de combustão.

Muitos materiais são classificados como combustíveis, porém nem todos apresentam aplicabilidade como um combustível industrial. Todos os combustíveis podem ser encontrados nos estados sólido, líquido ou gasoso e podem ser obtidos naturalmente ou após processamento, porém, a aplicação industrial depende de alguns critérios como: estar disponível em quantidades razoavelmente grandes, a sua utilização na operação de combustão deve ser de baixo custo e este deve apresentar um poder calorífico apreciável. Os materiais que apresentam tais características são constituídos, majoritariamente, por carbono e hidrogênio e em menores quantidades por enxofre, nitrogênio, água e alguns metais.

Os combustíveis industriais apresentam muitas ligações químicas carbono-carbono e carbono-hidrogênio altamente energéticas. Essa energia química pode ser liberada mediante a reação com o oxigênio presente no ar atmosférico. Essa reação libera luz e grande quantidade de calor sendo denominada de combustão, cuja definição é um conceito que devemos assimilar.



Assimile

A **combustão** é definida como sendo um processo exotérmico com emissão de luz e liberação simultânea de uma determinada quantidade de **energia** na forma de **calor** a partir de uma reação química entre um material **combustível** e outro **comburente** com formação de produtos gasosos denominados de **gases de combustão**.

O material combustível é composto majoritariamente por carbono e hidrogênio, com pequenas concentrações de enxofre (contaminante). Os combustíveis reagem com o oxigênio presente no ar atmosférico, que tem composição mássica de 23% oxigênio e 77% nitrogênio, formando óxidos e vapor d'água, conforme exemplificado nas reações a seguir.

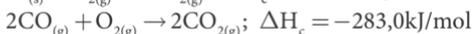


Exemplificando

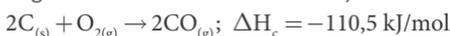
Considere um combustível industrial, por exemplo carvão mineral, composto por carbono, hidrogênio e enxofre, que reage com ar atmosférico. Exemplifique as possíveis reações exotérmicas de combustão.

Solução:

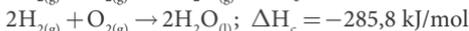
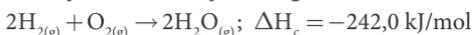
As possíveis reações incluem a combustão completa do carbono:



A combustão incompleta do carbono (ocorre quando a quantidade de oxigênio alimentado é insuficiente):



As reações de formação de água:



A oxidação do contaminante (enxofre):



O calor de combustão, isto é, a energia liberada pela combustão, é explicada por meio da entalpia de combustão específica (ΔH_c) que, por definição, admite valor negativo para reações exotérmicas. Toda entalpia de combustão é uma diferença entre o valor da entalpia no estado termodinâmico dos gases de combustão e um referencial teórico (temperatura de 298 K e pressão de 1 atm) no qual considera-se a entalpia como nula.

O Quadro 2.1 elenca os principais materiais utilizados como combustíveis industriais e todos os materiais nela listados apresentam as características mencionadas até o momento.

Estado	Combustíveis industriais
Sólido	Carvão mineral (hulha); Carvão vegetal; Coque verde de petróleo; Coque de carvão; Madeira; Resíduos do processamento da madeira; Bagaço de cana
Líquido	Óleo combustível; Óleo diesel; Óleo de xisto; Álcool; Alcatrão; Biodiesel
Gasoso	Gás natural (GN); Gás de refinaria; Gás CO; Gás de xisto; Gás de coqueria; Gás de alto-forno; Gás liquefeito do petróleo (GLP); Biogás

Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 32).



Pesquise mais

No Brasil e em boa parte do mundo, a principal fonte energética industrial ainda é oriunda da combustão de fontes não renováveis como o carvão mineral, o petróleo e o gás natural. Leia um pouco mais sobre as características de cada um destes combustíveis nas páginas 14 a 17, STUCHI, G. C. D. et al. **Geração termelétrica**: principais componentes e tipos de centrais termelétricas. 2015. 130f. Trabalho de conclusão de curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Dentre os diversos combustíveis industriais disponíveis no mercado, muitas indústrias de processamento optam por utilizar os óleos combustíveis e o GN, porém dependendo da disponibilidade regional e do preço de mercado, algumas empresas misturam os combustíveis com reaproveitamento de resíduos oriundos do processamento da madeira e da cana-de-açúcar ou biogás obtendo, dessa forma, menor impacto ambiental, menor geração de resíduos sólidos, menor dependência de combustíveis fósseis não renováveis e aumentando a lucratividade da empresa.



Refleta

Os combustíveis precisam ser **misturados com o oxigênio do ar** atmosférico a fim de realizarem uma combustão adequada, do contrário as características da combustão não serão atingidas. A mistura de um combustível gasoso com o ar é facilmente obtida, porém como podemos **realizar a mistura de um combustível sólido**, como o carvão por exemplo, adequadamente com o ar atmosférico? E para um **combustível líquido**?

Na **composição dos combustíveis industriais** existem alguns elementos, além do carbono e do hidrogênio, que são indesejáveis ao processo de

combustão. O enxofre é aquele cuja composição deve ser controlada atentamente, pois pode diminuir a eficiência da combustão reagindo com o oxigênio e formando óxidos de enxofre que são altamente poluidores do ambiente, podendo, inclusive, causar o fenômeno da Chuva Ácida (grave poluição ambiental). Porém, o principal problema causado por este elemento, em termos processuais, se deve ao seu elevado poder corrosivo que afeta os equipamentos e tubulações, acarretando grande risco às vidas humanas e prejuízo ao processo fabril.

A presença de nitrogênio como impureza nos combustíveis também é indesejável, pois a sua oxidação libera compostos de N_2O e NO_x que são prejudiciais à saúde. A umidade dos combustíveis também deve ser monitorada, pois em excesso acarreta problemas de estocagem, corrosão (agravando os efeitos do enxofre) e diminuição do poder calorífico da combustão, visto que parte da energia liberada na queima é transferida para o aquecimento das moléculas de água presentes inicialmente no combustível.

Outros elementos estão presentes em menores quantidades, como os metais (sódio, cálcio, vanádio, dentre outros) que compõem as cinzas e que acarretam problemas de corrosão e incrustação tanto nas partes quentes quanto nas partes frias das caldeiras e das tubulações.

Vejamos, na sequência, algumas características dos principais combustíveis utilizados pelas indústrias brasileiras.

Atualmente no Brasil, o combustível mais importante é o **petróleo**, pois dele derivam diversos óleos e gases utilizados como fonte energética na geração de vapor e de potência, além de muitos produtos químicos empregados em outros segmentos industriais e comerciais. O petróleo consiste em uma mistura majoritária de **hidrocarbonetos** e água e, minoritariamente, por contaminantes, estando geralmente associado ao gás natural. No Brasil, as maiores reservas de petróleo se encontram submersas na plataforma continental e abaixo da camada de pré-sal, sendo que a qualidade do petróleo pode variar bastante desde um óleo com aparência negra e viscosa, que contém pouco gás, até um óleo mais claro e de baixa densidade contendo bastante gás.

A etapa inicial de processamento do petróleo é denominada de processamento primário e pode ocorrer tanto em unidades *offshore* (plataforma marítima) quanto *onshore* (unidade terrestre), com a produção de óleos e gás natural a partir do processamento de óleo bruto (petróleo em estado líquido).

O óleo bruto contém água emulsionada com as moléculas de hidrocarbonetos. Essa umidade causa severos problemas no processamento e refino do petróleo e, por isso, a primeira etapa do processamento

primário consiste em remover a água emulsionada por meio de separadores de fase. No entanto, a eficiência desses equipamentos não é completa e o petróleo é dessalgado nas refinarias antes de sofrer a destilação. Já o processamento primário do gás natural visa depurar o gás, ou seja, remover a névoa que arrasta partículas líquidas que podem prejudicar os equipamentos do processo, remover contaminantes corrosivos (H_2S e CO_2) e desidratar o gás para evitar a formação de hidratos (entre a água, o metano e o etano) que causam entupimento dos gasodutos.

As maiores quantidades de **combustíveis derivados do petróleo** são produzidas após a destilação do petróleo bruto recebido nas refinarias. Dentre esses combustíveis encontram-se o coque verde, diesel, gasolina, naftas, óleo combustível, GLP, querosene, dentre outros. Os compostos orgânicos mais comuns presentes nos hidrocarbonetos (HC) que compõem o petróleo, suas concentrações e principais características estão apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 | Compostos orgânicos, composições e características dos HC do petróleo

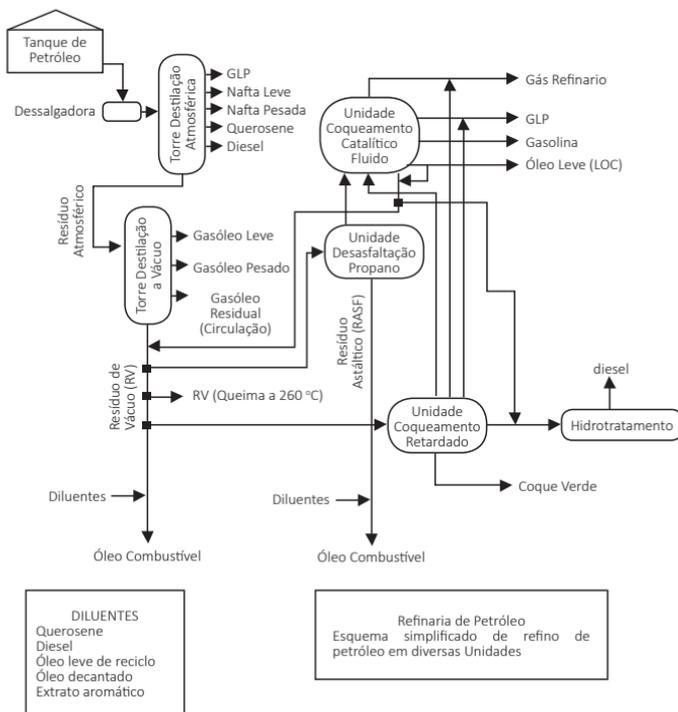
Composto orgânico	Concentração	Desejabilidade	Ocorrência
Organometálicos	$\leq 0,3\%$	Indesejáveis para a combustão	Presentes em todas as frações do petróleo destilado. Maiores concentrações são obtidas nos derivados mais pesados (geralmente utilizados na combustão)
Compostos de enxofre	$\sim 0,65\%$	Indesejáveis devido ao elevado poder corrosivo	Presente em maiores concentrações nas frações menos refinadas do petróleo
Compostos nitrogenados	$\sim 0,17\%$	Indesejáveis para a combustão gerando poluentes tóxicos	Maiores concentrações são obtidas nas frações pesadas do petróleo
Compostos oxigenados	Varia conforme a qualidade do petróleo	Indesejáveis, pois formam gomas e produtos corrosivos	Maiores concentrações são obtidas nas frações pesadas do petróleo
Asfaltenos e resinas	6,9 – 7,3%	Indesejáveis para a combustão	Maiores concentrações são obtidas nas frações pesadas do petróleo

Fonte: adaptado de Lagemann (2016, p. 40-41).

O **refino do petróleo** compreende muitas etapas e características impossíveis de serem abordadas por completo em um único livro. Por isso, vamos analisar um exemplo simplificado de uma refinaria, apresentada na Figura 2.2, a fim de sermos capazes de entender os aspectos

fundamentais e como os principais combustíveis derivados do petróleo são produzidos.

Figura 2.2 | Diagrama de blocos simplificado para o refino de petróleo



Fonte: Lagerman et al. (2016, p. 43).

O **óleo combustível** é uma das frações pesadas do petróleo oriunda na destilação a vácuo e, por sua elevada massa molar, apresenta alto poder calorífico sendo utilizado preferencialmente como combustível em caldeiras e fornos industriais. São óleos de composição variada, formados por hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos, aromáticos e olefinas, além de contaminantes como o enxofre, vanádio, sódio e níquel. Algumas substâncias aditivas podem ser adicionadas ao óleo para melhorar suas características comburentes, minimizar a emissão de partículas e melhorar as condições de armazenamento.

O **óleo diesel** é a fração do petróleo ligeiramente mais densa que o querosene formado por hidrocarbonetos, enxofre, nitrogênio e oxigênio. No Brasil, diferentes tipos de diesel são classificados de acordo com o percentual de enxofre (o limite máximo permitido é de 500 ppm) e são comercializados para fins de queima em motores a ciclo diesel.



Pesquise mais

As características e classificações do diesel são determinadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Pesquise mais sobre as classificações do diesel e suas qualidades lendo os artigos 3º, 8º e 9º da Resolução da ANP nº 50 de 23 de dezembro de 2013. Outros aspectos legais sobre produção de derivados do petróleo, processamento de gás natural, produção de biocombustíveis, informações do meio ambiente, importação e exportação, dentre outros aspectos legais, estão disponíveis na página da ANP.

O **gás de refinaria** pode ser recuperado de diversas etapas do refino apresentado na Figura 2.2, constituindo um gás formado por hidrogênio, alcanos de até 5 carbonos, nitrogênio, oxigênio, CO_2 , H_2S e água. Para ser utilizado, o gás sulfídrico precisa ser removido do gás de refinaria, normalmente, com o uso de um agente quelante como a dietanolamina (DEA). Este combustível normalmente é queimado nos fornos e caldeiras da própria refinaria de petróleo.

Uma pequena porção do petróleo formada por hidrocarbonetos insaturados e saturados de 3 ou 4 carbonos pode ser liquefeita formando o chamado **gás liquefeito do petróleo (GLP)**. O GLP é comumente utilizado nos lares domésticos como combustível de fogões e fornos por meio dos “botijões a gás”, mas ele também alimenta equipamentos comerciais e processos industriais e agrícolas.

Já o **gás natural** é a fase mais leve do petróleo e, devido à sua baixa composição em carbono, seu consumo como combustível aumentou nos últimos anos, pois emite baixa quantidade de compostos nocivos ao ambiente. Assim como a fração líquida do petróleo, o gás natural também é refinado em uma unidade de processamento formando gás residual (gás seco), etano, GLP e gasolina natural.



Pesquise mais

O Gás Natural (GN) possui uma cadeia própria de transporte e distribuição que é distinta da cadeia do petróleo e seus derivados. Pesquise mais sobre estas etapas lendo as páginas 48 e 49, IN: LAGERMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 304p.

Além do petróleo, uma rocha sedimentar denominada de xisto betuminoso pode ser processada para fornecer combustíveis valiosos. Tais combustíveis são óleos e gases com boas características de queima por serem leves, apresentarem considerável poder calorífico, fluidez adequada e de baixo teor de enxofre (ou seja, são pouco poluentes). São comercializadas duas formas do óleo combustível de xisto betuminoso, tipo E e tipo L, apresentando fluidez, densidade e poder calorífico

Um bom ponto inicial para análise do projeto consiste em escolher a etapa de formação do diesel após o hidrotreatamento. Como o diesel é um combustível que deve ser classificado e comercializado de acordo com o seu teor de enxofre, é importante realizar o controle desse teor após o hidrotreatamento. Este é um ponto essencial para garantir a qualidade do diesel, sua comercialização e o faturamento pela refinaria e, além disso, permite controlar a eficiência do hidrotreatamento.

Outro ponto importante para este tipo de análise (de enxofre), consiste em analisar o teor de enxofre previamente à destilação, pois o risco de corrosão dos equipamentos de processo pelos compostos de enxofre é muito alto e isto pode acarretar acidentes gravíssimos, inclusive com perda de muitas vidas humanas. Portanto, o nível de enxofre no petróleo inicial deve ser o mais baixo possível (normalmente 0,65%) e o limite máximo de enxofre que pode ser constatado no biodiesel produzido é de 500 ppm.

Vale ressaltar que a umidade potencializa os efeitos corrosivos do enxofre, portanto, incluir uma análise de umidade no petróleo antes do processo de destilação também é interessante para que o operador do processo possa controlar a umidade da corrente de alimentação da torre de destilação.

A unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC) é uma importante etapa do refino de petróleo que tem a função de transformar substâncias de pouco valor agregador em combustíveis valiosos como é o caso da gasolina, por exemplo. Portanto, é importante analisar a composição dos hidrocarbonetos presentes neste combustível (octanagem), a fim de controlar a sua qualidade e fornecer um produto adequado aos clientes consumidores. Também deve-se controlar a qualidade dos demais combustíveis produzidos na unidade de FCC mediante análises em cada linha de processo, dos compostos organometálicos, contaminantes, poder calorífico, fluidez, teor de cinzas, dentre outros.

Para encerrar o seu relatório sobre a análise da planta de refino de petróleo, você pode aplicar o mesmo raciocínio utilizado na unidade de FCC para as demais etapas do refino, por exemplo, controlar as características dos gasóleos obtidos a partir da destilação a vácuo. Assim, você pode encerrar o projeto e apresentá-lo ao seu chefe para ser entregue ao cliente.

No entanto, a solução do projeto não é única e você executou apenas uma das possíveis alternativas. Um analista que preze demasiadamente pela segurança, por exemplo, pode elaborar um projeto realizando análises de todas as características dos combustíveis em todas as linhas de processo. No entanto, dificilmente esta seria uma boa solução, nem seria aprovada pelo engenheiro-chefe, pois tornaria o controle de qualidade caro e demorado. A experiência adquirida com estudo, treinamento e a vivência prática são boas

ferramentas para orientar o analista a entender o processo de produção dos combustíveis, a fim de identificar os pontos essenciais que influenciarão na qualidade da combustão desses materiais.

Avançando na prática

Análise de combustível adulterado

Descrição da situação-problema

Após muitas denúncias por parte de motoristas de caminhão acerca da quebra de motores devido à comercialização de diesel adulterado por um posto de combustíveis, você, um analista de laboratório de combustíveis, foi encaminhado para fazer uma análise do combustível mencionado e constatou teor de 1,2% de enxofre, 0,33% de compostos nitrogenados e a presença de gomas nos reservatórios de armazenagem do combustível. Não foi encontrado selo de qualidade do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) em vistoria ao posto. Você precisa, neste momento, emitir um parecer técnico que será incluído ao processo aberto entre uma associação de motoristas contra o posto de combustível.

Resolução da situação-problema

As análises de amostras do combustível revelaram dados preocupantes sobre a qualidade do diesel. O teor de enxofre ultrapassou a quantidade máxima permitida de 500 ppm que pode estar presente no diesel comercializado, sendo que diesel de melhor desempenho apresenta índices ainda menores (10 ppm). Ademais, os resultados das análises demonstram uma elevada concentração de compostos nitrogenados, atingindo quase o dobro da quantidade normalmente presente (0,17%). Além disso, gomas são substâncias que se formam no diesel devido à sua oxidação com o ar atmosférico em um processo natural e lento de degradação. A presença de gomas é indesejável, pois pode causar problemas de partida e de combustão nos veículos.

A análise dos dados demonstra que o combustível não foi intencionalmente adulterado, pois não foram encontradas substâncias estranhas como etanol (que é a prática mais comum de adulteração), ou solventes. Os dados revelam que o diesel comercializado é de péssima qualidade, refletido pela ausência do selo do Inmetro. Portanto, como os índices de qualidade estão abaixo do permitido pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), medidas legais cabíveis devem ser tomadas a fim de

impedir a comercialização do combustível até sua normalização para os padrões previstos em lei.

Faça valer a pena

1. A matriz energética da indústria brasileira é majoritariamente dependente da queima de combustíveis fósseis. Diversos combustíveis não renováveis são queimados diariamente a fim de que o calor liberado pela combustão seja usado para produzir vapor, gerar potência e aquecer correntes de processos. Sobre o processo de combustão, julgue as afirmações a seguir.

- I. Uma reação de combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica com liberação simultânea de calor e emissão de luz. A reação química ocorre devido ao combustível na presença do oxigênio, denominado comburente, e tem a formação de gases quentes denominados de gases de combustão.
- II. Alguns combustíveis não renováveis utilizados pelas indústrias de processamento são: a madeira, o carvão mineral, o petróleo e biodiesel.
- III. Em termos industriais, a função da combustão é fornecer calor de forma otimizada para máximo aproveitamento energético do combustível.
- IV. A reação de combustão industrial somente é realizada com combustíveis fósseis, isto é, não existem combustíveis renováveis que possam ser utilizados na alimentação de fornalhas e caldeiras industriais.

Assinale a alternativa abaixo que apresenta todas as afirmações verdadeiras.

- a) I, apenas.
- b) III, apenas.
- c) I e II, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) II, III e IV apenas.

2. O petróleo é um 'óleo de pedra' que pode ser separado em diversos produtos de interesse. Esse processo de separação dos diversos constituintes do petróleo é denominado, na indústria, de destilação e os produtos são combustíveis de propriedades valiosas. Sobre os produtos derivados do petróleo, analise as afirmações a seguir.

- I. As reservas de petróleo podem estar localizadas em terra ou no subsolo marítimo e são classificadas em reservatório de gás associado, quando há gás natural associado ao petróleo, e gás não associado quando somente o petróleo se faz presente.
- II. O processamento primário do petróleo consiste na primeira etapa de separação dos seus constituintes, ou seja, na etapa de destilação propriamente dita.
- III. Alguns combustíveis que são derivados do petróleo são: GLP, gasolina, biodiesel, óleos combustíveis e coque.

IV. O gás natural é uma mistura de propano, propeno, butano e buteno armazenados sob pressão nos 'botijões a gás' formando uma mistura 85% líquida e 15% gasosa.

Assinale a alternativa que contém apenas afirmações verdadeiras.

- a) Nenhuma afirmação é verdadeira.
- b) I e II, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) III, III e IV, apenas.
- e) I, II, III e IV.

3. O gás CO é formado por uma mistura de gás inerte e de CO em proporções distintas. Ele é formado durante o refino do petróleo nas unidades de craqueamento catalítico. Sua energia térmica é utilizada, normalmente, na própria unidade de craqueamento como um complemento energético de outros combustíveis empregados.

Assinale a alternativa que apresenta a justificativa do gás CO não ter um bom rendimento térmico como combustível industrial.

- a) O valor de mercado do gás CO não justifica seu uso como combustível.
- b) O gás CO, por ser uma mistura de gás inerte e CO, apresenta uma queima muito instável, o que causa instabilidade na chama das caldeiras.
- c) A quantidade de gás subproduzida nas unidades de craqueamento catalítico é muito pequena para apresentar relevância industrial.
- d) O gás CO somente é utilizado para se evitar a emissão de compostos poluentes para a atmosfera e não apresenta nenhum outro benefício industrial.
- e) A quantidade de CO é muito pequena no gás e a sua entalpia de combustão é baixa se comparada com a da combustão completa do carbono.

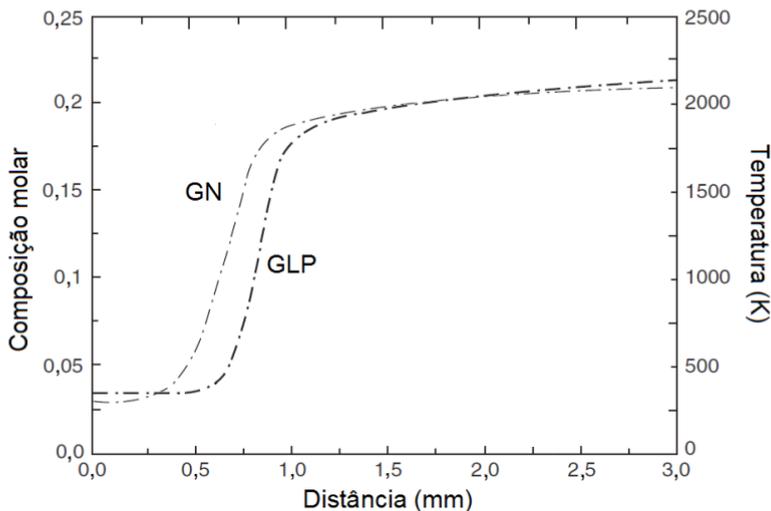
Combustão de gases

Diálogo aberto

Na seção anterior vimos algumas propriedades dos combustíveis industriais empregados no processo de combustão para fornecerem energia na geração de vapor. Nesta seção, nosso intuito é aprofundar os conhecimentos a respeito dos combustíveis gasosos. Assim como em nossas residências, alguns estabelecimentos comerciais e restaurantes utilizam a combustão de gás natural (GN) ou do gás liquefeito do petróleo (GLP) para o preparo de alimentos. Mas a importância de tais combustíveis gasosos vai muito além dessas aplicações. No nosso cotidiano, por exemplo, o GN é utilizado como fonte energética em automóveis e na indústria, o GLP é utilizado na produção de vidros e cerâmicas, dentre outras aplicações.

Para estudarmos como os combustíveis gasosos são empregados industrialmente, lembre-se de que o colocamos como analista de um laboratório de controle de qualidade de combustíveis de uma empresa que também realiza projetos de engenharia na área de energia. Neste momento, o laboratório que você trabalha foi contratado por uma pequena empresa química que irá instalar uma caldeira para geração de potência alimentada por dois combustíveis gasosos distintos, pois o cliente tem disponível GLP e GN para queimar. Você foi incumbido de apresentar ao cliente qual a duração de seus respectivos estoques, a fim de o cliente decidir qual combustível apresenta melhor viabilidade, ou seja, qual estoque fornecerá energia para a combustão por mais tempo. O cliente afirma que tanto o GLP quanto o GN serão queimados na mesma caldeira com velocidade de combustão, respectivamente, de 0,35 m/s e 0,20 m/s. Além disso, o GLP está armazenado em um tanque com 120 ton e o GN em tanques totalizando 50 ton, ambos a 25 °C. Para efetuar os seus cálculos, você pode utilizar o gráfico do perfil de temperatura de chama apresentado na Figura 2.3 e considerar comportamento de gás ideal tanto para o GLP quanto para o GN. Além disso, considere as seguintes propriedades: $\alpha_{\text{GN}} = 2,311 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho_{\text{GN}} = 0,660 \text{ kg/m}^3$, $\alpha_{\text{GLP}} = 4,532 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\rho_{\text{GLP}} = 20,60 \text{ kg/m}^3$.

Figura 2.3 | Perfil de temperatura para a combustão de GLP e GN inicialmente à 298 K



Fonte: adaptada de Glassman e Yetter (2008, p. 170 e 171).

Para solucionar esse projeto, algumas perguntas podem lhe ajudar: quais características distinguem a combustão dos gases mencionados? O que é velocidade de chama e como ela afeta o perfil de temperatura da combustão? O modo de introdução do combustível e do comburente na região de queima influencia a liberação de energia?

Para responder tais perguntas é preciso conhecer as tecnologias empregadas na combustão de combustíveis gasosos, compreender como os jatos são usados para alimentar o combustível nas caldeiras e a formação das chamas, assim como o limite de inflamabilidade dos diferentes tipos de gases empregados nas caldeiras. Esses conteúdos são importantes para solucionar esse projeto e para sua formação. Vamos estudá-los agora!

Não pode faltar

Nas condições normais de temperatura e pressão, alguns combustíveis podem apresentar-se no estado sólido como o carvão mineral, alguns apresentam-se no estado líquido tais como a gasolina, o diesel e o etanol, enquanto outros são naturalmente gasosos como é o caso do gás natural, gás de refinaria, gás CO, dentre outros. Existem tecnologias disponíveis para se aproveitar a energia de cada tipo de combustível, por meio de sua combustão,

tanto em nível industrial quanto em escala individual. Por exemplo, muitos automóveis são impulsionados através da queima do gás liquefeito de petróleo (GLP), o que representa uma tecnologia de combustão de gases em pequena escala. Em nível industrial, algumas refinarias de petróleo produzem o gás de refinaria como subproduto e realizam a sua queima para reaproveitamento energético na própria seção de refino, representando, portanto, uma aplicação de grande escala da tecnologia de combustão de gases.

O estado de agregação de um determinado combustível, isto é, se ele se apresenta naturalmente no estado sólido, líquido ou gasoso irá ditar algumas vantagens em relação aos demais combustíveis. Nesta seção, nosso interesse é estudar os combustíveis gasosos e, para isso, Lagemann (2016, p. 53) elenca algumas vantagens dos combustíveis gasosos em relação aos líquidos e sólidos. São elas: custo para instalação mais baixo, maior simplicidade operacional, maior resistência à corrosão, manutenção menos onerosa e menor impacto ambiental.

Para um melhor aproveitamento das vantagens dos combustíveis gasosos, é necessário conhecer algumas de suas propriedades, as quais proporcionam um desempenho ótimo durante sua utilização. Tais propriedades são: densidade (relativa e absoluta), poder calorífico, calor específico, jatos, velocidade de queima, chama de gás e os limites de inflamabilidade. Dada a importância de tais propriedades para a tecnologia de combustão de combustíveis gasosos, é fundamental analisarmos cada uma delas.

A **densidade** é uma importante propriedade dos gases, inclusive por questões de segurança e não deve ser confundida com a massa específica. A massa específica (ou densidade absoluta) é uma propriedade intrínseca dos materiais que relaciona a massa com o volume ocupado por essa massa com unidade de medida dada por kg/m^3 . Já a densidade relativa representa a razão entre a massa específica de um material pela massa específica de um material de referência, geralmente a água é referência para líquidos e o ar para gases. A fórmula matemática para o cálculo da densidade relativa é:

$$d_{\text{relativa}} = \frac{d_{\text{absoluta}}^{\text{material}} \left(\text{kg/m}^3 \right)}{d_{\text{absoluta}}^{\text{referência}} \left(\text{kg/m}^3 \right)}$$

Na sequência, a Tabela 2.1 apresenta a densidade absoluta e relativa de alguns dos gases combustíveis mais empregados na queima industrial. Observe a diferença numérica entre ambas as propriedades e que para o GLP, por ser liquefeito, as densidades são bem maiores.

Tabela 2.1 | Valores de densidade relativa e absoluta de alguns gases combustíveis e para o GLP

Combustíveis	Densidade absoluta (kg/m ³)	Densidade relativa (adimensional)
Gás Natural da Bolívia	0,774	0,598
Gás Natural de Santos	0,820	0,634
GLP	2,236	1,729
Gás de Refinaria (FCC)	0,855	0,661
Gás de Xisto	0,994	0,768

Fonte: Lagemann (2016, p. 55).



Assimile

Na língua inglesa, *density* se refere à massa específica, porém alguns materiais didáticos apresentam a tradução como densidade. Nesses casos, observe sempre as unidades de medida, já que densidade relativa é uma propriedade adimensional e a massa específica tem unidade massa/volume.

Quando o combustível é composto por uma mistura de n gases distintos, então a sua densidade absoluta é determinada por meio de uma regra de mistura, conforme apresentada a seguir

$$d = \sum_{i=1}^n x_i d_i$$

Em que x_i representa a fração molar do gás i e d_i é a densidade do respectivo gás.

Quanto ao **poder calorífico**, este se refere à quantidade de calor liberada pela queima do combustível. A presença de água causa uma diferenciação entre poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), sendo que a diferença de energia entre o PCS e o PCI se deve ao aquecimento e vaporização da umidade presente no combustível. Não é de se estranhar que quanto maior a umidade de um combustível, menor é o seu poder calorífico e, portanto, menor o desempenho da combustão. Esta propriedade pode ser determinada por cálculos teóricos ou por meio de ensaios laboratoriais que possuem maior precisão. As unidades usuais do poder calorífico são kJ/kg ou kJ/m³, porém a Tabela 2.2 apresenta os valores de capacidade calorífica para alguns combustíveis em várias unidades.

Tabela 2.2 | Valores de capacidade calorífica para alguns gases combustíveis e GLP

Combustíveis		$\text{kJ/m}^3\text{n}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ (20°C e 1 atm)	$\text{kcal/m}^3\text{n}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$ (20°C e 1 atm)	kJ/kg	kcal/kg
GN da Bolívia	PCS	39 440	36 748	9 413	8 771	48 274	11 532
	PCI	35 580	33 151	8 492	7 912	43 550	10 404
GN de Santos	PCS	41 340	38 518	9 866	9 193	50 560	12 088
	PCI	37 370	34 819	8 919	8 310	45 741	10 927
GLP	PCS	40 845	37 603	9 744	9 079	49 933	11 927
	PCI	37 603	35 037	8 941	8 368	46 026	10 993
Gás ref. (FCC)	PCS	38 240	35 630	9 126	8 504	46 801	11 180
	PCI	34 860	32 480	8 319	7 752	42 663	10 192
Gás de xisto	PCS	44 980	41 910	10 735	10 003	55 055	13 152
	PCI	41 090	38 285	9 807	9 138	50 294	12 015

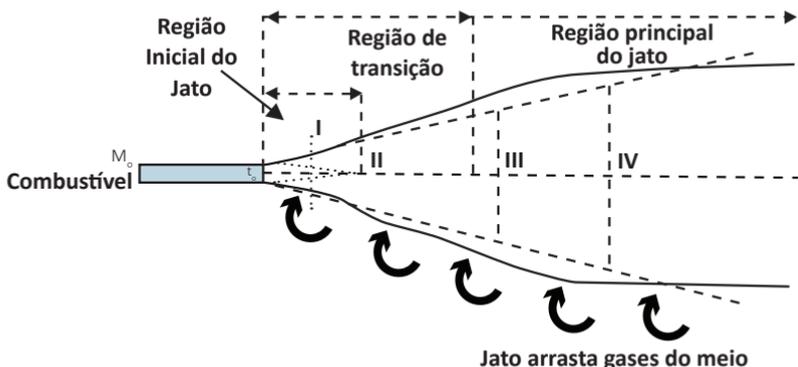
Fonte: Lagemann (2016, p. 56).

O **calor específico** é uma propriedade utilizada para relacionar o quanto de energia é necessária para que uma unidade mássica de um material varie sua temperatura em uma unidade. A grande utilidade desta propriedade está no cálculo da quantidade de energia necessária para aquecimento do combustível até a temperatura da combustão.

A introdução do combustível gasoso (ou mistura de combustíveis) com o comburente normalmente é realizada por meio de um bico injetor. O fluxo gasoso que escoava através do bocal é denominado de **jato**, podendo ser livre quando não há influência do meio externo sobre o escoamento ou, então, confinado quando o ambiente causa recirculação.

Ao atravessar o bocal, os jatos normalmente se expandem de forma cônica conforme apresentado na Figura 2.4, que apresenta um jato livre a partir de um bocal singular de área simples. Podemos observar a presença de três regiões distintas ao longo do desenvolvimento do jato.

Figura 2.4 | Regiões de jato livre devido ao escoamento de um gás através de um bocal simples



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 58).

A região inicial compreende a distância horizontal de até nove vezes o comprimento do raio do bocal (r_0) em que a velocidade axial do jato não é função do raio e este se expande em formato cônico. Ao longo do seu desenvolvimento (região de transição), a velocidade axial do jato é diminuída e a sua área se expande devido ao arraste dos gases do meio que se incorporam ao jato. Em determinado momento (região principal), o jato adquire área máxima e não se expande ademas, tendo percorrido 16 vezes o raio do bocal e podendo se estender até $200 r_0$. O ângulo compreendido entre o jato principal e o bocal é de 20° , aproximadamente. É possível aumentar a quantidade de gás ambiente que é misturado ao gás do jato principal por meio da sua rotação.



Pesquise mais

A introdução de combustível gasoso na câmara de combustão de uma caldeira, assim como o ar comburente, é um caso de jato confinado. Para conhecer os fundamentos dos jatos confinados, leia as páginas 61 – 64, IN: LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

Além de ser introduzido em um ambiente confinado, o jato de combustível (e o comburente) injetado na câmara de combustão também é descarregado sob rotação. A combinação confinamento-rotação visa: uma ignição próxima ao bocal do maçarico, uma queima com chama em formato circular, estável e de menor comprimento, uma transferência de calor conduzido nas paredes da câmara de combustão mais eficiente e uma menor taxa de emissão de CO e de compostos de nitrogênio, NO_x , considerado um dos principais poluentes (LAGEMANN, 2016, p. 65).

A **velocidade de queima** também é um importante parâmetro a ser estudado para um bom controle e aproveitamento da energia de combustão dos combustíveis. Como o próprio nome sugere, a velocidade de chama representa a velocidade com a qual a frente de chama (região de queima) se propaga ao longo de uma mistura combustível gasosa.



Refleta

Uma vez que a velocidade de chama é definida como a velocidade com a qual a frente de chama ocasiona a reação do gás combustível com o ar (combustão) em relação a uma certa direção, podemos dizer que um gás combustível mais denso terá maior, menor ou idêntica velocidade de chama se comparado a um gás de menor densidade? E se a pressão do ambiente for aumentada, como isto afetará a velocidade de chama?

A **velocidade de chama** em condições controladas é subsônica, ou seja, os processos industriais de queima de combustíveis, o uso de fogão a gás em residências, maçaricos de propileno em marcenarias, turbinas a gás, dentre outras situações, empregam chamas subsônicas. Quando a velocidade de chama é supersônica, ocorre o que chamamos de detonação. Não estamos interessados em explorar chamas supersônicas neste material, apenas queimadores subsônicos nos quais a velocidade de chama é laminar.



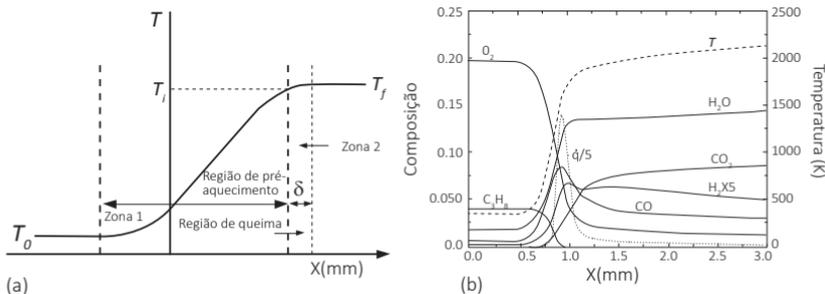
Pesquise mais

As chamas podem ser classificadas em vários tipos dependendo de algumas condições, por exemplo, se a mistura de gases combustível/ar está em repouso ou em movimento. Devido a este fato, existem vários testes para se determinar a velocidade de chama de acordo com seu tipo. Leia sobre seis testes apresentados nas páginas 30 – 32, IN: PATIÑO, M. A. M. **Medições da velocidade de chama laminar em reator a volume constante para etanol, n-butanol, n-decano, e suas misturas**. 2017. 119f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

A velocidade de chama é importante para o projeto de alguns equipamentos como queimadores e turbinas, porém ela é dependente do perfil de temperatura criado pela frente de chama. Observe a Figura 2.5 que apresenta as principais regiões e temperaturas para o perfil de temperatura ocasionado pela frente de chama (a) que se move da direita para a esquerda e o mesmo perfil para os produtos da combustão de uma mistura propano-ar (b). Note

que T_0 representa a temperatura dos gases não reagidos, T_i é a temperatura de ignição (no início da região de queima de comprimento δ) e T_f é a temperatura final da combustão (produtos formados).

Figura 2.5 | Perfil de temperatura em uma frente de chama (a) e perfil de temperatura na combustão de uma mistura propano-ar inicialmente a 298 K (b)



Fonte: adaptada de Glassman e Yetter (2008, p. 154 e 170).

A velocidade de chama laminar (S_L) depende de vários fatores como o perfil de temperatura apresentado na Figura 2.5, da difusividade térmica ($\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$), da massa específica do combustível antes da queima (ρ em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), da capacidade calorífica (c_p em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), da velocidade de combustão (\dot{w} em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) e do comprimento da região de queima (δ em m) conforme a expressão a seguir.

$$S_L = \sqrt{\frac{k(T_f - T_i)}{\rho \cdot c_p (T_i - T_0)} \cdot \frac{\dot{w}}{\rho}} = \frac{k(T_f - T_i)}{\rho \cdot c_p (T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1} = \frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1}$$

E a taxa de consumo de combustível (\dot{m} em $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) é determinada pela expressão:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \dot{w} \cdot \delta$$



Exemplificando

Baseado no perfil de temperatura da mistura propano-ar e considerando uma velocidade de chama laminar de 40 cm/s, determine o comprimento da região de queima (δ), considerando que $\alpha = 4,53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Solução:

Para uma velocidade de chama linear, vale a expressão:

$$S_L = \frac{k(T_f - T_i)}{\rho \cdot c_p (T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1} = \frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1}$$

A partir da Figura 2.5 notamos que a temperatura dos gases não queimados é igual à temperatura ambiente de 298 K, a temperatura de ignição e a dos gases de combustão são, aproximadamente, 1750 K e 2200K. Substituindo os valores na expressão anterior, segue que:

$$0,4 \text{ m/s} = \frac{(4,53 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})(2200 - 1750)\text{K}}{(1750 - 298)\text{K}} \cdot \delta^{-1}$$

Ou seja,

$$\delta = 3,51 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Portanto, a região de queima mede, aproximadamente, 0,35 mm.

A ignição do combustível depende de sua mistura com o oxidante (comburente) e, para que isso ocorra, é necessário misturar ambos os gases. Quando essa mistura se dá anteriormente à zona de ignição, classificamos a chama como sendo pré-misturada, que pode ser de dois tipos conforme classificação de Lagemann (2016, p. 69).

Laminares: bico de Bunsen, queimadores de fogões, queimadores de placas porosas radiantes, queimadores de corte de vidro, etc.

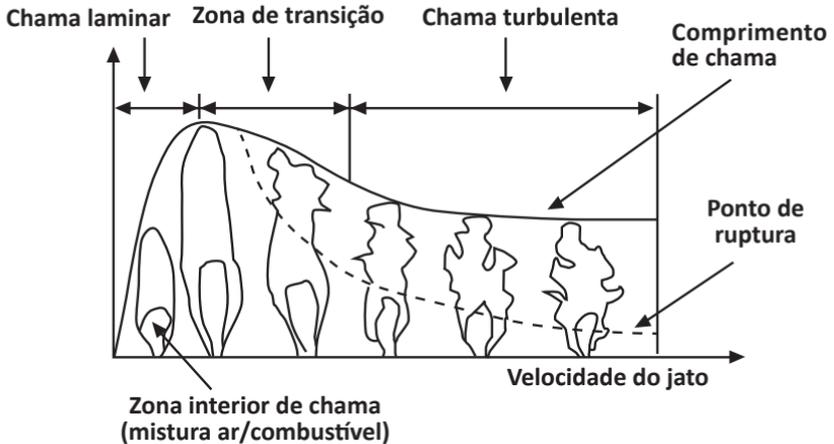
Turbulentas: fornos petroquímicos, fornos de reaquecimento de placas, turbinas específicas a gás, etc.

No entanto, por questões de segurança, as chamas de pré-mistura não são comuns na indústria. Os processos industriais operam com grandes quantidades de combustíveis e, para sua combustão, é necessário pré-misturar um elevado volume de oxidante, que é uma situação muito propícia para a rápida propagação da chama (explosão). A prática adotada consiste em introduzir o combustível em uma câmara contendo o oxigênio, isto é, a mistura é realizada após a descarga do jato de combustível e a chama se denomina de chama de difusão. Fósforos, velas e lampiões são exemplos de chama de difusão laminares, já caldeiras, fornos e turbinas a gás consistem em equipamentos que empregam chamas de difusão turbulentas.

As chamas laminares são notadamente marcadas por um comportamento de queima ordenado e bem definido, apresentando um determinado comprimento (ou altura) de chama. Ao aumentarmos a vazão de combustível (aumento da velocidade de escoamento dos gases) ocorre, naturalmente, um aumento do número de Reynolds e o escoamento se torna turbulento.

A turbulência no escoamento causa instabilidade na chama originando um ponto de ruptura a partir do qual a queima ocorre de modo aleatório (turbulento), conforme apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 | Desenvolvimento de uma chama laminar para turbulenta



Fonte: Lagemann (2016, p. 71).

Como a turbulência está relacionada ao aumento da vazão de combustível e, também, com uma transferência térmica e mássica mais intensa, é comum que chamas turbulentas consumam maior quantidade de combustível e produzam calor a uma taxa consideravelmente maior do que chamas laminares. Muitos equipamentos industriais como caldeiras e fornos são projetados para operarem com chamas turbulentas. No entanto, caldeiras do tipo aquatubulares necessitam de uma chama curta para que esta não incida sobre as paredes opostas aos queimadores.



Pesquise mais

A estabilidade de uma chama depende de diversos fatores e pode ocasionar três fenômenos indesejáveis: deslocamento (*lift-off*), apagamento (*blowout*) e retorno (*flashback*). Leia sobre a estabilidade de chama e sobre estes fenômenos nas páginas 72-76, IN: LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

Para que a queima do combustível ocorra, é necessário manter a mistura combustível-ar com uma composição tal que esteja entre os limites de inflamabilidade. Mas você deve estar se perguntando, o que são os limites de inflamabilidade?

O **limite de inflamabilidade** inferior representa o menor teor de combustível que deve estar misturado com o ar a fim de ocorrer a combustão. Essa queima é dita pobre, pois produz gases como o monóxido de carbono. No entanto, a queima se torna rica se a quantidade de combustível for aumentada até o limite máximo de inflamabilidade. Acima desse ponto, ou abaixo do limite inferior, a combustão não ocorre, pois a energia liberada pela combustão não é capaz de atingir a temperatura de ignição da mistura combustível-ar devido às trocas térmicas com as redondezas.

De acordo com Lagemann (2016, p. 77), os fatores que influenciam na inflamabilidade de um combustível são: a estrutura molecular do combustível, natureza do comburente, teor de inertes na mistura, temperatura e pressão ambiente e as condições das vizinhanças da região de queima e do escoamento. A presença de gases inertes é indesejável na queima, pois impactam na inflamabilidade do combustível, visto que tais inertes se misturam com os vapores inflamáveis, podendo levar à extinção da chama. Além disso, a temperatura dos gases é um parâmetro importante de ser controlado, pois o aumento da temperatura amplia a faixa de inflamabilidade da mistura combustível-ar.

O limite de inflamabilidade de uma mistura de n combustíveis pode ser determinada por meio da equação de Le Chatelier apresentada na sequência, em que x_i representa a fração molar do gás na mistura e L_i o limite de inflamabilidade do respectivo componente.

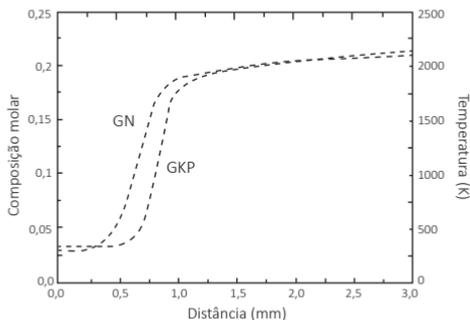
$$L_M = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{L_i}}$$

Nessa equação, L_i pode ser utilizado como sendo o limite superior ou inferior para obtenção, respectivamente, do limite de inflamabilidade superior ou inferior da mistura (L_m). Ambos são parâmetros adimensionais.

Sem medo de errar

Agora, nós iremos solucionar o projeto no qual você está trabalhando. Vamos lembrá-lo? O cliente possui dois reservatórios combustíveis para GLP e GN com, respectivamente, 120 e 50 kg armazenados a 25°C. O cliente forneceu a velocidade de combustão de cada material e contratou o seu serviço para que determinasse em quanto tempo de combustão seus estoques

Figura 2.3 | Perfil de temperatura para a combustão de GLP e GN inicialmente à 298 K



Fonte: adaptada de Glassman e Yetter (2008, p. 170 e 171).

combustíveis. Para isso, é necessário utilizar a seguinte expressão:

$$S_L = \sqrt{\frac{k(T_f - T_i)}{\rho \cdot c_p(T_i - T_0)} \cdot \frac{\dot{w}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \frac{\dot{w}}{\rho}}$$

Para utilizá-la, é necessário obter as temperaturas a partir dos perfis apresentados na Figura 2.3. Como ambos os combustíveis são alimentados na temperatura ambiente, então $T_0^{\text{GLP}} = T_0^{\text{GN}} = 298 \text{ K}$, a leitura da temperatura de ignição para o GLP e GN são, respectivamente, $T_i^{\text{GLP}} = 1650 \text{ K}$ e $T_i^{\text{GN}} = 1750 \text{ K}$. Já as temperaturas dos produtos formados são, respectivamente, $T_f^{\text{GLP}} = 2250 \text{ K}$ e $T_f^{\text{GN}} = 2200 \text{ K}$.

Substituindo os valores para o GLP, encontramos que a vazão mássica de combustível consumido na queima é:

$$S_L^{\text{GLP}} = \sqrt{\frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \frac{\dot{w}_{\text{GLP}}}{\rho}} \rightarrow 0,35 \text{ m/s} = \sqrt{\frac{(4,532 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})(2250 - 1650) \text{ K}}{(1650 - 298) \text{ K}} \cdot \frac{\dot{w}_{\text{GLP}}}{(20,60 \text{ kg/m}^3)}}$$

$$\dot{w}_{\text{GLP}} = 12546,97 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$$

E para o gás natural, temos que sua vazão mássica é:

$$S_L^{\text{GN}} = \sqrt{\frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \frac{\dot{w}_{\text{GN}}}{\rho}} \rightarrow 0,20 \text{ m/s} = \sqrt{\frac{(2,311 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})(2200 - 1750) \text{ K}}{(1750 - 298) \text{ K}} \cdot \frac{\dot{w}_{\text{GN}}}{(0,660 \text{ kg/m}^3)}}$$

$$\dot{w}_{\text{GN}} = 3686,0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$$

Agora, utilizamos a segunda forma dessa mesma expressão para determinar δ (comprimento da região de queima) dos combustíveis.

$$S_L = \frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1}$$

durariam a fim de verificar qual combustível tem melhor viabilidade de ser queimado na caldeira. Para os seus cálculos, você pode utilizar as informações de temperatura contidos na Figura 2.3.

O primeiro passo na solução deste projeto consiste em determinar a velocidade de combustão

(\dot{w}) para cada um dos

Substituindo os valores para o GLP, temos que:

$$S_L^{GLP} = \frac{(4,532 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})(2250 - 1650)}{(1650 - 298)} \cdot \delta_{GLP}^{-1} = 0,35 \text{ m/s} \rightarrow \delta_{GLP} = 5,75 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Substituindo os valores para o GN, temos que:

$$S_L^{GN} = \frac{(2,311 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})(2200 - 1750)}{(1750 - 298)} \cdot \delta_{GN}^{-1} = 0,20 \text{ m/s} \rightarrow \delta_{GN} = 3,58 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Utilizando a equação da vazão mássica, determinamos a quantidade consumida na combustão para cada um dos combustíveis. Então, para o GLP, utilizando uma área unitária como base de cálculo, temos que:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \dot{w} \cdot \delta \rightarrow \frac{\dot{m}_{GLP}}{1 \text{ m}^2} = [12546,97 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})] \cdot (5,75 \times 10^{-4} \text{ m}) \rightarrow \dot{m}_{GLP} = 7,21 \text{ kg/s}$$

Como o cliente possui 120 ton de GLP, seus estoques irão durar:

$$\Delta t = \frac{m}{\dot{m}_{GLP}} = \frac{120000 \text{ kg}}{7,21 \text{ kg/s}} = 16643,55 \text{ s} = 4,62 \text{ h}$$

Repetindo o mesmo procedimento para o GN, segue que a quantidade consumida é:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \dot{w} \cdot \delta \rightarrow \frac{\dot{m}_{GN}}{1 \text{ m}^2} = [3686,0 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})] \cdot (3,58 \times 10^{-5} \text{ m}) \rightarrow \dot{m}_{GN} = 0,132 \text{ kg/s}$$

E o tempo de duração do estoque de 50 ton é de:

$$\Delta t = \frac{m}{\dot{m}_{GN}} = \frac{50000 \text{ kg}}{0,132 \text{ kg/s}} = 378787,88 \text{ s} = 105,2 \text{ h}$$

Como o estoque de GLP será consumido em menos de 5 h de operação, não seria adequado usá-lo na caldeira, devido à necessidade de muitas paradas para reabastecimento. O GN com duração de 105 h é mais adequado para este serviço. Com isso, finalmente seu projeto está completo e o cliente satisfeito.

Avançando na prática

Desenvolvimento de aditivos para combustíveis

Descrição da situação-problema

Você trabalha no departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos de uma grande refinaria de combustíveis. Um dos produtos em desenvolvimento por você e sua equipe consiste de um aditivo químico para ser adicionado à gasolina que melhorará a sua vaporização e queima em veículos de motores a combustão. Neste momento, você precisa determinar o comprimento da zona de queima da mistura combustível-aditivo-ar.

Algumas propriedades físico-químicas do aditivo já foram determinadas pela sua equipe. São elas: $\alpha = 5,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $S_L = 0,10 \text{ m/s}$, $T_0 = 298 \text{ K}$, $T_i = 800 \text{ K}$ e $T_f = 1200 \text{ K}$.

Resolução da situação-problema

Conforme as propriedades fornecidas, é possível utilizar a equação da velocidade de chama linear no seguinte formato:

$$S_L = \frac{\alpha(T_f - T_i)}{(T_i - T_0)} \cdot \delta^{-1}$$

Substituindo os valores das propriedades determinadas pela sua equipe é possível determinar o comprimento da região de queima para o aditivo químico da gasolina. Neste caso, a substituição dos valores revela que:

$$0,10 \text{ m/s} = \frac{(5,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})(1200 - 800)\text{K}}{(800 - 298)\text{K}} \cdot \delta^{-1} \rightarrow \delta = 4,31 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,43 \text{ mm}$$

Portanto, a região de queima da mistura combustível-ar-aditivo mede, aproximadamente, 0,43 mm. Isto encerra a etapa de determinação de propriedades do aditivo e o produto pode ser encaminhado para outras etapas do desenvolvimento. Bom trabalho!

Faça valer a pena

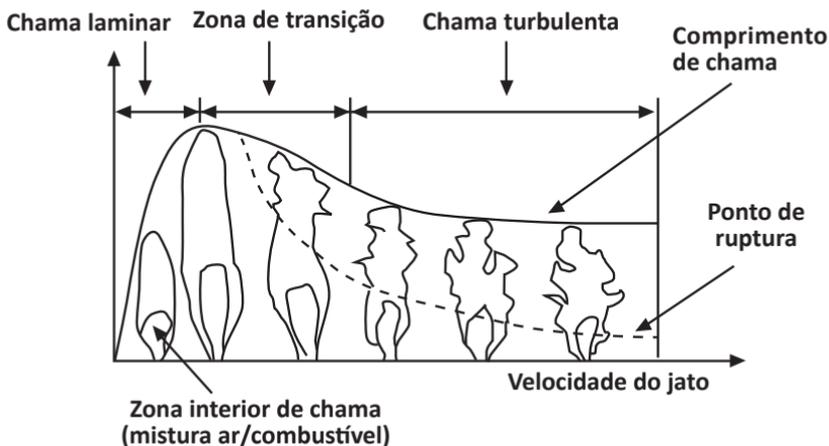
1. Os combustíveis industriais se apresentam em diversos estados de agregação. O carvão mineral é um exemplo de combustível sólido, a gasolina e o diesel são exemplos de combustíveis no estado líquido e o gás natural é um combustível gasoso. A escolha do tipo de combustível que deverá ser queimado em uma indústria para fornecimento de energia depende de diversos fatores.

Assinale a alternativa que apresenta, apenas, as vantagens dos combustíveis gasosos em relação aos líquidos e sólidos.

- a) Maior simplicidade de operação e menor custo de instalação.
- b) Apesar de serem menos poluentes, os combustíveis gasosos são mais corrosivos.
- c) Maior facilidade de manuseio e maior capacidade de estocagem.
- d) Maior variedade de alternância de combustíveis.
- e) Apesar do custo de instalação ser maior, o valor é rapidamente recuperado ao longo da operação, visto ser um combustível mais barato.

2. Observe as características da Figura 2.6 que apresenta a queima laminar de uma chama evoluindo para uma queima turbulenta após passar pelo período de transição.

Figura 2.6 | Desenvolvimento de uma chama laminar para turbulenta



Fonte: Lagemann (2016, p. 71).

Sobre as características das chamas laminares e turbulentas, analise as alternativas a seguir.

Assinale a alternativa correta.

- a) A estabilidade de uma chama independe de sua classificação laminar ou turbulenta.
- b) A partir da ignição, toda chama terá combustão laminar que se desenvolverá necessariamente para turbulenta.
- c) A queima turbulenta consome menos combustível do que uma chama laminar.
- d) Equipamentos como caldeiras e turbinas a gás operam com chama laminar.
- e) O ponto de ruptura é a região a partir da qual a chama adquire comportamento turbulento.

3. Uma turbina a gás de um foguete espacial utiliza hidrogênio a 25°C como combustível em testes experimentais. Sabe-se que a velocidade de combustão, neste caso, vale $4531,72 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. As propriedades do combustível podem ser consideradas como sendo $\alpha = 1,522 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho = 0,08299 \text{ kg}/\text{m}^3$, $T_i = 1500 \text{ K}$ e $T_f = 2200 \text{ K}$.

Assinale a alternativa que apresenta a velocidade de chama para a combustão do hidrogênio.

- a) 2,0 m/s.
- b) 2,1 m/s.
- c) 2,2 m/s.
- d) 2,3 m/s.
- e) 2,4 m/s.

Combustão de líquidos

Diálogo aberto

Até o presente momento, nosso estudo nesta unidade de ensino abordou as principais características dos combustíveis empregados como fonte energética nos ciclos geradores de vapor e/ou potência como as caldeiras geradoras de vapor. Além disso, na seção anterior abordamos algumas particularidades referentes aos combustíveis gasosos e às características da chama oriunda de sua combustão e, nesta seção, vamos tratar sobre os principais combustíveis líquidos e suas características.

Em 2015, um tanque de armazenamento de combustíveis industriais localizado em Santos, no litoral paulista, pegou fogo e explodiu, gerando uma imensa cortina de fumaça, necessitando interditar rodovias próximas e esvaziar empresas localizadas a mais de 2 km de distância. Como tais combustíveis são altamente inflamáveis e possuem um poder calorífico elevado, as empresas os utilizam como combustíveis na geração de vapor e de potência e, para não faltarem, mantêm um estoque formado por grandes tanques de armazenamento.

Para contextualizar os conteúdos desta seção e entendermos como a tecnologia de combustão de líquidos funciona, lembre-se de que introduzimos você como um funcionário do laboratório de controle de qualidade de combustíveis de uma grande empresa que realiza vários projetos de engenharia e consultorias na área de energia. Após inúmeras quebras, falhas e entupimentos, o supervisor do laboratório de qualidade de combustíveis no qual você trabalha decidiu trocar o bico atomizador do equipamento utilizado nos testes de combustão de combustíveis líquidos. Como você é um dos responsáveis pela operação desse equipamento, seu supervisor solicitou que fizesse um parecer técnico sobre os diversos tipos de bicos atomizadores disponíveis, considerando suas vantagens e desvantagens, pois ele irá avaliar cada modelo antes de solicitar orçamentos e decidir qual adquirir para o laboratório.

Por que é necessário atomizar os líquidos combustíveis antes da combustão? Todo processo de atomização é igual e se originam a partir do mesmo agente motriz?

Iniciar o parecer técnico respondendo a essas questões pode ajudar o seu supervisor na escolha do atomizador mais apropriado ao laboratório, mas a fim de solucionarmos o projeto pedido pelo supervisor do laboratório,

também temos de conhecer as propriedades dos combustíveis líquidos, assim como sua estabilidade e compatibilidade. Também devemos conhecer as características dos principais óleos combustíveis brasileiros e dos sistemas utilizados para alimentar o óleo combustível em aquecedores e caldeiras. Todos esses conhecimentos são importantes para a sua formação. Não deixe para depois e vamos começar nosso estudo!

Não pode faltar

As indústrias de processamento químico utilizam combustíveis gasosos ou, preferencialmente, líquidos como fonte de energia para seus processos produtivos. Essa preferência se deve ao fato de, nas condições ambiente de temperatura e pressão, os líquidos serem mais fáceis de se armazenar e de se transportar entre os equipamentos de processo da indústria, além de serem mais seguros de manusear. Imagine, por exemplo, que um tanque de armazenagem transborde devido a um erro no volume de combustível líquido adicionado. Neste caso, o líquido transbordará para a área de contenção do tanque. Porém, no caso de um vazamento de combustível gasoso, este se expande para todo o ambiente, sendo o risco de explosão praticamente inevitável.

Os combustíveis líquidos mais comuns são frutos da destilação do petróleo, como os óleos combustíveis e o óleo diesel e, por isso, são os mais consumidos. No entanto, combustíveis líquidos de outras fontes também são possíveis, por exemplo, o óleo de alcatrão (ou simplesmente alcatrão, oriundo do carvão vegetal), o metanol, etanol e o biodiesel.

Analogamente aos combustíveis gasosos, os líquidos apresentam um poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) relacionados com a quantidade de energia liberada durante a combustão. A diferença entre estes se deve à presença de umidade no combustível.



Assimile

O PCI é utilizado para comparar a capacidade energética de diferentes combustíveis, pois já considera a energia necessária para aquecimento e evaporação da umidade contida no próprio combustível, isto é, dois combustíveis com PCS iguais mas com níveis de umidade diferentes, àquele com maior PCI (menor umidade) será preferível.

Em relação à densidade, para os combustíveis líquidos, esta propriedade é normalmente expressa em termos de °API (ou, graus API) em referência ao *American Petroleum Institute*. Este modo de determinação de densidade

relativa é uma alternativa ao método internacional do INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas), que utiliza um densímetro de haste graduada para medir a densidade na temperatura de 20°C. O °API se relaciona com a densidade relativa (SG) do combustível conforme a expressão a seguir.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{SG}} - 131,5$$

Em que SG é a densidade relativa do material (adimensional), determinada por:

$$\text{SG} = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Em que $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ é a densidade específica máxima da água à 4°C, cujo valor é 1000 kg/m³.

Exemplificando



O petróleo pode ser classificado de acordo com o seu °API em petróleo pesado se °API < 20, petróleo médio se 20 < °API < 30 ou petróleo leve se °API > 30. Considerando que o petróleo da bacia de Campos (RJ) produz óleos pesados e o Pré-Sal (ES) produz majoritariamente óleos leves, determine a origem de uma amostra de petróleo com SG = 0,85.

Solução:

O valor do °API da amostra de óleo é capaz de indicar o campo produtor da amostra. Para a determinação desse parâmetro, utilizamos a seguinte expressão.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{SG}} - 131,5$$

Substituindo o valor da densidade relativa fornecido para a amostra, encontramos que:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{30} - 131,5 = 34,97$$

Como o °API é maior que 30, então o petróleo é leve, com origem no Pré-Sal.

Além da densidade, devemos conhecer o ponto de fluidez (do inglês, *pour point*) definido como a menor temperatura na qual o combustível escoar. Como o ponto de fluidez depende de muitas condições ambientais, ele varia de acordo com as regiões do país, por isso, a ANP emitiu a Portaria n° 80, de 30 de Setembro de 1999, visando regular os valores do ponto de fluidez no Brasil em diferentes períodos do ano.



Refleta

Um combustível líquido não apresenta escoamento quando a temperatura se encontra abaixo do ponto de fluidez. O que aconteceria se,

durante um voo, o combustível armazenado na asa da aeronave atingisse uma temperatura abaixo do ponto de fluidez? E se fosse o óleo lubrificante do motor?

A viscosidade dinâmica (ou absoluta) é outra propriedade dos combustíveis líquidos que precisa ser considerada para um uso eficiente e adequado deste. Ela indica a tendência de o fluido resistir ao movimento (escoamento) para uma temperatura especificada. Sua unidade no sistema CGS é o *poise* e no sistema internacional de medidas (SI) é o $\text{kg/m}\cdot\text{s}$. Nos combustíveis líquidos o aumento da temperatura diminui a viscosidade, favorecendo o seu escoamento. Além disso, a viscosidade tem relação com o resíduo de carbono dos combustíveis após a queima. De modo geral, óleos combustíveis viscosos tendem a produzir maior resíduo de carbono, em especial os óleos com elevado teor de compostos naftênicos (hidrocarbonetos saturados e cíclicos).



Refleta

Os asfaltenos são hidrocarbonetos com 3, 10 ou mais núcleos aromáticos com ramificações parafínicas. Eles estão presentes nos combustíveis líquidos derivados do petróleo, formando uma suspensão coloidal. Como você espera que a quantidade de asfaltenos presente em um óleo combustível derivado do petróleo afete o seu resíduo de carbono após sua queima?

A viscosidade do fluido também pode ser descrita por meio da viscosidade cinemática ou da viscosidade Saybolt. A viscosidade cinemática origina-se da divisão da viscosidade absoluta pela massa específica do fluido sendo dada, no sistema CGS, em cm^2/s (*stokes*). Diferentemente, a viscosidade Saybolt representa um intervalo de tempo, isto é, a quantidade de tempo em segundos que 60 mL do líquido necessita para atravessar um orifício a uma dada temperatura. As viscosidades dos combustíveis líquidos são determinadas em laboratório por meio de protocolos específicos e são utilizadas por fabricantes de queimadores para indicar a viscosidade ideal do combustível a ser utilizado em seus equipamentos.

Outras duas propriedades também são importantes para os combustíveis líquidos: ponto de fulgor (*flash point*) e ponto de ignição (*fire point*). O ponto de fulgor também é definido pela Portaria n° 80 da ANP que regulamenta o ponto de fluidez, e define este parâmetro como sendo a temperatura em que o líquido se vaporiza em quantidade suficiente para misturar com o ar e formar uma mistura gasosa inflamável. O menor ponto de fulgor dos óleos é de 66°C . Já o *fire point* é definido como a temperatura na qual o combustível

líquido vaporiza-se e entra em combustão capaz de se sustentar. Ambos os vapores precisam entrar em contato com uma chama escorvadora durante a determinação das referidas propriedades.



Saiba mais

O ponto de fulgor e de ignição dos combustíveis líquidos são determinados por meio de ensaios laboratoriais. O método de Pensky-Martens é capaz de determinar apenas o ponto de fulgor, mas o método de Cleveland determina ambas as propriedades.

Já vimos que a presença de umidade nos combustíveis líquidos prejudica a sua eficiência térmica. Além disso, as moléculas de água podem emulsionar com as moléculas dos combustíveis formando estruturas estáveis que prejudicam a qualidade do combustível e causam problemas de corrosão em tanques, tubulações e outros equipamentos de processo. Além da água, os combustíveis líquidos podem possuir outros contaminantes em sua composição, tais como areia e óxido de ferro, por exemplo. Esses sedimentos, de acordo com Lagemann (2016, p. 111) causam problemas operacionais de combustão instável e não uniforme, aparecimento de fagulhas na chama, extinção da chama, pulsações, obstrução, entupimento e erosão dos filtros de combustíveis, dos bicos atomizadores (também chamados de bicos injetores), e outras partes mecânicas.

Os sedimentos contidos nos combustíveis líquidos, tais como sais minerais e matéria inorgânica solúvel, são responsáveis pela formação de cinza após a queima. Quanto mais pesada for a fração do petróleo produzida no refino (destilação), tanto maior será a formação de cinzas devido ao acúmulo de compostos como óxidos de ferro, vanádio, sódio, níquel, dentre outros. Porém, o teor de cinzas raramente ultrapassa 0,1% da massa de combustível, mas é importante ficar atento, pois as cinzas são compostos abrasivos que causam a erosão de componentes de processos industriais (bombas, válvulas, atomizadores, etc).

A composição química dos combustíveis líquidos afeta duas propriedades importantes, são elas: a estabilidade e a compatibilidade dos combustíveis.

A estabilidade de um combustível líquido está relacionada com a quantidade de asfaltenos presente em sua composição. Por serem moléculas grandes, complexas e não voláteis, os asfaltenos formam uma suspensão coloidal no combustível. Porém, se ao longo do período de armazenagem ou durante o processamento, os asfaltenos se aglomerarem e formarem depósitos, conhecidos como gomas ou borras, então o combustível em questão apresenta baixa estabilidade.

A compatibilidade dos combustíveis também está relacionada com a composição destes. Quando os combustíveis são incompatíveis entre si, por exemplo, um óleo com elevada concentração de asfaltenos e outro óleo com baixa concentração, então a formação dos depósitos em um óleo impede a sua compatibilidade (ou mistura) com o outro óleo.



Pesquise mais

A compatibilidade de distintos óleos pode ser verificada mediante a técnica do BMCI, sigla inglesa de *Bureau of Mines Correlation Index*, ou pelo teste do Tolueno Equivalente (TE). Pesquise mais sobre tais análises lendo as páginas 247-252, IN: ZILIO et al. Estudo do Modelo de Compatibilidade em Petróleos Brasileiros. **Bol. Téc. Petrobras**, v. 46, p. 247-255, 2003.

O Brasil possui uma agência nacional que regulariza as especificações dos óleos combustíveis produzidos no território brasileiro ou que são importados: trata-se da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). É por meio da Portaria n° 80, de 30 de abril de 1999, que são estabelecidos os valores das propriedades dos diversos tipos de óleos combustíveis. Observe na Tabela 2.1 os valores para os óleos combustíveis brasileiros.

Tabela 2.1 | Valores comuns para as propriedades de alguns óleos combustíveis brasileiros

	A1/B1	A2/B2	A3/B3	A4/B4	A7
Densidade	1,017/0,957	1,018/0,964	1,024/0,983	1,012/0,980	1,031
Fulgor (°C)	103/84	121/86	98/80	101/88	160
Ponto de Fluidez (°C)	13/6	6/12	15/38	-/-	-
Enxofre (% peso)	3,8/0,8	3,9/0,9	4,0/1,0	4,3/1,0	4,6
Cinzas (% peso)	0,04/0,04	0,04/0,04	0,09/0,03	-/-	-
PCS (kcal/kg)	10238/10530	10130/10500	10077/10443	10050/10399	10025
	A1/B1	A2/B2	A3/B3	A4/B4	A7
Teor de metais					
Vanádio (ppm)	172/34	142/37	201/44	187/43	167
Sódio (ppm)	19/40	13/41	54/32	40/32	50

Níquel (ppm)	47/38	46/30			
Viscosidade Saybolt 65 °C	178/180	278/263	-/-	-/-	37600

Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 115).

Os números que acompanham as letras A e B na Tabela 2.1 se referem à viscosidade dos óleos e varia de 1 a 9. Já as letras A e B (tipo C não apresentado) são as classificações dadas aos combustíveis de acordo com a quantidade de enxofre permitida pela Portaria n° 80 da ANP. Dessa forma, o óleo A1 pode apresentar, no máximo, 5,0% em massa de enxofre, e 5,5% para os demais óleos (de A2 até A9). Aos óleos tipo B são permitidos no máximo 1,0%. Como o enxofre é altamente poluidor do ambiente e prejudicial aos seres vivos, a sua concentração nos combustíveis também deve respeitar os limites impostos pelos órgãos ambientais vigentes, de acordo com a região do país. Para o óleo diesel de uso rodoviário, o teor de enxofre máximo permitido pela legislação encontra-se no próprio nome do combustível, isto é, o óleo diesel B S10 pode conter no máximo 10 mg de enxofre para cada kg de combustível. Similarmente, o diesel B S500 tem limite máximo de 500 mg/kg.

Devido à regulamentação realizada pela ANP, fornecedores e consumidores de óleos combustíveis passaram a comercializar óleos com diferentes viscosidades diretamente e, com isso, a classificação 3A e B3 deixou de existir, e os óleos A1, B1, A2 e B2 foram renomeados como OCA1, OCB1, OCA2 e OCB2, respectivamente.



Refleta

Diferentes óleos combustíveis apresentam viscosidades distintas, podendo ser baixa, média ou alta. Essa propriedade afeta diretamente a eficiência do combustível durante a combustão, pois altera a quantidade de energia necessária para se atingir a temperatura ideal de queima (consumo de vapor de aquecimento) e o bombeamento do fluido também, pois fluidos mais viscosos utilizam de maior energia para escoarem. Portanto, você espera que seja preferível empregar óleos de baixa, média ou alta viscosidade como combustível industrial?

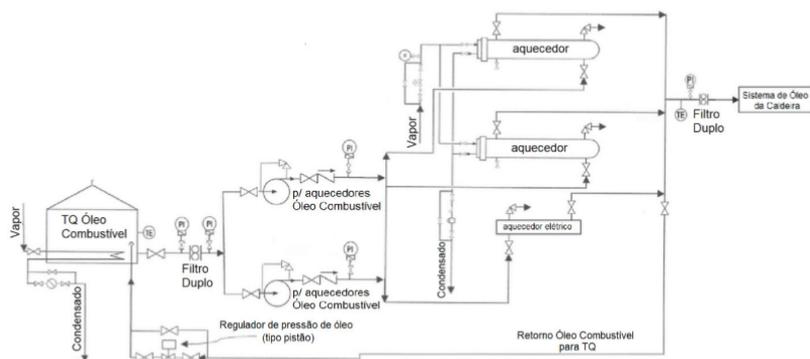
Alguns estabelecimentos comerciais e de serviços como hotéis, restaurantes, lavanderias e hospitais utilizam óleo diesel como combustíveis para aquecedores de água e caldeiras flamatubulares, por exemplo. Este óleo diesel é o mesmo que é comercializado no setor automotivo conforme definido pela resolução n° 50, de 23 de dezembro de 2013 da ANP. Tal resolução define o

uso de diesel tipo B no setor industrial, sendo este óleo diesel idêntico ao diesel A adicionado de biodiesel conforme a norma da ABNT NBD 15568 ou da ASTM/EM 14078 (LAGEMANN, 2016, p. 119).

Outro combustível líquido importante é o óleo de xisto resultante, juntamente com o gás de xisto, do processo de destilação de uma rocha sedimentar betuminosa denominada de folhelho pirobetuminoso que contenha quero-gênio, que é um complexo orgânico (LAGEMANN, 2016, p. 123). Este combustível emite uma menor carga de compostos poluentes e apresenta vantagens no seu transporte, pois é menos viscoso, possui menor densidade, menor teor de enxofre e poder calorífico elevado. É classificado em óleo de xisto tipo L ou E, conforme a sua leveza e fluidez, sendo o tipo L o mais leve e de maior fluidez.

Para uma utilização eficiente da energia química contida nos combustíveis, é necessário conhecer os sistemas que fazem a alimentação de óleos combustíveis em equipamentos nos quais ocorrerá a combustão como aquecedores e caldeiras, por exemplo. A Figura 2.7 ilustra esse sistema de alimentação composto por um tanque de armazenamento do óleo, filtros de linha para retirada de impurezas e de válvulas e bombas para o transporte do combustível.

Figura 2.7 | Esquema de alimentação de óleo combustível



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 124 e 125).

Para o bombeamento do óleo desde o tanque de armazenagem até os aquecedores ou a caldeira empregam-se bombas centrífugas ou de deslocamento positivo de engrenagem (as mais comuns) ou de fuso helicoidal (para altas vazões). Não é comum o uso de bombas centrífugas, à exceção de instalações antigas, visto ser mais difícil realizar o controle das flutuações do escoamento. A função do sistema de bombeamento é fornecer o óleo combustível na pressão e na vazão necessária para a sua combustão.

Os aquecedores (ou pré-aquecedores) de óleo visam adequar a temperatura do combustível para a queima, pois, dessa forma, a viscosidade do fluido adequa-se ao valor necessário para sua atomização pelos bicos atomizadores da caldeira. Os aquecedores empregados para esta finalidade podem ser elétricos ou alimentados com vapor saturado, sendo que a escolha do melhor tipo dependerá da vazão de óleo necessária, da temperatura de operação e da disponibilidade de vapor (LAGEMANN, 2016, p. 126).

A finalidade principal dos filtros é a de reter as impurezas do óleo que podem prejudicar o sistema de alimentação ou a posterior queima do combustível como o entupimento dos bicos atomizadores da caldeira. O tipo de filtro mais adequado depende da natureza dos contaminantes e da perda de carga na tubulação de transporte.

O sistema de armazenagem de óleo tem a responsabilidade de armazenar, em condições adequadas, o óleo que será queimado. A quantidade e o número de tanques dependem da vazão de óleo requerida pelo processo de combustão, sendo necessário reservas de, ao menos, 30 dias para regiões de fácil acesso ao reabastecimento do combustível.

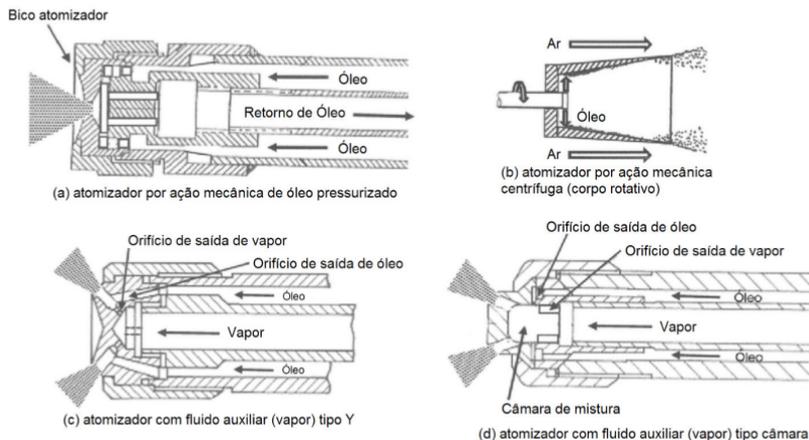


Assimile

Todo tanque de armazenagem contém uma região extra na sua lateral (exterior) denominada de região de contenção, para onde o líquido extravasado escoar e fica retido, impedindo derramamentos e acidentes nas instalações industriais.

A atomização do combustível em gotículas (névoa ou *spray* de 10 a 50 μm) é uma etapa crucial na combustão de líquidos. De acordo com LAGEMANN (2016, p. 127), a desintegração do líquido em gotículas pode ocorrer por colisão e fricção, quebra da tensão superficial, turbulência do próprio escoamento ou pela coalescência de gotículas formadas por colisão. A peça destinada a este fim se chama bocal de nebulização ou bico atomizador e o objetivo é proporcionar aumento da área de contato entre o líquido e o ar comburente melhorando, dessa forma, a combustão. A Figura 2.8 apresenta alguns tipos de atomizadores de combustíveis líquidos.

Figura 2.8 | Atomizadores de combustíveis líquidos por ação mecânica e por fluido auxiliara



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 130, 132 e 133).

Os modelos de atomizadores apresentados na Figura 2.8 realizam a atomização do combustível utilizando força motriz distinta (ação mecânica que utiliza a pressão do próprio fluido ou pela ação de fluido para auxiliar para pressurização do óleo) em diferentes configurações. Caso a atomização seja ineficiente, haverá consumo excessivo de combustível, perda de eficiência térmica na combustão e aumento na quantidade de poluentes emitidos (fuligem e gases).

O atomizador da Figura 2.8 (a) opera com pressões de 20 - 30 kgf/cm² e, via de regra, maior pressão representa melhor atomização dependendo da viscosidade e características do fluido. A operação normal desse equipamento é de 2:1 podendo atingir até o triplo desta faixa (ou seja, 6:1), dependendo do tipo de queimador. Entretanto, o bico da Figura 2.8 (b) emprega a força centrífuga oriunda da rotação do bico (3000 - 6000 rpm). Essa rotação cria uma película de combustível na parede interna do bico que é descarregada na forma de névoa, ao se misturar com ar, por um tubo distribuidor. Como não há um bico propriamente dito, esse atomizador permite o uso de óleos de elevada viscosidade ou de baixa qualidade (com impurezas).

A energia da atomização pode ser oriunda de um fluido auxiliar, ar ou vapor, como nas Figura 2.8 (c) e (d). Estes são os tipos empregados em caldeiras, pois operam com pressão bem menores do que nos atomizadores mecânicos. Os atomizadores a ar, de pequeno porte, são utilizados em caldeiras flamotubulares com pressões de ar de 200 a 700 mm de coluna de água (mmca) e óleo de 0,03 a 0,15 MPa. Há restrição no emprego de ar, pois este pode participar da combustão.

Nas operações de caldeiras prefere-se os atomizadores (c) e (d) que utilizam vapor. A diferença entre tais modelos se dá na forma de mistura entre o combustível e o comburente durante a atomização: tipo Y em (c),

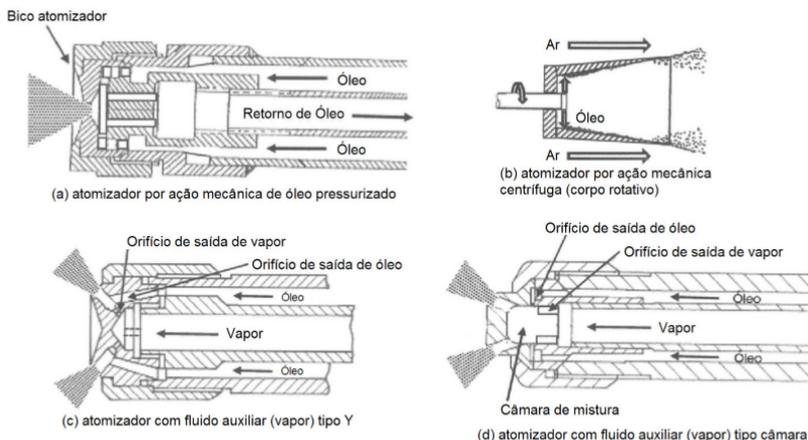
e câmara em (d). A mudança de direção no escoamento no tipo Y causa o cisalhamento e arraste das gotículas de óleo para a névoa formada (baixa pressão), já no modelo de câmara, é a própria pressão do vapor na câmara que causa a divisão do fluido e, por isso, opera com pressão ligeiramente superior. Os atomizadores (c) e (d) são preferíveis nas indústrias, pois consomem uma menor quantidade de vapor, a atomização é mais eficiente formando gotículas finas, e o consumo de ar é baixo e com melhor eficiência.

Sem medo de errar

Agora, é chegado o momento de elaborar o projeto requisitado pelo supervisor do laboratório. Este projeto surgiu da necessidade de se adquirir um novo bico atomizador para o equipamento no qual são realizados os testes de combustão de combustíveis líquidos visto que o antigo estava entupindo e apresentando falhas frequentemente. Como você é um funcionário do laboratório de qualidade, o supervisor solicitou a elaboração de um parecer técnico com alguns tipos de bicos atomizadores para que ele selecionasse a compra daquele que apresentasse as melhores características de acordo com a necessidade do laboratório, a fim de substituir o bico que apresenta problemas.

Baseado nisso e nos seus conhecimentos sobre os combustíveis líquidos e bicos atomizadores, você separou 4 tipos de bocais para apresentar ao seu supervisor. São dois modelos baseados na atomização devido a um agente mecânico e dois tipos dependentes de um agente externo, sendo que eles se encontram representados na Figura 2.8.

Figura 2.8 | Atomizadores de combustíveis líquidos por ação mecânica e por fluido auxiliara



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 130, 132 e 133).

No parecer técnico, você pode indicar que os modelos (a) e (b) podem não ser indicados para o uso em testes laboratoriais visto que eles demandam uma elevada pressão no óleo alimentado, o que pode ser difícil de se conseguir em laboratórios. No entanto, se a característica do teste for justamente simular as condições industriais, então o atomizador (a) pode ser uma escolha interessante. Em relação ao atomizador (b), sua melhor atuação se dá pelo fato dele admitir óleos com alto teor de impurezas, ou seja, óleos combustíveis que não foram filtrados, sem que haja problema de entupimento. Uma vez que o óleo é admitido no atomizador por um eixo central rotativo, não há orifício para nebulização, ficando a força centrífuga responsável por formar uma película oleosa na parede interna no atomizador com fragmentação e mistura com ar na sua extremidade de saída. Este modelo pode ser interessante se não houver filtros de óleo no laboratório para preparo do óleo em análise (o que é extremamente improvável) ou para a realização de testes rápidos, admitindo-se óleo sem pré-tratamento.

Os modelos de atomizadores (c) e (d) operam com pressões mais baixas que os modelos (a) e (b) e, por isso, podem ser mais seguros de serem utilizados em condições laboratoriais. No entanto, como eles operam com a ação de um fluido auxiliar como agente atomizador (vapor), é necessário um equipamento para fornecimento deste fluido. Em laboratório, uma autoclave é suficiente. Ambos os modelos de nebulizadores realizam a formação de gotículas e sua mistura com ar no interior da peça, sendo que no atomizador tipo Y é a força cisalhante da mudança de direção do escoamento do óleo a força motriz, e no modelo de câmara é a própria pressão do fluido. Tanto o modelo (c) quanto o (d) apresentam as vantagens de serem eficientes, formarem uma névoa bastante fina (gotículas pequenas) e consumirem uma menor quantidade de vapor. O fator que pode influenciar na escolha de qual o modelo mais adequado provavelmente será o custo de aquisição e implementação no laboratório.

Vale ressaltar que é importante verificar com o fabricante dos atomizadores qual a melhor faixa de viscosidade dos óleos combustíveis admissíveis aos equipamentos, pois, conforme visto anteriormente, a viscosidade varia conforme o tipo de óleo e, também, com a temperatura. Com isso, pode haver óleos que são melhor atomizados em um determinado modelo de atomizador do que em outros. Com essas informações, você pode finalizar o seu parecer técnico, apresentando-o ao supervisor.

Portanto, a partir da análise desta situação, perceba que muitos fatores devem ser analisados concomitantemente antes de se escolher o modelo mais adequado para substituir a peça antiga. É interessante que a análise não leve em consideração somente as condições de operação da peça, pois outros fatores podem influenciar na eficiência do equipamento. A composição

dos óleos analisados no laboratório influenciará a faixa de viscosidade do óleo, o sistema de alimentação do óleo com a presença de filtros (presença de agentes corrosivos ou entupidores) e a utilização de aquecedores para corrigir a viscosidade são fatores que também devem ser considerados antes de se adquirir o bico atomizador.

Ao entregar esse relatório você acaba de concluir os três projetos que envolveram o seu trabalho como funcionário do laboratório de controle de qualidade de combustíveis. Com o desenvolvimento dessas atividades você pode colocar em prática os seus conhecimentos acerca dos combustíveis líquidos e gasosos, a fim de apresentar soluções de problemas que podem ser encontrados na vida profissional de um engenheiro. Bom trabalho!

Avançando na prática

Análise de amostras de petróleo para refino em colunas de destilação

Descrição da situação-problema

Imagine que você trabalha em uma refinaria de petróleo realizando a análise de amostras de petróleo que são encaminhadas para a torre de destilação. Referente às análises de densidade, segundo a API, o petróleo é classificado como pesado se $^{\circ}\text{API} < 20$, petróleo médio se $20 < ^{\circ}\text{API} < 30$ e petróleo leve se $^{\circ}\text{API} > 30$. Como o petróleo é pré-aquecido anteriormente à alimentação na torre de destilação para correção da densidade relativa se esta for maior do que 0,85, você precisa indicar qual o máximo valor de grau API é admissível na coluna de destilação.

Resolução da situação-problema

Como a densidade específica do petróleo se relaciona com o grau API, devemos isolar essa densidade relativa na expressão que define o grau API, escrita da seguinte maneira.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{SG}} - 131,5 \rightarrow \text{SG} = \frac{141,5}{^{\circ}\text{API} + 131,5}$$

O petróleo deve ser alimentado com densidade relativa menor ou igual a 0,85. Portanto, matematicamente, escrevemos que:

$$\text{SG} \leq \frac{141,5}{^{\circ}\text{API} + 131,5} = 0,85$$

Trabalhando o lado direito da expressão anterior, obtemos que o grau API máximo, para que $SG = 0,85$, deve ser igual a:

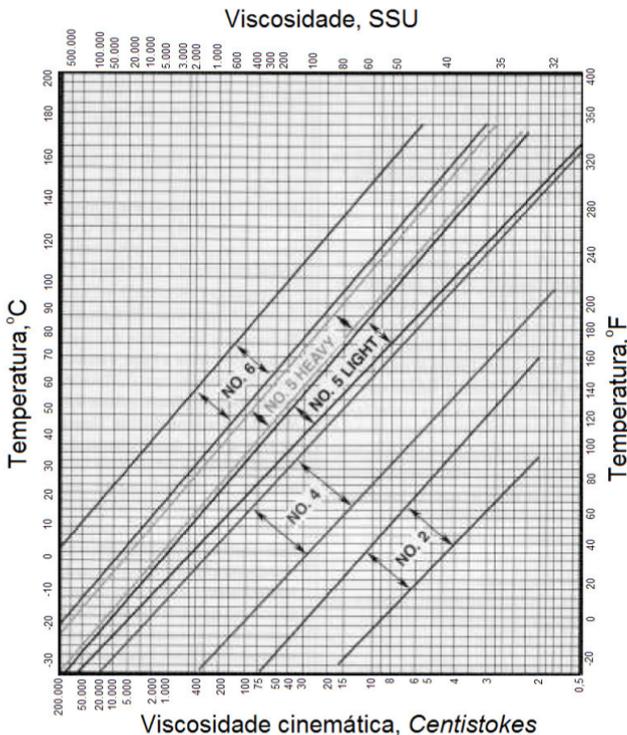
$$\frac{141,5}{^{\circ}\text{API} + 131,5} = 0,85 \rightarrow ^{\circ}\text{API} = 34,97$$

Portanto, qualquer amostra de petróleo com grau API menor do que 35 deve ser pré-aquecido antes de ser separado em seus derivados na coluna de destilação. Note que para o $^{\circ}\text{API} < 35$ a amostra do petróleo pode pertencer a qualquer uma das 3 classificações, portanto, mesmo o petróleo sendo leve, talvez seja preciso aquecê-lo previamente à destilação.

Faça valer a pena

1. A viscosidade cinemática de um combustível líquido indica a resistência deste fluido ao escoamento, quando é aplicada uma força de cisalhamento sobre ele. Observe a Figura 2.9, a seguir, que apresenta o comportamento da viscosidade em relação à temperatura para diversos óleos brasileiros.

Figura 2.9 | Variação da viscosidade com a temperatura para diferentes óleos combustíveis nacionais



Fonte: adaptada de Baukal Jr. (2001, p. 183).

Assinale a alternativa que apresenta a análise correta da Figura 2.9.

- a) Na temperatura ambiente, a viscosidade cinemática do óleo A2/B2 está entre 20 mil e 50 mil *centistokes*.
- b) Em relação à viscosidade, os óleos tipo A2/B2 são sempre preferíveis em relação aos demais combustíveis apresentados.
- c) A diminuição da viscosidade Saybolt (SSU) representa que o combustível necessita de maior tempo para atravessar o orifício nas condições em que o teste de viscosidade é realizado.
- d) Não há temperatura em que ambas as viscosidades do combustível A1/B1 sejam menores que a do combustível A2/B2.
- e) O aumento da temperatura ocasiona uma melhora na tendência do escoamento dos combustíveis líquidos e menor consumo de energia no seu transporte desde o tanque de armazenagem até o local de combustão.

2. Muitos combustíveis que são empregados como fonte energética se encontram no estado líquido na condição de temperatura e pressão ambiente. Para um uso eficiente e seguro, é preciso que algumas propriedades dos líquidos sejam avaliadas tais como a densidade, o poder calorífico, a viscosidade, o ponto de fulgor, dentre outras. A respeito das propriedades dos combustíveis líquidos, considere as afirmações a seguir.

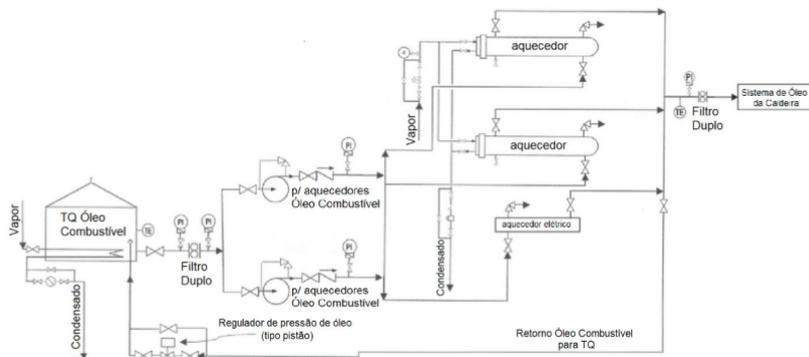
- I. O poder calorífico de um líquido está relacionado com a energia liberada na sua reação de combustão completa, sendo o PCS sempre menor que o PCI.
- II. O ponto de ignição é uma propriedade importante para a ignição e partida de motores e turbinas.
- III. A densidade do petróleo não é um sistema adequado para classificar o petróleo de diferentes origens.
- IV. A viscosidade absoluta, a viscosidade dinâmica e a viscosidade Saybolt representam a mesma propriedade dos combustíveis líquidos.
- V. A fluidez de um combustível líquido não é importante para o seu armazenamento, visto que durante a estocagem, o abaixamento da temperatura fará com que o fluido não escoe.

A partir da avaliação das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. É(são) verdadeira(s):

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) I e II, apenas.
- d) I e IV, apenas.
- e) II, III e IV, apenas.

3. Os sistemas de alimentação de combustíveis líquidos são importantes para garantir condições apropriadas para a combustão nos equipamentos de queima como as caldeiras, por exemplo. Analise o sistema de alimentação apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.7 | Esquema de alimentação de óleo combustível



Fonte: adaptada de Lagermann (2016, p. 124 e 125).

Assinale a alternativa que analisa corretamente o sistema de alimentação de combustível apresentado na figura.

- A função dos aquecedores é fornecer energia para aquecimento do ar que é misturado ao combustível na etapa de combustão.
- Apenas as bombas centrífugas podem ser utilizadas no transporte de combustíveis líquidos devido à ampla faixa de pressão de trabalho que estas apresentam.
- A presença de filtros nas linhas de escoamento tem a finalidade de remover aglomerados de enxofre que porventura se formaram durante o período de armazenagem do combustível.
- O tanque de armazenagem de combustível possui um sistema de aquecimento para evitar que a temperatura do fluido fique abaixo do ponto de fluidez.
- O atrito do fluido com a parede interna das tubulações é suficiente para gerar calor por atrito e diminuir a viscosidade do combustível.

BAUKAL Jr., C. E. **The John Zink Combustion Handbook**. 2nd ed. CRC Press. Washington, D.C. 2001. 750p.

BRASIL. Resolução da ANP n^o 50 de 23 de dezembro de 2013. Regulamenta as especificações do óleo diesel de uso rodoviário e as obrigações quanto ao controle de qualidade a serem atendido pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Brasília, DF, 24 de dez. 2013. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2013/dezembro&item=ranp-50--2013>. Acesso em: 1 out. 2018.

DIRECCIÓN Técnica de Apoyo Académico. **Práctica Punto de Inflamación Vaso abierto de Cleveland**. Decanato Ingeniería Civil UCLA. 2012. (5m30s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JhnmXPbL-Q>. Acesso em: 19 out. 2018.

HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B. **Engenharia Química – Princípios e Cálculos**. 8 ed. Editora LTC. 2014. 892p.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. **Combustion**. 4. ed. EUA: Elsevier, 2008.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 304p.

PDVSA Petrolera Sinovensa. **Determinación de Flash Point Copa Cerrada ASTM D96**. 2015. (2m46s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=aMyI5xa2JEI>. Acesso em: 19 out. 2018).

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. Editora McGraw-Hill, EUA, 1997.

STUCHI, G. A. D.; TACONELLI, M.; LANGHI, V. A. B. **Geração termelétrica: principais componentes e tipos de centrais termelétricas**. 2015. 130f. Trabalho de conclusão de curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-14032016-175537/>. Acesso em: 1 out. 2018.

ZILIO, E. L.; SANTOS, M. F. P.; CAMACHO, C. F. B. Estudo do modelo de compatibilidade em petróleos brasileiros. **Boletins Técnicos da Petrobras**, v. 46, p. 247-255, 2003. Disponível em: <http://pbpublishing.com.br/uploads/PublishedContent/BT/V46/V46N3-4/6.pdf>. Acesso em: 19 de out. 2018.

Unidade 3

Geração de vapor: equipamentos

Convite ao estudo

A produção de vapor, seja em uma indústria ou em uma residência, requer a combustão apropriada de um combustível. Nas residências, o combustível queimado consiste no GLP (gás liquefeito de petróleo, que é o gás armazenado no botijão), o qual é transportado por uma mangueira até o fogão que o distribui para um queimador (a boca do fogão), onde é misturado com o ar, inflamado por uma faísca e queimado em uma chama azul brilhante. Industrialmente, esse processo de combustão ocorre na fornalha ou no queimador de uma caldeira, podendo queimar diferentes tipos de materiais combustíveis.

Nesta unidade, utilizaremos nossa curiosidade para identificar os diferentes tipos de queimadores, a fim de escolher o modelo mais adequado para distintas situações. Além disso, estudaremos as características das caldeiras flamatubulares e das aquatubulares para, fazendo uso de um raciocínio crítico, definir as aplicações em que um tipo de caldeira é mais vantajoso do que outro tipo.

Para isso, imagine que você acabou de ser contratado por um escritório de engenharia que realiza projetos para várias indústrias brasileiras. Dentre os diversos setores de projetos da empresa, você foi escalado para atuar nos projetos que envolvem análise, dimensionamento e otimização de equipamentos geradores e distribuidores de potência, como caldeiras e fornalhas. Nos primeiros meses de trabalho, você atuará em três projetos referentes a tais equipamentos, tendo que entregar o projeto ao diretor do departamento. O primeiro projeto consiste no dimensionamento do queimador de um gerador de vapor; o segundo, em periciar o local de explosão de uma caldeira; e o terceiro projeto envolve analisar as vantagens e desvantagens de diferentes tipos de caldeiras.

Quais características distinguem os diferentes tipos de caldeiras? Qual a finalidade de um queimador e quais propriedades são necessárias para o seu dimensionamento? Como escolher entre os diversos modelos de caldeiras disponíveis no mercado? A resposta a essas questões auxiliará na resolução dos projetos propostos.

A primeira seção desta unidade abordará os diferentes tipos de queimadores empregados em caldeiras e suas características. Na seção seguinte, trataremos dos diferentes modelos de caldeiras flamatubulares, suas características marcantes e principais aplicações. Por fim, a terceira seção encerrará esta unidade de ensino apresentando os aspectos mais marcantes das caldeiras aquatubulares e suas aplicações.

Bom estudo!

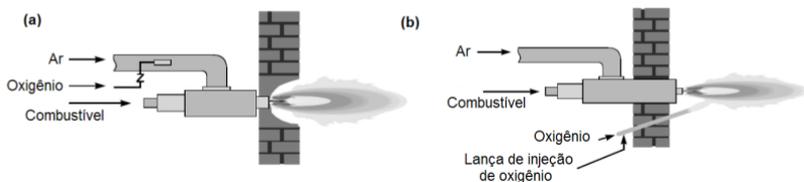
Queimadores

Diálogo aberto

Comumente, chamamos o queimador do fogão de cozinha de “boca”. Essa é uma peça muito importante para o correto funcionamento do fogão, pois realiza a mistura do gás de cozinha, um combustível gasoso, com o ar atmosférico para iniciar o processo de combustão por meio de uma faísca elétrica ou de um fósforo. Semelhantemente, esse processo de queima também é realizado em nível industrial nos geradores de vapor, como nos queimadores localizados na fornalha das caldeiras. Distintamente do que ocorre com o fogão, porém, que é alimentado exclusivamente com gás de cozinha, as caldeiras podem ser alimentadas com diferentes tipos de combustíveis, o que levou à existência de diferentes tipos de queimadores, adequados para cada tipo de material combustível.

Para estudarmos quais são esses queimadores e as diferentes características de cada um deles, imagine que você integra uma equipe de projetos de uma grande empresa de engenharia que realiza o dimensionamento, desenvolve novos modelos e supervisiona a implementação de diversos equipamentos industriais, entre eles as caldeiras e seus queimadores. Neste primeiro momento, o diretor do setor no qual você trabalha está montando uma equipe com o intuito de analisar as formas de se otimizar a queima nos queimadores de uma caldeira por meio da injeção direta de oxigênio puro. Você foi escalado para integrar essa equipe e ficou encarregado de analisar duas formas distintas de alimentação de oxigênio apresentadas na Figura 3.1.

Figura 3.1 | Diferentes formas de introduzir oxigênio puro no queimador de uma caldeira



Fonte: adaptada de Baukal et al. (2003, p. 650).

Para isso, você precisa desenvolver um relatório técnico, explicando as vantagens e desvantagens dos diferentes modos de alimentação do oxigênio, baseando-se nas propriedades da mistura do combustível com o oxigênio presente no ar atmosférico. O seu parecer deverá ser entregue ao seu diretor para aprovação.

Quais tipos de queimadores são possíveis? Como ocorre a mistura do ar com o combustível nos queimadores? A resposta a essas perguntas poderá orientá-lo na resolução do projeto e, para isso, você deverá conhecer os queimadores a gás e a óleo, bem como os queimadores de combustíveis sólidos pulverizados. Além disso, é importante que você conheça os queimadores de alta eficiência e os queimadores dual.

Não deixe de estudar esses conteúdos, pois eles são muito importantes para o processo de geração e distribuição de vapor e potência e, portanto, para a sua formação. Vamos começar!

Não pode faltar

A combustão é a reação química que ocorre entre um combustível e um comburente (oxigênio contido no ar atmosférico) com a liberação, simultânea, de luz e calor. Essa reação é empregada, por exemplo, em indústrias de processamento na geração de vapor de processo e/ou potência para seus equipamentos. No entanto, para que a combustão ocorra de uma forma rápida e eficiente, é preciso que a mistura dos reagentes dessa reação, isto é, a mistura do combustível com o oxigênio, seja conduzida de forma apropriada. O equipamento empregado para a correta mistura dos reagentes da combustão é denominado queimador.



Assimile

Queimador é o equipamento capaz de realizar a mistura adequada de combustível com oxigênio, preparando-os para a reação de combustão. Os queimadores estão presentes, por exemplo, em equipamentos como caldeiras e fornos industriais.

Vários modelos de queimadores foram desenvolvidos devido ao fato de caldeiras e fornos industriais operarem com uma grande variedade de combustíveis. Dessa maneira, pode-se escolher aquele equipamento com o queimador apropriado para o combustível a ser queimado. Não é apenas o tipo de queimador que influencia a eficiência da combustão: o meio no qual ocorre essa reação também é importante. Além disso, o mecanismo de transferência de calor da chama, sua temperatura, o tempo em que os produtos de combustão (gases) permanecem na câmara de combustão e se são, ou não, recirculados, são fatores que influenciam a eficiência da combustão.



Refleta

Tanto o mecanismo de transferência de calor quanto o ambiente no qual ocorre a combustão (paredes e piso da câmara de combustão) influenciam a eficiência dessa reação. Dado o exposto, qual local deveria apresentar maior eficiência no processo de combustão: uma câmara elaborada em material refratário capaz de irradiar o calor ou uma câmara produzida com paredes de membrana que absorvem calor?

Os queimadores de caldeiras são confeccionados para operar com *turn-down ratio* (TDR) fixo de 2:1. O TDR, também denominado faixa de operação do equipamento, demonstra a razão entre o calor liberado pela máxima e mínima condição de operação do maçarico, conforme equação a seguir, em que Q_{\max} e Q_{\min} representam a taxa máxima e mínima, respectivamente, de calor liberado pelo queimador.

$$\text{TDR} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$$

O TDR também pode ser expresso, analogamente, em termos das pressões máximas e mínimas de operação na atomização do combustível, conforme equação a seguir.

$$\text{TDR} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}}$$

Em outras palavras, o TDR demonstra quantas vezes o equipamento pode ter sua operação mínima multiplicada.



Exemplificando

O queimador de uma caldeira tem um maçarico que é capaz de sustentar uma chama somente a partir da liberação de 50 MkJ/h de calor ($P_{\min}^{\text{atomização}} = 7 \text{ kgf/cm}^2$). Na condição máxima de operação, a energia liberada é de 100 MkJ/h ($P_{\max}^{\text{atomização}} = 30 \text{ kgf/cm}^2$). Qual é o *turn-down ratio* (TDR) para esse queimador?

Solução:

O número de vezes em que a máxima liberação de calor é maior do que a mínima liberação de calor corresponde ao *turn-down ratio*, isto é:

$$\text{TDR} = \frac{100}{50} = \frac{2}{1} = 2:1$$

Analogamente, pela fórmula das pressões de atomização, segue que:

$$\text{TDR} = \sqrt{\frac{P_{\text{máxima}}}{P_{\text{mínima}}}} = \sqrt{\frac{30}{7}} = 2,07 \approx 2:1$$

Logo, o TDR é de 2:1.

De acordo com Lagemann (2016, p. 135-136), para que um queimador funcione adequadamente são necessários alguns componentes, tais como:

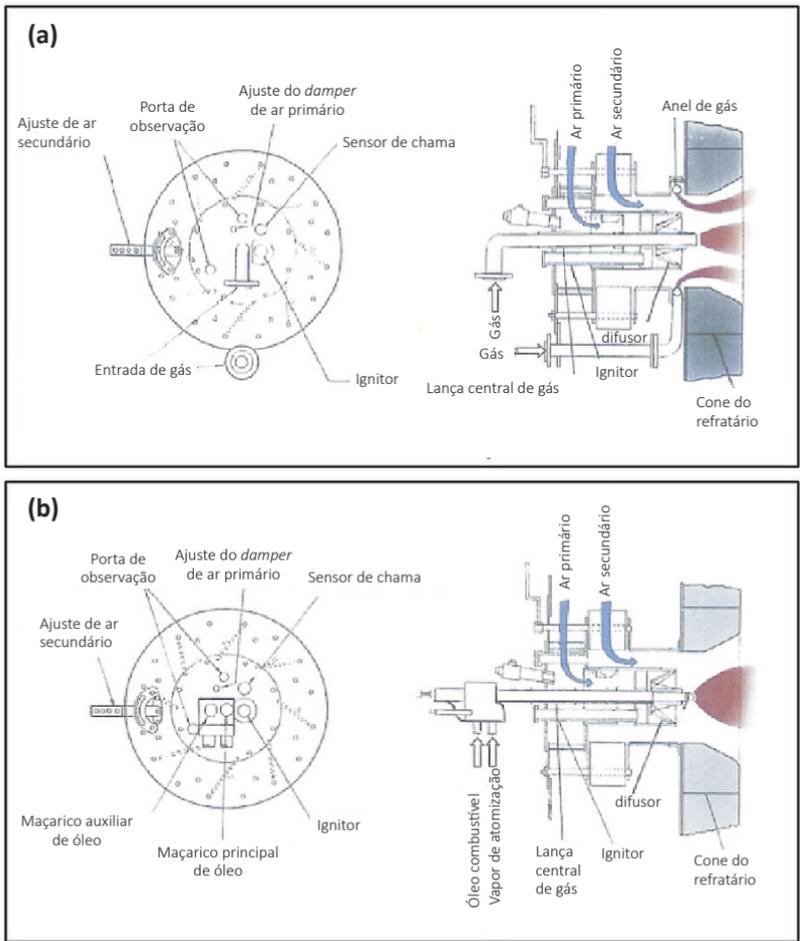
- **Registro de ar:** introduz o ar primário (vazão fixa) de forma a produzir mistura íntima com o combustível e, também, o ar secundário (vazão variável).
- **Difusor ou impelidor:** responsável por rotacionar o ar primário, proporcionando benefícios de uma chama rotacional; o ar secundário é alimentado tangencialmente, após o difusor.
- **Maçarico de óleo e/ou gás:** ejeta o combustível líquido (óleo) ou gás para o interior da câmara de combustão ou fornalha.
- **Cone de refratário:** pode ser elaborado em tijolo refratário ou cimento e é responsável por proporcionar estabilidade à chama.
- **Sistema de ignição:** manual ou automático.
- **Sensor de chama:** protege o sistema de instabilidades que causariam a extinção da chama. Pode ser instalado externamente, dependendo do tipo de queimador, desde que não haja obstáculos no campo de atuação do sensor.

Observemos mais de perto como tais peças se juntam para compor um queimador, analisando atentamente a Figura 3.2, que apresenta, respectivamente, um queimador a gás (a) e a óleo (b), ambos do tipo SE, com seus componentes indicados. No queimador a gás (Figura 3.2(a)) a chama produzida é azul, bastante estável e emite pouca luz. Esse tipo de queimador é bastante simples por utilizar gás como combustível. Os queimadores que operam com óleo combustível, como exemplificado na Figura 3.2(b), são mais complexos, pois é necessário atomizar o óleo antes de misturá-lo ao comburente de maneira adequada. Em uma dada temperatura, o óleo vaporiza-se e inflama na presença de uma chama escorvadora. Porém, a chama gerada rapidamente se extingue (ou será altamente instável), pois a energia liberada dificilmente é suficiente para sustentar uma vaporização continuada do óleo. A atomização tem a finalidade de contornar esse percalço.

Devido às propriedades e composição química do óleo combustível, sempre haverá a presença de material não queimado ou parcialmente

oxidado no queimador, proporcionando, portanto, uma chama amarelada devido à queima lenta desse combustível.

Figura 3.2 | Queimador a gás e a óleo do tipo SE



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 138-139).



Pesquise mais

É possível elaborar um queimador a óleo que atomiza o combustível pela ação da força centrífuga, isto é, utilizando um atomizador de copo rotativo. Conheça as vantagens e desvantagens desse modelo de queimador lendo as páginas 141 e 142 do material a seguir:

Apesar de existirem os queimadores exclusivamente para gás ou óleo combustível que nós estudamos até o momento, no Brasil, é comum existir queimadores que admitem a combustão combinada, porém não simultânea, de ambos os materiais em um mesmo equipamento. Para que isso ocorra de maneira apropriada, foram desenvolvidos os queimadores dual, que admitem intercambiar sua operação com gás e com óleo combustível alternadamente.

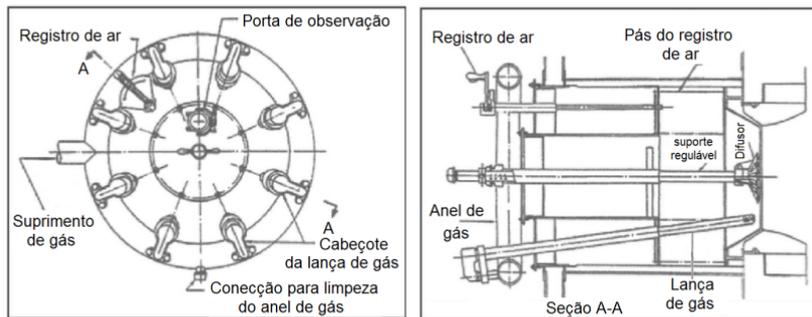


Assimile

Queimadores dual operam com gás e óleo combustível separadamente. Isso permite uma maior versatilidade no controle da operação de geração de vapor. Por exemplo, se a quantidade de vapor produzida precisa ser diminuída, então pode-se ajustar o queimador de modo a diminuir e encerrar a alimentação de óleo (elevado calor de combustão) e introduzir apenas gás (baixo calor de combustão se comparado ao óleo) para manter a chama do equipamento e, assim, garantir uma mínima produção de vapor. Quando for necessário, pode-se cortar a alimentação de gás e reintroduzir o óleo para aumentar a produção de calor na combustão e, conseqüentemente, aumentar a geração de vapor.

Veja um exemplo de queimador dual na Figura 3.3. Esses queimadores podem ser empregados tanto em caldeiras flamatubulares quanto em caldeiras aquatubulares, podendo ser frontais, comuns nos equipamentos de grande porte, ou tangenciais, que são utilizados nas caldeiras menores.

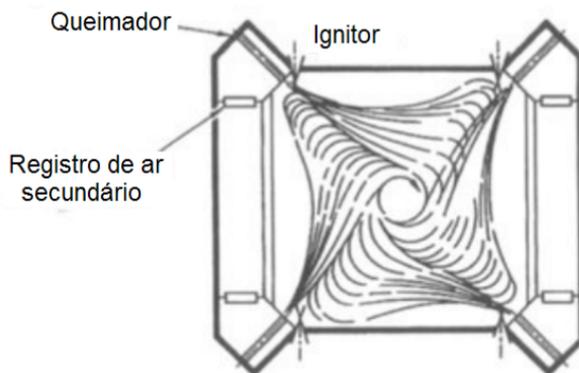
Figura 3.3 | Queimador frontal do tipo misto para queima de óleo e gás combustível



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 143).

A distinção mais acentuada entre os modelos frontais e tangenciais de queimadores dual é a localização da lança de combustível líquido (jato de óleo). No queimador frontal, a lança é posicionada centralmente, ou seja, alinhada com o centro da câmara de combustão; já no tangencial, quatro lanças são posicionadas nas extremidades de um “xis” apontando para o centro e formando um turbilhão com os jatos combustíveis, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 | Câmara de combustão com 4 queimadores tangenciais em funcionamento



Fonte: adaptada de Lagemann (2016, p. 145).

Nos dois modelos, jatos de ar são distribuídos ao redor dos jatos de óleo, de forma a se misturarem adequadamente com as gotículas de óleo e o ar primário introduzido na fornalha.



Refleta

Os queimadores dual não são projetados para serem alimentados simultaneamente com gás e óleo combustível. Por que não é aconselhável utilizar a vazão simultânea de um combustível gasoso e outro líquido (óleo) em um mesmo queimador? Pensar em termos da quantidade de comburente necessária e nas propriedades da chama pode ajudar a responder a esse questionamento.

Além dos modelos já mencionados de queimadores, os fabricantes de equipamentos desenvolveram um tipo especial capaz de emitir menores concentrações de poluentes. Esses equipamentos ficaram conhecidos como queimadores de alta eficiência.



Pesquise mais

A escolha do tipo de queimador mais apropriado, em termos energéticos, é feita comparando-se o Índice de Wobbe dos queimadores, pois ele indica a quantidade de energia liberada pelo queimador no processo de combustão. Pesquise mais sobre o Índice de Wobbe lendo as páginas 86 e 87 do material a seguir:

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2016.

Os queimadores de alta eficiência devem apresentar uma boa queima de combustível, seja este um líquido ou um gás. No entanto, é desejável que a emissão de compostos poluentes como os óxidos de nitrogênio, representados por NO_x , e de óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3) seja a menor possível. Esse objetivo foi atingido intensificando-se a mistura entre o combustível e o ar de alimentação e, também, do turbilhonamento gerado por essa mistura.



Assimile

Observe que nos queimadores de alta eficiência há melhora da mistura de ar necessário para a combustão e não um aumento na quantidade de ar introduzido no queimador. De fato, a quantidade de ar necessária é menor nesse tipo de queimador se comparada com a de outros modelos.

Quando o ar é misturado intensamente com o combustível, a chama produzida é mais estável, visto que as vibrações no equipamento são menores. Além disso, devido ao contato íntimo entre combustível e comburente, a vazão do ar alimentado é diminuída. Queimadores de alta eficiência que operam com gás natural utilizam, aproximadamente, 2% a menos de ar de combustão. Enquanto nos que empregam óleo, essa redução pode chegar a 10% (para o óleo A1/B1).

A diminuição da emissão de compostos poluentes, tanto nitrogenados como sulfurosos, deve-se justamente à menor introdução de ar para a combustão. Dentro das câmaras de combustão, existem regiões redutoras e oxidantes devido à variação da temperatura, sendo que nas regiões redutoras ocorrem as reações indesejáveis, que são aquelas responsáveis pela formação dos poluentes. A menor concentração de oxigênio no interior dessas câmaras diminui a ocorrência de reações na região redutora, tornando mais intensas as reações oxidantes.

Portanto, podemos resumir as vantagens dos queimadores de alta eficiência, de acordo com Lagemann (2016, p. 147), em:

- Baixa emissão de NO_x , SO_2 e SO_3 .
- Menor consumo de ar de combustão.
- Maior estabilidade de chama.
- Redução de vibração no gerador de vapor.
- *Turn-down ratio* maior.
- Melhor eficiência térmica.

O *turn-down ratio* do queimador de alta eficiência é maior do que o fixo 2:1 dos demais queimadores, pois estes operam com pressão positiva na fornalha devido ao emprego obrigatório de um ventilador de tiragem forçada. O TDR pode atingir 10:1 em queimadores a óleo e 20:1 em queimadores a gás.

Alguns modelos de queimadores foram desenvolvidos para atuar com combustível sólido pulverizado, sendo o carvão mineral o mais utilizado. Nesse aparelho, o sólido pulverizado é alimentado, sob pressão, com o ar necessário para a combustão, o que ocasiona a formação de uma suspensão ar/sólidos no interior da câmara de combustão. Porém, essa tecnologia tem sofrido alterações a fim de permitir o uso de partículas de tamanho maior, como resíduos florestais, por exemplo.

O sólido pulverizado é introduzido tangencialmente na câmara de combustão, analogamente ao modelo para óleo tangencial já apresentado na Figura 3.4. O modelo frontal não existe para sólidos pulverizados, pois o maior tempo de residência das partículas quando introduzidas tangencialmente garante sua reação completa no interior do equipamento e melhora a eficiência térmica da combustão.

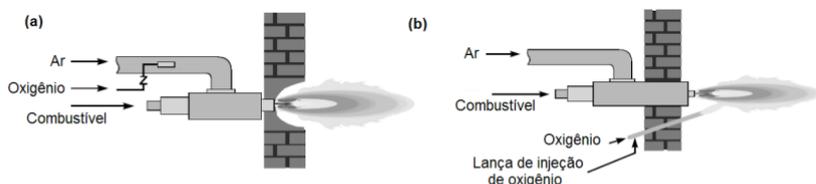
Algumas das vantagens de se utilizar sólidos pulverizados são a maior faixa de operabilidade do queimador, reaproveitamento de resíduos finos (carvão e biomassa), utilização de grande quantidade de material para queima, o que permite a elaboração de grandes geradores de vapor e permite bom controle da combustão. Entretanto, citamos como desvantagem a necessidade de preparo do combustível, como o peneiramento para adequação da granulometria, sujeito aos problemas com umidade do sólido e facilidade no arraste de partículas (cinzas) para o ambiente.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você atua em uma grande empresa de engenharia e, neste momento, foi integrado a uma equipe de projetistas que estão analisando diferentes maneiras de melhorar a eficiência da combustão em um

queimador de uma caldeira. Ficou sob sua responsabilidade emitir um relatório técnico para o diretor da empresa a respeito das vantagens e desvantagens da injeção de oxigênio puro por dois métodos distintos, apresentados na Figura 3.1. Para isso, você deve fundamentar sua análise nos efeitos da mistura do combustível com o oxigênio contido no ar atmosférico.

Figura 3.1 | Diferentes formas de introduzir oxigênio puro no queimador de uma caldeira



Fonte: adaptada de Baukal et al. (2003, p. 650).

Resolução:

Uma das maneiras de se iniciar o relatório técnico é apresentando as distintas maneiras de se introduzir oxigênio puro no queimador. Para isso, a Figura 3.1 apresenta dois modos distintos: em (a), a mistura do oxigênio com o ar atmosférico previamente ao queimador; e, em (b), a injeção direta de oxigênio na câmara de combustão por meio de uma lança de injeção. Vale ressaltar que outros métodos são possíveis, porém eles não participam do escopo da sua análise.

Analisaremos, primeiramente, o método da mistura apresentado na Figura 3.1(a). Chamaremos esse método de método de pré-mistura, visto que ele consiste em introduzir o oxigênio puro no difusor do queimador, ou seja, previamente à sua mistura com o combustível. Realizar a pré-mistura no difusor é vantajoso, pois o difusor é um acessório já existente nos modelos comerciais de queimadores e, portanto, pode ser facilmente adaptado para a injeção de oxigênio. Portanto, esse é um método de baixo custo de implementação e de ampla aplicação.

A injeção de oxigênio em pré-mistura aumentará a concentração de comburente no ar atmosférico, e, portanto, que está disponível para mistura com o combustível e, dessa maneira, incrementará a taxa de liberação de calor da reação de combustão. Como consequência do aumento da concentração de oxigênio e do aumento da velocidade de combustão, a chama produzida pelo queimador será mais curta e intensa. Dependendo da quantidade de oxigênio adicionado, a chama pode encurtar demais e ser prejudicial para o queimador, podendo ocasionar, inclusive, a extinção da chama. O aumento da liberação de calor levará a um aumento da temperatura do queimador, o

que pode prejudicar o sistema de controle do equipamento, assim como o material no qual este é confeccionado (cone de refratário, por exemplo).

Na modificação sugerida na Figura 3.1(b), o oxigênio é injetado diretamente na câmara de combustão por meio de uma lança de injeção. Esse método não exige modificação do queimador já instalado, uma vez que se pode simplesmente acoplar a lança de injeção à câmara de combustão, o que torna esse processo, do ponto de vista estrutural, muito mais vantajoso do que o anterior.

Além dessa vantagem, a introdução do oxigênio puro diretamente na região de oxidação reduz a ocorrência de reações indesejadas como a de formação de compostos NO_x . Dessa forma, reduz-se a emissão de poluentes pelo equipamento. Outra vantagem do método de injeção direta de oxigênio decorre do fato de a lança estar posicionada diretamente no local de turbilhamento. A vazão adicional de oxigênio no interior da câmara de combustão ocasiona efeitos de mistura adicionais que podem aumentar a chama e tornar a distribuição de temperatura mais uniforme, melhorando, desse modo, a eficiência térmica do equipamento e prolongando o tempo de vida dos materiais estruturais (cone de refratário, piso e laterais do equipamento).

Devido ao método da lança de oxigênio, mostrado na Figura 3.1(b), apresentar muito mais vantagens do que o método de pré-mistura, você pode encerrar o seu relatório técnico apresentando um parecer favorável a essa modificação. Com isso, o diretor poderá decidir se aprova o método para um teste com um queimador piloto, empregando diferentes tipos de combustíveis e diferentes concentrações de oxigênio a fim de se descobrir o quanto tal modificação impacta a eficiência térmica do equipamento. Bom trabalho!

Avançando na prática

Calibração de um queimador de gás natural

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma indústria que tem uma caldeira para geração de vapor de processo. Os queimadores dessa caldeira são alimentados com gás natural e ar atmosférico, calibrados com TDR de 2:1. No entanto, o equipamento tem apresentado falhas constantes devido à extinção da chama, e você, engenheiro responsável pelo equipamento, foi chamado para verificar o ocorrido. Você suspeita que o problema esteja na etapa de atomização. Por isso, mede sua pressão máxima e mínima, que marcaram,

respectivamente, 0,50 MPa e 0,05 MPa. Agora, você precisa informar ao supervisor se a atomização é de fato o problema e se o equipamento necessita de manutenção ou não.

Resolução da situação-problema

Utilizaremos as pressões de atomização nas operações máximas e mínimas para determinar o TDR do equipamento. Se esse valor estiver fora do especificado, que é de 2:1, então o equipamento deve ser desligado e encaminhado para a manutenção dos queimadores. A equação para se determinar o TDR é:

$$\text{TDR} = \sqrt{\frac{P_{\text{máxima}}}{P_{\text{mínima}}}}$$

Substituindo os valores obtidos nas medições, segue que:

$$\text{TDR} = \sqrt{\frac{P_{\text{máxima}}}{P_{\text{mínima}}}} = \sqrt{\frac{0,50}{0,05}} = \sqrt{10} = 3,16$$

Portanto, o equipamento está fora das condições de operação. Como sua TDR está maior do que o especificado, há injeção em excesso da mistura ar-combustível pelo queimador. Com o excesso de vapores no interior da câmara de combustão, o calor liberado pela chama não é capaz de inflamar todo o volume e, por isso, se extingue. Logo, é necessário desligar o equipamento e realizar a manutenção ou a troca dos queimadores, se necessário.

Faça valer a pena

1. Os queimadores são parte integrante dos equipamentos geradores de vapor, como as caldeiras, e de fornalhas industriais. São instalados com o objetivo de realizar a mistura do combustível com um material comburente, normalmente o oxigênio presente no ar atmosférico. A respeito dos queimadores, analise as afirmações a seguir.

- I. Os queimadores podem admitir, como combustível, gás natural, óleo combustível e carvão mineral pulverizado.
- II. As partes integrantes de um queimador de caldeira são: registro de ar, difusor, maçarico, cone refratário, ignitor e sensor de chama.
- III. Os queimadores dual são aqueles que permitem a queima de uma mistura gás-óleo ou óleo-sólido.
- IV. Os queimadores de alta eficiência são preferíveis em relação a outros modelos, pois consomem menos combustível.

Após análise das afirmações, assinale a alternativa correta.

- a) Apenas as afirmações I e II estão corretas.
- b) Apenas as afirmações II e IV estão corretas.
- c) Apenas as afirmações I, II e III estão corretas.
- d) Apenas as afirmações I, II e IV estão corretas.
- e) Apenas as afirmações I, III e IV estão corretas.

2. Vários componentes são instalados na fornalha de uma caldeira a fim de constituírem um queimador. A respeito desses componentes, foram feitas as seguintes afirmações:

- I. O sistema de ignição é responsável por iniciar o processo de combustão e pode ser realizado manualmente ou por meio de um sistema automatizado.
- II. Os queimadores são elaborados apenas com cone de refratário.
- III. O registro de ar tem a função de introduzir o ar de combustão na câmara de combustão em uma vazão estequiométrica.
- IV. O difusor é instalado com o objetivo de injetar a mistura ar-combustível no queimador.
- V. O sensor de chama deve ser, obrigatoriamente, instalado no interior da câmara de combustão para se detectar uma eventual extinção da chama, a fim de realizar o desligamento do suprimento de combustível.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente a afirmação I é verdadeira.
- b) Somente as afirmações II e IV são verdadeiras.
- c) Somente a afirmação III é verdadeira.
- d) Somente as afirmações III e V são verdadeiras.
- e) Somente a afirmação V é verdadeira.

3. Alguns queimadores foram elaborados para operar apenas com combustível gasoso; outros, apenas com líquidos, normalmente óleo combustível; enquanto os queimadores dual permitem o intercâmbio gás-líquido. Porém, a necessidade de queimadores mais eficientes e menos poluentes levou ao desenvolvimento dos chamados queimadores de alta eficiência.

A respeito dos diversos tipos de queimadores, assinale a alternativa correta.

- a) Por utilizarem menor quantidade de oxigênio, a faixa de operabilidade dos queimadores de alta eficiência é menor.
- b) Os queimadores de alta eficiência consomem maior quantidade de ar de combustão devido à necessidade de intensificarem a sua mistura com o combustível, favorecendo, sobremaneira, a liberação de calor.
- c) Os queimadores dual podem alternar a queima de gás e óleo a fim de reduzir a quantidade de compostos poluentes emitidos, similarmente ao que ocorre com os queimadores de alta eficiência.

d) A menor emissão de compostos poluentes verificada nos queimadores de alta eficiência se deve ao melhor contato entre o comburente e o combustível nas regiões redutoras da câmara de combustão.

e) Os queimadores de alta eficiência produzem uma chama com menor instabilidade na saída do maçarico e, além disso, consomem até 10% menos ar de combustão.

Caldeiras flamatubulares

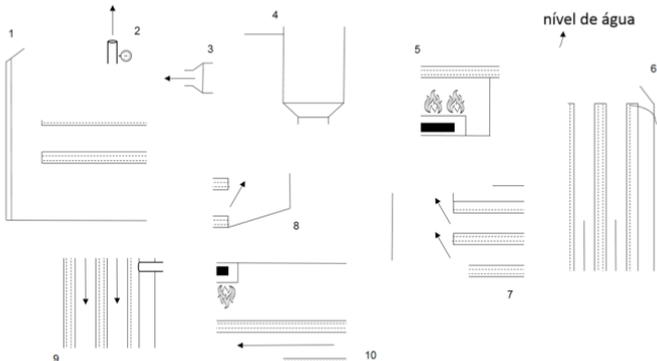
Diálogo aberto

Na seção anterior, nós estudamos os principais tipos de queimadores utilizados em caldeiras para realizar a mistura de um combustível com o oxigênio do ar, proporcionando, então, uma combustão adequada com apreciável liberação de calor. Neste momento, investigaremos as particularidades de diversos tipos de caldeiras, que são equipamentos geradores de vapor.

O vapor começou a ser utilizado tecnologicamente na Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra por volta do ano 1800, e ainda é muito utilizado no mundo moderno, tanto nas indústrias, em vapor de processo, de aquecimento ou para geração de potência; como também é amplamente empregado em hotéis, lavanderias, hospitais e restaurantes.

Lembre-se de que, atualmente, você está trabalhando em um escritório de engenharia realizando projetos referente às caldeiras, que são equipamentos responsáveis pela geração de vapor, já tendo, inclusive, realizado um projeto de otimização do queimador de uma caldeira. Neste momento, a empresa na qual você trabalha foi acionada pela justiça para elaborar uma perícia técnica e investigar as causas da explosão de uma caldeira. Esse equipamento em questão, estava instalado em uma cooperativa agrícola e produzia vapor necessário à operação de algumas máquinas. Na equipe pericial, você ficou responsável por fazer uma busca no local e determinar qual o tipo de caldeira e periciá-la, sugerindo a causa da explosão. As partes encontradas na cooperativa, local do acidente, são apresentadas na Figura 3.5.

Figura 3.5 | Partes recuperadas após a explosão de uma caldeira



Fonte: elaborada pelo autor.

Além das peças encontradas, a equipe de perícia descobriu que a pressão na caldeira ultrapassou o máximo de 15 kgf/cm^2 , a alvenaria que sustentava o equipamento era inadequada, eram queimados combustíveis diversos (bagaço de cana, borracha, cavacos de madeira, carvão) e não foi encontrada a bomba de circulação de água. Como as informações obtidas podem auxiliar na determinação do tipo de caldeira empregado? Quais são os possíveis tipos de caldeiras existentes?

Responder a tais questionamentos vai ajudá-lo a determinar o tipo de caldeira para completar o laudo técnico investigativo e, para isso, você precisará conhecer as características das caldeiras flamatubulares, suas aplicações e as particularidades dos modelos verticais, horizontais, compactas, locomotivas e locomóveis. Vamos começar nosso estudo!

Não pode faltar

O primeiro equipamento utilizado para a geração de vapor foi desenvolvido por volta de 200 a.C., por um matemático e cientista grego denominado Heron. Seu simples equipamento utilizava a energia cinética do vapor para rotacionar uma esfera oca e, por isso, foi denominado aeolipile, significando motor rotativo a vapor. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, novos equipamentos e novas aplicações para a energia do vapor surgiram, como em 1680, com a criação do primeiro veículo a vapor desenvolvido por Denis Papin.

Porém, o maior salto na história da utilização do vapor ocorreu lado a lado com a Revolução Industrial da Inglaterra do século XVIII, com o desenvolvimento de diversas máquinas movidas com a energia do vapor e, também, vários equipamentos para a geração desse vapor, inclusive as caldeiras como conhecemos nos dias atuais, que são os principais equipamentos utilizados para essa finalidade.



Assimile

De acordo com a Norma Regulamentadora nº 13 – Caldeira, vasos de pressão e tubulações (NR 13), as caldeiras a vapor são “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica” (BRASIL, 2017).

As caldeiras são capazes de vaporizar a água em vapor saturado e/ou superaquecido para ser utilizado como vapor de processo e/ou para a geração de energia elétrica e mecânica em indústrias, por exemplo, para a esterilização

de superfícies e materiais em hospitais e clínicas médico-odontológicas, para o cozimento de alimentos em restaurantes, dentre outras aplicações.

Os primeiros modelos de caldeiras foram desenvolvidos com base na experiência prática dos operadores e de dados empíricos e eram, por isso, construídas com grandes reservatórios de água (200 L) para evitar sua completa evaporação e minimizar os riscos de explosão. O aperfeiçoamento de técnicas de dimensionamento e de controle possibilitou o desenvolvimento de caldeiras menores, de 20 a 50 L/m².



Assimile

A NR 13 classifica as caldeiras nas categorias A (volume acima de 50 L, operando com pressão de 19,98 kgf/cm² ou superior) e B (volume superior a 50 L com $0,61 \text{ kgf/cm}^2 < P_{\text{operação}} < 19,98 \text{ kgf/cm}^2$, tal que o produto da pressão (em kPa) pelo volume (m³) seja maior do que 6). Você pode acessar a NR 13 por meio de sua Biblioteca Virtual, acessando nosso parceiro Target Gedweb e selecionando a opção NR MTE.

Existem muitos tipos de caldeiras, sendo que foge do escopo desta seção abordar todas elas detalhadamente. Por isso, restringiremos nosso estudo às caldeiras a combustão, isto é, aquelas caldeiras nas quais a energia necessária ao aquecimento e vaporização da água líquida provém da combustão de um material sólido, líquido ou gasoso. Nessa classificação encontram-se as caldeiras aquatubulares e flamatubulares, e esta seção abordará apenas as particularidades das caldeiras flamatubulares.

Independentemente da classificação, uma caldeira apresenta alguns componentes comuns que, ao atuarem em conjunto, produzem o vapor na temperatura, pressão e vazão requisitadas. Tais componentes são apresentados no Quadro 3.1, juntamente com uma breve explicação de sua finalidade, e exemplificados pelo modelo de caldeira descrito na Figura 3.6.

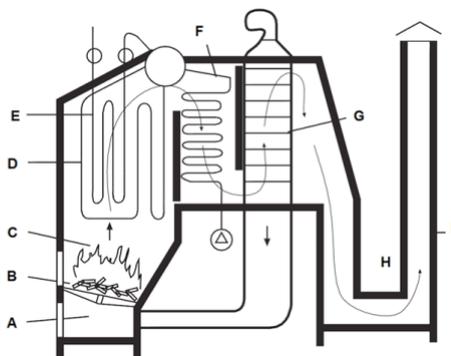
Quadro 3.1 | Finalidades e componentes básicos de uma caldeira a vapor

	Componente	Finalidade
A	Cinzeiro	Deposita as cinzas e combustíveis não queimados
B	Fornalha	Realiza a combustão de líquidos e gases
C	Câmara de combustão	Local de ocorrência da combustão
D	Tubos evaporadores	Tubos contendo a água a ser evaporada
E	Superaquecedor	Eleva a temperatura do vapor saturado
F	Economizador	Aquece a água de alimentação utilizando os gases de combustão

G	Pré-aquecedor de ar	Aquece o ar previamente à combustão
H	Canais de gases	Transporta os gases de combustão até a chaminé
I	Chaminé	Expulsa os gases de combustão

Fonte: adaptado de Centrais... (2005, p. 61 apud PERA, 1990, p. 1-3).

Figura 3.6 | Esquema de uma caldeira e seus componentes



Fonte: adaptada de Centrais... (2005, p. 61 apud PERA, 1990, p. 1-3).

As caldeiras flamatubulares são aquelas cujos tubos evaporadores ficam imersos na água que será evaporada. Pelo interior dos tubos circulam os gases de combustão que transferem a energia necessária à geração de vapor. Já nas aquatubulares, a circulação dos gases e do vapor é invertida. Como a água líquida fica no tubulão, que é uma grande região cilíndrica da caldeira flamatubular, pode-se confeccionar dois modelos: vertical ou horizontal, sendo a fornalha interna ou externa. Os modelos de caldeiras com apenas um tubulão foram originalmente denominados de Cornovaglia e as com dois de Lancashire (posteriormente modificada, originando a Escocesa, para aplicações marítimas).



Refleta

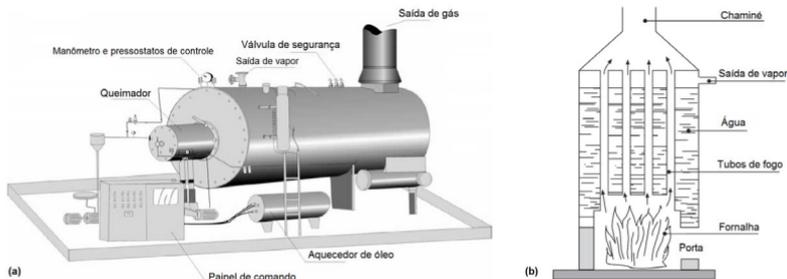
As caldeiras horizontais podem ser classificadas, ainda, pelo número de vezes em que os tubos evaporadores percorrem o tubulão, sendo 2, 3 e 4 passes os modelos comerciais comuns.

Assim, por que no modelo vertical não é possível haver mais de um passe dos tubos?

Observemos mais atentamente as características das caldeiras verticais e horizontais exemplificadas na Figura 3.7. Ambas as caldeiras apresentam o formato cilíndrico com espelhos (placas planas) nas extremidades; porém,

as verticais apresentam os tubos internos inseridos verticalmente, desde a fornalha até a chaminé da caldeira, enquanto as horizontais de grande volume (as versões modernas são compactas) têm configuração horizontal com o feixe de tubos percorrendo o interior do tubulão mais de uma vez.

Figura 3.7 | Esquema de uma caldeira flamatubular horizontal compacta (a) e vertical (b)



Fonte: adaptada de Centrais... (2005, p. 64-65).

No modelo vertical, a transferência de calor para vaporização de água tem origem nos gases de combustão que transitam no interior dos tubos para a água contida no tubulão que permanece com nível aproximadamente constante devido à alimentação contínua. São equipamentos fáceis de serem transportados e de serem instalados e, por isso, as caldeiras verticais são recomendadas para localidades em que haja pouco espaço disponível. No entanto, não apresentam rendimento térmico elevado, sendo este de aproximadamente 65% devido à única passagem dos gases pelos tubos evaporadores e da sua área de troca térmica apresentar entre 2 e 30 m². Além disso, são equipamentos destinados às operações que necessitem vapor de, no máximo 10 kgf/cm².



Pesquise mais

As caldeiras flamatubulares horizontais sofreram muitas modificações ao longo dos anos e diversos modelos caíram em desuso devido ao desenvolvimento de modelos com melhor eficiência térmica e de outras vantagens. Conheça um pouco das caldeiras horizontais Cornovaglia e Lancashire lendo as páginas 24 e 25 do material a seguir:

ALBERICHI, M. **Estudo das instalações e operações de caldeiras de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob ótica da NR-13 e NR-28**. 2013. 103f. Monografia (especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

A adoção de um feixe de tubos de pequeno diâmetro fez o tubulão cair em desuso nos modelos horizontais de caldeiras flamatubulares, sendo esta denominada de multitubular. Essa caldeira necessita, obrigatoriamente, uma fornalha externa devido à disposição do feixe de tubos, isto é, a queima do combustível ocorre na região inferior da caldeira, os gases de combustão percorrem toda a extensão do equipamento sendo introduzidos nos tubos por uma extremidade e eliminados pela chaminé na posição oposta. No entanto, preferem-se os modelos compactos de caldeiras para a geração de vapor, pois as multitubulares operam com pressões máximas de apenas 16 kgf/cm^2 e não são capazes de fornecer vazão de vapor superior a 6 ton/h . Além disso, são caldeiras com alto custo de construção e instalação, e também apresentam eficiência térmica baixa, em torno de 60% a 65%.

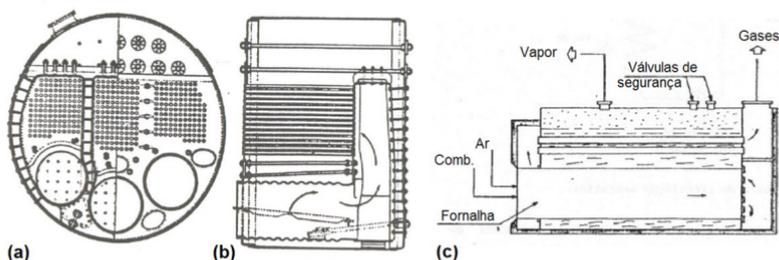


Assimile

As caldeiras compactas são preferidas para aplicações industriais, pois apresentam todos os equipamentos necessários ao seu funcionamento acoplados à unidade geradora de vapor e, também, por apresentarem ampla faixa de operação (temperatura, pressão e vazão de vapor).

As caldeiras compactas têm queimador de combustível (normalmente óleo), sistema de alimentação de água, controladores automáticos, painel de comando e instrumentação de operação reunidos em um único equipamento e pronto para uso imediato. O exemplo mais comum de uma caldeira compacta é o modelo Escocesa, apresentado na Figura 3.8, desenvolvido para o uso marítimo, mas que ganhou mercado industrial. Observe a presença de três tubulões e da grande quantidade de tubos evaporadores, garantindo elevada área de troca térmica em um equipamento de tamanho reduzido, capaz de gerar 15 ton/h de vapor a 16 kgf/cm^2 .

Figura 3.8 | Vista frontal (a) e longitudinal (b) de uma caldeira Escocesa e um modelo típico compacto (c) com três passes dos tubos

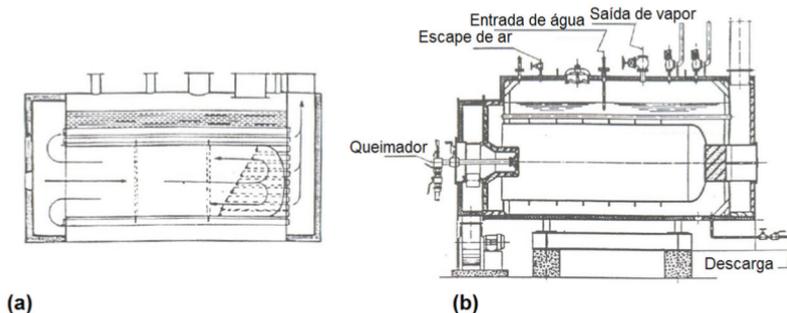


Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 7-8) e Bazzo (1995, p. 85).

As caldeiras compactas, incluindo a modelo Escocesa, são construídas com fornalha em alvenaria e com câmara de retorno banhada (molhada), pois assim eliminam-se as peças refratárias que requerem manutenção frequente e melhoram-se os efeitos de dilatação térmica do equipamento. A circulação de gases no interior dessas caldeiras é feita sob pressão positiva mediante a instalação de um ventilador próximo à fornalha ou de um exaustor ao final dos tubos. A circulação positiva permite empregar ventiladores de menor potência e compactos, porém as juntas do equipamento podem deixar escapar gases tóxicos. Para impedir que isso ocorra, realiza-se a tiragem (remoção) induzida dos gases utilizando um ventilador mais potente (PERA, 1990, p. 7-11).

A caldeira de retorno de chama é um modelo de caldeira compacta inteiramente diferente das demais, pois se baseia em fazer a chama voltar-se sobre si mesma na zona de queima, conforme apresentado na Figura 3.9 (a). Esse modelo tem eficiência térmica superior à das demais caldeiras compactas (88%) com vazão vapor de 15 ton/h. O projeto da Corsevit, também de retorno de chama, apresentado na Figura 3.9 (b), objetiva maior eficiência térmica (90%-92%), porém com apenas 6 ton/h de produção.

Figura 3.9 | Caldeira com retorno de chama na zona de combustão (a) e modelo Corsevit (b)



Fonte: Pera (1990, p. 7-12).



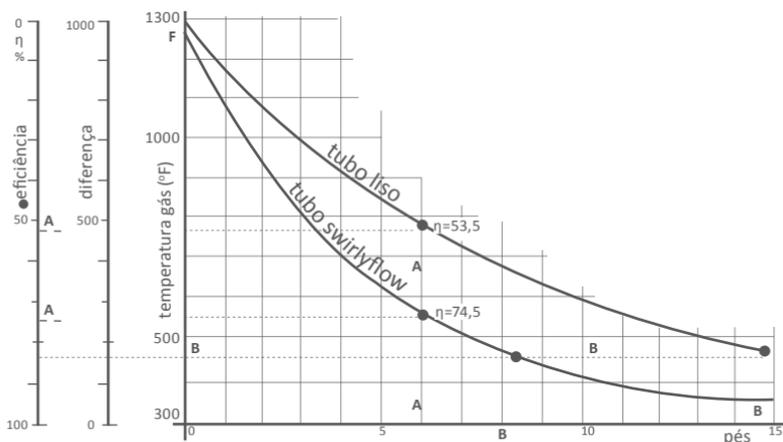
Refleta

Agora, reflita sobre a seguinte questão: por que o aumento da eficiência térmica de caldeiras compactas para valores acima de 90% somente foi possível com o acoplamento de uma unidade pré-aquecedora de ar de combustão?

Uma modificação que pode ser realizada nos tubos das caldeiras a fim de melhorar a transferência de calor e, portanto, a eficiência térmica do equipamento, consiste na elaboração dos tubos com seções anelares de

escoamento (gases de combustão no anel interno e água/vapor, no externo) ou com tubos helicoidais (tubos *Swirlyflow*), sendo que o ganho de eficiência é representado pelo aumento do coeficiente de transferência de calor convectivo apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10. Comparação da eficiência térmica de caldeiras com tubos lisos e *Swirlyflow*



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 7-13).



Exemplificando

Observe a Figura 3.10 e compare a eficiência entre um tubo liso (caso A) e um *Swirlyflow* (caso B), ambos de seis pés de comprimento. No caso A, a eficiência é de apenas 53,5%, porém aumenta para 74,6% no caso B, ocupando os mesmos seis pés. Agora responda: qual deve ser o comprimento de um tubo liso e de um tubo *Swirlyflow* para que ambos apresentem uma eficiência de 85%?

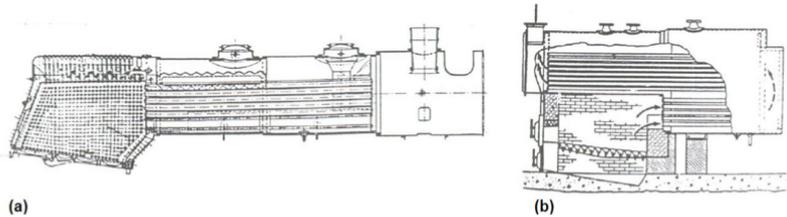
Solução:

Observando a Figura 3.10, notamos que o tubo liso de 14,8 pés de comprimento tem eficiência de 85%, sendo que este valor de eficiência para o tubo helicoidal é obtido com apenas 8,24 pés de comprimento, reduzindo em 44% o espaço da caldeira.

Algumas aplicações da geração de vapor alavancaram o desenvolvimento de uma caldeira de fácil movimentação. Assim, surgiram as caldeiras locomotivas (a), posteriormente modificadas em locomóveis (b), apresentadas na Figura 3.11. Essas caldeiras são multitubulares e revestidas por um casco metálico duplo. São capazes de gerar grandes quantidades de vapor,

visto que os tubos passam várias vezes pela região da fornalha; com isso, é possível produzir uma vazão de até 8 ton/h de vapor superaquecido com pressão de 21 kgf/cm² em uma área de 350 m² de troca térmica.

Figura 3.11 | Exemplo de caldeira locomotiva (a) e locomóvel com dois passes na chama (b)



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 7-15).

As maiores aplicações das caldeiras locomotivas e locomóveis são em locais nos quais a energia elétrica é escassa ou inexistente e, também, naqueles que exigem o fornecimento de vapor sob condições rigorosas de operação, aliadas ao deslocamento, como no transporte em locomotivas a vapor e alguns tipos de embarcações. No entanto, em embarcações marítimas, prefere-se a caldeira Escocesa, pois esta apresenta três tubulões com grelhas a carvão (combustível sólido de fácil transporte e armazenagem), de tamanho reduzido e com fornecimento de vapor (energia mecânica) adequado para a movimentação do navio. No caso dos processos auxiliares de limpeza e cozimento de alimentos, emprega-se o vapor de unidades auxiliares de aquecimento denominadas Donkey-boiler, que consistem em uma versão reduzida das caldeiras verticais.

Em geral, as caldeiras flamatubulares são capazes de fornecer até 20 ton/h de vapor na pressão máxima de 16 kgf/cm². Devido ao queimador funcionar com combustível líquido ou gás e, também, ao eficiente controle de temperatura, essas caldeiras são amplamente utilizadas nas indústrias em processos que envolvem temperaturas relativamente baixas. Não é recomendado utilizar combustíveis sólidos em caldeiras flamatubulares devido à formação de fuligem e ao desempenho insatisfatório na geração de vapor.

A desvantagem do modelo flamatubular consiste nas incrustações formadas no exterior dos tubos devido ao uso de água de vaporização de baixa qualidade. As incrustações dificultam a transferência de calor, prejudicam a produção de vapor e acarretam o aumento de consumo de combustível e aumento de pressão na caldeira. A manutenção da caldeira é difícil, no entanto, a substituição do equipamento é barata, devido ao seu baixo valor econômico quando comparado com outros modelos de caldeiras (aquatubulares, por exemplo).



Pesquise mais

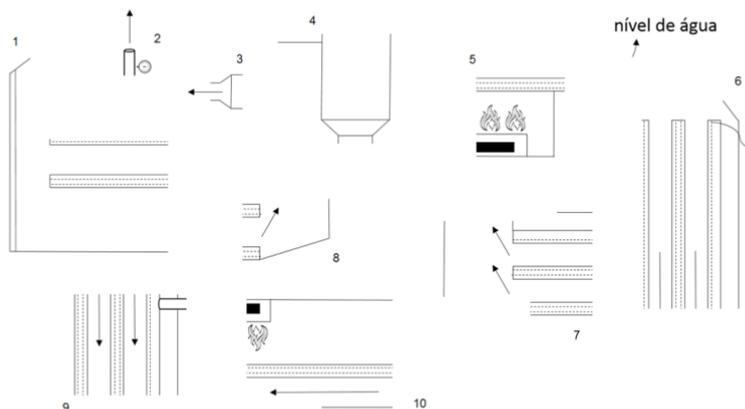
Como existem diversos tipos de caldeiras flamatubulares, é importante conhecer um pouco mais sobre elas lendo as páginas 19 a 23, do material a seguir:

SOEIRO, E. C.; ANTONIOLLI, F. A. **Plano otimizado de inspeção de medição de espessura com base na matriz de risco das regiões internas de uma caldeira de recuperação – proposta.** 2005. 116f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

Sem medo de errar

Você foi contratado por um escritório de engenharia e trabalha realizando projetos em diversas áreas. Dentre esses projetos, está o dimensionamento e otimização de equipamentos geradores de vapor como as caldeiras. Neste momento, você foi acionado pela justiça para realizar a perícia de um acidente envolvendo a explosão de uma caldeira e investigar as causas dessa explosão. Após você e sua equipe vistoriarem o local do acidente, foram recuperados os componentes apresentados na Figura 3.5 e, além disso, a empresa determinou que a pressão na caldeira ultrapassou o máximo de 15 kgf/cm^2 , a alvenaria de sustentação do equipamento estava inadequada para a função, eram queimados combustíveis diversos (bagaço de cana, borracha, cavacos de madeira, carvão) e não foi encontrada uma bomba de circulação de água.

Figura 3.5 | Partes recuperadas após a explosão de uma caldeira



Fonte: elaborada pelo autor.

A elaboração da perícia depende da união dos componentes encontrados e o relatório dela pode ser redigido de diversas maneiras. Uma das possíveis maneiras de resolver o problema proposto envolve iniciar a análise unindo os componentes 1 e 6, evidenciando a presença de tubos evaporadores. Além disso, no componente 6 nota-se a presença de um nível de água no casco da caldeira e não nos tubos. Portanto, baseado nesses componentes, é possível afirmar que se trata de uma caldeira flamatubular, em que os gases de combustão circulam pelo interior dos tubos e a água de vaporização percorre o lado externo dos tubos. Isso também é evidenciado pelo fato de não ter sido encontrada uma bomba de circulação de água, já que os modelos flamatubulares não apresentam esse componente.

A análise das peças 5 e 10 demonstram a presença de uma fornalha na caldeira. A queima de combustíveis sólidos diversos, como o bagaço de cana, borracha, cavacos de madeira e carvão, possivelmente ocasionou o aumento de pressão e a explosão da caldeira. Como os diferentes materiais apresentam poder calorífico distintos, dependendo do material queimado pode ter havido um fornecimento excessivo de energia para a caldeira, um aumento da quantidade de vapor no seu interior e, conseqüentemente, um aumento da pressão interna ultrapassando o limite de 15 kgf/cm^2 . Além disso, a união das peças 1, 6, 7, 8, 9 e 10 demonstram a passagem dupla dos tubos evaporadores, cuja finalidade é intensificar a transferência de calor entre os gases quentes e a água de vaporização, corroborando, portanto, a hipótese de queima irregular de combustível como causa principal da explosão.

A união dos demais componentes revela que a caldeira flamatubular é do tipo horizontal e compacta sendo, portanto, de pequeno volume. Com o aumento da temperatura e da quantidade de vapor formada, aliada com a ausência de resistência estrutural, visto que a alvenaria utilizada como estrutura da caldeira encontrava-se imprópria para a função, a caldeira não suportou a condição rigorosa de operação (aumento de pressão e do volume de vapor gerado) e falhou catastróficamente, ocorrendo, inclusive, a sua explosão.

Portanto, você pode finalizar o relatório afirmando que houve falhas tanto na operação do equipamento quanto em sua instalação, concluindo, portanto, o parecer técnico requisitado pela justiça. Esse parecer foi embasado nas características das caldeiras flamatubulares, pois as informações coletadas durante a vistoria revelaram que a caldeira era do tipo flamatubular horizontal e compacta.

Bom trabalho!

Seleção de caldeira para uma indústria de laticínios

Descrição da situação-problema

Uma empresa de laticínios está abrindo uma nova unidade industrial com capacidade produtiva diária de 1.200 L de derivados do leite e precisa instalar uma caldeira para suprir a demanda de vapor necessária aos seus processos de fermentação, pasteurização e de esterilização de embalagens. Para isso, você foi contratado como engenheiro a fim de especificar o modelo da caldeira e apresentar a justificativa da escolha para o diretor da nova unidade fabril, sabendo que a produção de cada litro diário dos derivados do leite requer o uso de 0,4 kg de vapor na pressão de $0,82 \text{ kgf/cm}^2$.

Resolução da situação-problema

A quantidade de vapor que deve ser fornecida para a nova unidade de laticínio é:

$$\text{Vapor} = \left(1200 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \right) \cdot \left(0,4 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \right) = 480 \text{ kg/dia} = 20 \text{ kg/h}$$

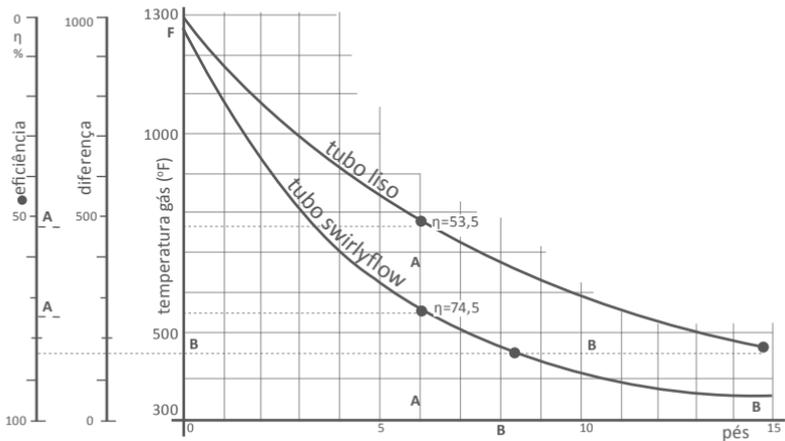
Como a pressão de operação está na faixa $0,61 \text{ kgf/cm}^2 < P_{\text{operação}} < 19,98 \text{ kgf/cm}^2$, a caldeira se encaixa na categoria B da NR 13, e seu volume pode ser obtido pela expressão:

$$V \cdot P_{\text{operação}} > 6 \rightarrow V > \frac{6}{P_{\text{operação}}} = \frac{6}{80 \text{ kPa}} = 0,075 \text{ m}^3 = 75 \text{ L}$$

Por ser uma aplicação industrial de pequeno porte, recomenda-se utilizar uma caldeira compacta que já apresente todos os seus componentes de operação instalados. Além disso, é interessante utilizar o modelo Corsevit com retorno de chama, pois sua eficiência térmica próxima de 92% acarretará economia do combustível empregado, o que é favorável para uma unidade industrial em início de operação. Ademais, a geração de vapor requisitada pelo laticínio é menor do que a dos demais modelos de caldeiras compactas (6 ton/h). Portanto, selecionar o modelo Corsevit não representa um empecilho para a aplicação em questão.

1. A transferência de calor em caldeiras tubulares depende do coeficiente de transferência de calor convectivo. Este é diretamente relacionado com a geometria do tubo evaporador em caldeiras flamaturbulares. Visando melhorar tal coeficiente e, portanto, a transferência e o rendimento térmico das caldeiras, é comum que os fabricantes de caldeiras flamaturbulares empreguem tubos helicoidais (*Swirlyflow*) em vez de tubos retos (lisos). A comparação da eficiência de troca térmica entre as duas geometrias de tubos pode ser vista na Figura 3.10.

Figura 3.10. Comparação da eficiência térmica de caldeiras com tubos lisos e *Swirlyflow*



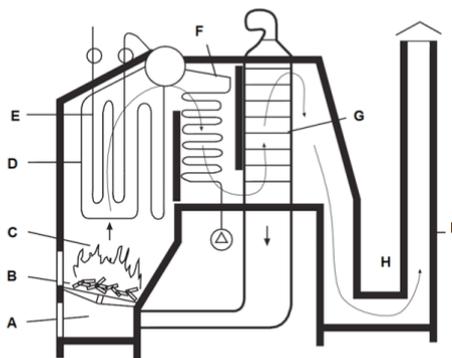
Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 7-13).

Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, o comprimento de um tubo liso e outro *Swirlyflow*, ambos com rendimento de 50%.

- a) 5,5 pés e 3,0 pés.
- b) 5,0 pés e 3,0 pés.
- c) 5,2 pés e 7,0 pés.
- d) 5,5 pés e 7,2 pés.
- e) 5,0 pés e 7,0 pés.

2. A Norma Regulamentadora nº 13 (BRASIL, 2017) define a caldeira como sendo um equipamento capaz de gerar a vaporização da água inicialmente no estado líquido, considerando o vapor produzido no estado saturado ou superaquecido. Para isso, é necessário que alguns componentes atuem em conjunto. Observe os componentes apresentados na caldeira da Figura 3.6.

Figura 3.6 | Esquema de uma caldeira e seus componentes



Fonte: adaptada de Centrais... (2005, p. 61 apud PERA, 1990, p. 1-3).

Assinale a alternativa que indica corretamente o componente da caldeira e sua importância para a geração de vapor.

- a) O componente A refere-se à fornalha da caldeira na qual são queimados os combustíveis com liberação de fuligem e de partículas de combustíveis não queimados.
- b) O componente H corresponde à chaminé da caldeira, cuja finalidade é transportar os gases de combustão e expulsá-los para a atmosfera após remoção da fuligem.
- c) O componente C indica a câmara de combustão, local de alimentação e queima dos combustíveis a serem queimados na caldeira.
- d) O componente D corresponde aos tubos evaporadores, responsáveis por conduzir os gases quentes que cedem calor para a água de evaporação que circundam os tubos externamente.
- e) O componente E indica o superaquecedor da caldeira. Esse componente está presente somente nas caldeiras verticais para superaquecimento do vapor saturado.

3. As caldeiras flamotubulares podem ser confeccionadas na posição vertical ou na horizontal em diversos modelos, sendo que o formato horizontal apresenta uma gama muito maior de modelos, cada qual com suas características particulares e finalidades próprias. A respeito das características das caldeiras flamotubulares, temos as seguintes afirmações:

- I. As caldeiras que apresentam a maior eficiência térmica são as com retorno de chama, porém é necessário o pré-aquecimento do ar anteriormente à combustão.
- II. As caldeiras Escocesas são preferíveis para aplicações marítimas, pois são capazes de produzir tanto vapor saturado para as atividades auxiliares da embarcação como vapor superaquecido para o movimento dos motores do navio.

- III. A finalidade do(s) tubulão(ões) é armazenar a água líquida que será vaporizada. No entanto, os modelos de caldeiras com tubulão(ões) perderam espaço para as caldeiras com feixe de tubos finos (multitubulares).
- IV. As caldeiras verticais encontram aplicações que requerem baixa temperatura, visto que, devido a sua limitação de altura, os gases de combustão devem passar várias vezes pelo equipamento a fim de gerar grande quantidade de vapor, porém com baixa temperatura (muita perda térmica).
- V. Tanto as caldeiras locomotivas quanto as locomóveis são indicadas para serem utilizadas em regiões onde a energia elétrica esteja ausente, sendo preferível o uso das locomóveis por serem um aperfeiçoamento das locomotivas.

A partir do julgamento das afirmativas apresentadas no texto-base, assinale a alternativa que apresenta a avaliação correta. São verdadeiras as afirmativas:

- a) I e II, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) I, II e III, apenas.
- d) II, III e IV, apenas.
- e) II, IV e V, apenas.

Caldeiras Aquatubulares

Diálogo aberto

Caro aluno, note que muitos serviços que você utiliza em seu cotidiano dependem da produção de vapor. Uma lavanderia utiliza vapor em suas máquinas, um hotel necessita de vapor para limpar quartos, banheiros e utensílios domésticos, um restaurante emprega o vapor para o cozimento de alimentos e um hospital ou consultório odontológico utiliza o vapor para esterilização de superfícies e de materiais. Além disso, muitos produtos fabricados por diversas indústrias (automóveis, têxteis, alimentícias, entre outras) também fazem uso do vapor, que é produzido por uma caldeira.

Para aplicarmos o conteúdo desta seção, lembre-se de que você foi contratado para atuar em um escritório de engenharia e sua função consiste, em grande parte, na elaboração de projetos relacionados ao dimensionamento de caldeiras. Neste momento, o escritório no qual você trabalha está projetando um novo tipo de caldeira aquatubular para um importante cliente. Muitos cálculos e dimensionamentos são necessários nesse projeto, envolvendo, portanto, uma grande equipe de engenheiros. Você foi escalado pelo engenheiro-chefe da equipe para integrar esse projeto, sendo que sua responsabilidade é especificar o material para confecção dos tubos aletados que transferirão calor no interior da caldeira, sabendo que estão disponíveis os materiais da Tabela 3.1. Independentemente do material, a variação de temperatura durante a operação não pode ser superior a 10°C .

Tabela 3.1 | Materiais disponíveis para confecção da caldeira e suas condutividades térmicas a 300 K

Material	Condutividade térmica (W/m · K)
Aço cromado	37,7
Aço AISI 302	15,1
Aço AISI 304	14,9
Aço AISI 316	13,4
Aço AISI 347	14,2

Fonte: adaptada de Çengel, Ghajar e Kanoglu (2012, p. 869).

Nas especificações do projeto consta que a caldeira estará submetida a uma carga térmica de $1,8 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ operando sob pressão de 25 kgf/cm^2 . Além disso, o tubo interno da caldeira tem espessura de 3 mm e diâmetro de 7,6 cm (interno). Considerando essas informações, quais são as características construtivas de uma caldeira aquatubular? Como a presença da aleta influencia a metodologia de cálculo da temperatura interna?

A resposta a tais questionamentos vai ajudá-lo a compreender o funcionamento da caldeira aquatubular e especificar sua temperatura interna de operação. Você precisa demonstrar ao engenheiro-chefe os cálculos realizados na determinação dessa temperatura. Vamos iniciar!

Não pode faltar

As caldeiras podem ser classificadas conforme a sua fonte de energia. Nesse quesito, elas são divididas em: **caldeiras elétricas**, capazes de vaporizar a água mediante o uso de eletricidade, e **caldeiras de combustão**, que empregam a energia da queima de um combustível. Esse material objetiva analisar as particularidades dos tipos mais comuns de caldeiras de combustão que podem ser divididas, ainda, em **flamatubulares** e **aquatubulares**. Na seção anterior estudamos os principais modelos de caldeiras flamatubulares, que são aquelas nas quais os gases quentes originados na combustão percorrem o interior de tubos evaporadores, cedendo calor para o líquido circundante que será transformado em vapor. Nesta seção, abordaremos as caldeiras aquatubulares, isto é, aquelas em que a água sofre a vaporização no interior dos tubos e os gases quentes percorrem a região externa dos tubos, cedendo sua energia para o interior destes.

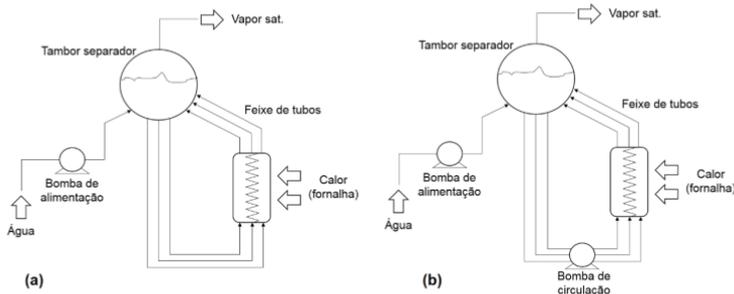


Assimile

As caldeiras aquatubulares, também denominadas tubos de água, são constituídas por um corpo cilíndrico preenchido por um feixe de tubos. No interior dos tubos circula água em estado líquido, que será evaporada para a formação do vapor, e o calor necessário é transferido pelos gases de combustão que percorrem a região externa aos tubos (corpo cilíndrico).

As caldeiras aquatubulares são utilizadas em processos que necessitam de grandes quantidades de vapor a níveis de pressão e de temperatura elevados. As condições de operação alcançadas por esse tipo de caldeira são impossíveis de serem atingidas com as caldeiras flamatubulares. Isso se deve ao aspecto construtivo da caldeira aquatubular, que permite uma área de transferência térmica muito superior às flamatubulares, visto que o feixe de tubos que transfere energia na câmara de combustão se localiza exteriormente ao equipamento propriamente dito, conforme apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12 | Caldeiras aquatubulares de circulação natural (a) e forçada (b)



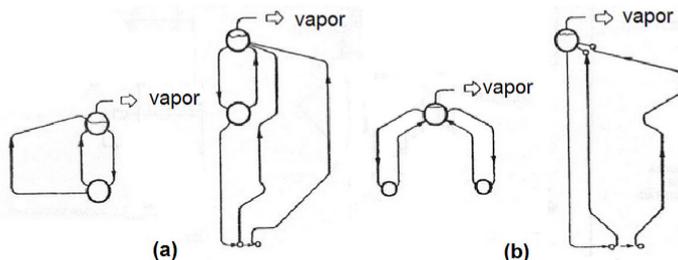
Fonte: adaptada de Bazzo (1995, p. 78).

Na fornalha, os tubos formam uma parede de água na qual a transferência de calor ocorre predominantemente por radiação térmica. Os tubos podem ser sustentados pela própria parede da fornalha ou podem ser suportados pelos tubulões, localizados posteriormente à fornalha, nos quais a transferência de calor ocorre tanto por convecção quanto por radiação (BAZZO, 1995, p. 74).

A quantidade de vapor produzida pelas caldeiras aquatubulares é muito superior à das flamatubulares, mas, em média, a vazão específica situa-se em $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, podendo ser maior ou menor, dependendo do combustível alimentado na caldeira e do tipo de fornalha. Por produzirem grande quantidade de vapor, são empregadas em grandes unidades industriais com capacidades de geração de $600 - 750 \text{ ton/h}$, pressão de $150 - 200 \text{ kgf/cm}^2$ e temperatura de $450 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Algumas unidades operam com condições críticas de 226 atm ou até mesmo supercríticas, atingindo até 250 atm; porém, existem modelos menores cuja capacidade de geração de vapor é de apenas 100 kg/h .

A classificação das caldeiras aquatubulares é realizada em relação à geometria de seu feixe de tubos e ao tipo de escoamento no seu interior. Além do tambor separador água/vapor, as caldeiras apresentam um tubulão (tambor) ou mais para reservatório de água. Quando o feixe de tubos que une tais tubulões são retos, as caldeiras são ditas caldeiras de tubos retos, conforme a Figura 3.13 (a). No entanto, são chamadas de caldeiras de tubos curvos quando o feixe de tubos é não retilíneo, conforme apresenta a Figura 3.13 (b). Em ambos os casos, a circulação de água é feita naturalmente, sem a presença de um agente externo. O terceiro tipo de classificação de caldeiras aquatubulares envolve a circulação positiva da água, que ocorre devido à presença de uma bomba de circulação (circulação positiva forçada), conforme no modelo já apresentado da Figura 3.12 (b) ou de algum aspecto construtivo (circulação positiva natural).

Figura 3.13 | Dois exemplos de caldeiras de tubos retos (a) e curvos (b) de circulação natural



Fonte: adaptada de Bazzo (1995, p. 79).

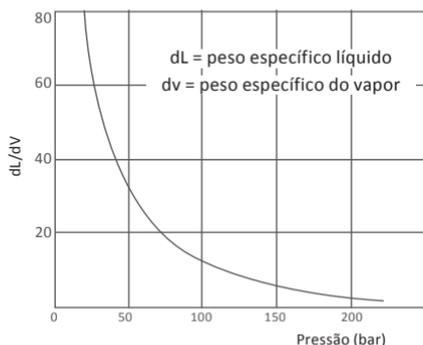
As caldeiras de tubo reto têm capacidade de produzir vapor a 45 kgf/cm^2 com vazão de 3 a 30 ton/h. Já as de tubo curvos produzem vapor em quantidade e pressão variáveis, dependendo da quantidade de tubulões presentes, quantidade de tubos, combustível queimado, dentre outros aspectos. A terceira classificação de caldeiras aquatubulares, com circulação positiva, é a das maiores caldeiras existentes. Elas foram desenvolvidas após o final de Primeira Guerra Mundial a fim de resolver os problemas causados pela diferença de peso específico entre o líquido e as bolhas de vapor nos tubos de circulação natural. Esse comportamento do peso específico está representado no gráfico da Figura 3.14, em relação à pressão gerada pelo vapor e o peso específico da água/vapor.



Assimile

A diferença entre o peso específico do líquido e do vapor origina o movimento da água no interior das caldeiras aquatubulares de circulação natural, isto é, a força motriz do escoamento origina-se na diferença de densidade entre a fase líquida e a fase vapor.

Figura 3.14 | Comportamento da razão do peso específico líquido/vapor com a pressão de operação



Fonte: adaptada de Bazzo (1995, p. 77).

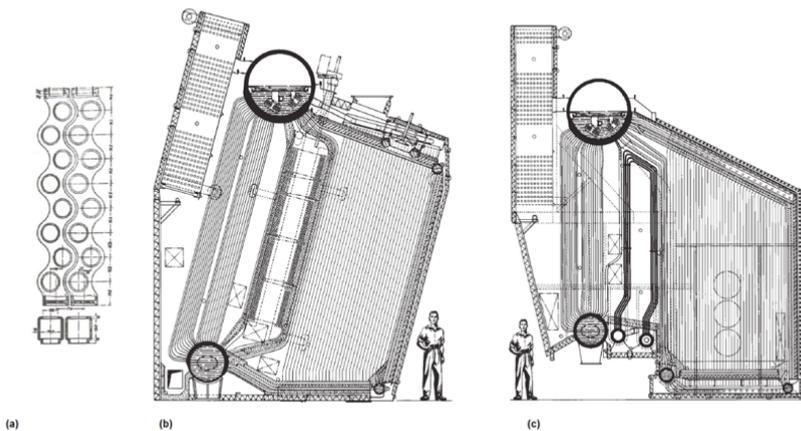


Refleta

Refleta sobre a seguinte questão: por que a razão do peso específico do líquido e do vapor tendem a zero com o aumento da pressão de operação? O ponto crítico da água pode ajudar a responder a esse questionamento.

Os modelos de tubos retos são construídos de maneira inclinada para favorecer a tiragem natural do vapor pela extremidade superior. O vapor e a água não evaporada são admitidos no tambor que separará a água e o vapor produzido. A água é recirculada para a câmara de evaporação (parede de água da fornalha) e o vapor saturado pode ser distribuído para seu local de consumo ou encaminhado para a unidade de superaquecimento. Além disso, os tubos do feixe, normalmente com 4" de diâmetro nominal, são dispostos onduladamente a fim de favorecer a transferência de energia com os gases de combustão que percorrem a sua superfície externa ascendentemente, conforme apresentado na Figura 3.15 (a), que mostra a visão longitudinal de um modelo típico de caldeira aquatubular de tubos retos ondulados.

Figura 3.15 | Tubos retos em câmaras onduladas (a), modelo típico de caldeira de tubos retos inclinados (b) e tubos retos alinhados (c)



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 8-5) e Kitto e Stultz (2005, p. 31-33).

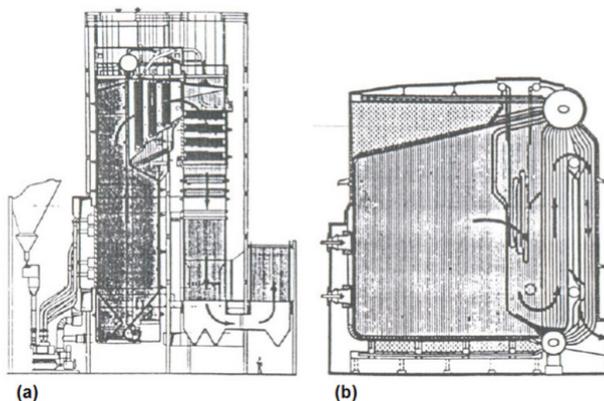
Observe na Figura 3.15 (b) que os tubos inclinados produzem uma câmara de tubos dispostos onduladamente, ao passo que nos tubos retos (Figura 3.15 (c)) estes permanecem alinhados. Ambos os modelos de caldeiras apresentados foram desenvolvidos para aplicação náutica.

Conforme Pera (1990, p. 8-7) a vantagem da caldeira de tubos retos é a facilidade de substituição e limpeza deles, inclusive para remoção da fuligem

acumulada. Além disso, o equipamento pode ser operado com água de vaporização de qualidade inferior, apresenta uma grande reserva de água para vaporização e dispensa o uso de chaminés longas ou de tiragem forçada dos gases. As desvantagens, no entanto, são as constantes interrupções na operação para limpeza e manutenção devido ao uso de água de baixa qualidade, a presença de uma portinhola para cada tubo e a limitação da vaporização específica entre 20 e 25 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$.

O advento dos modelos de caldeiras de tubos curvos, apresentados na Figura 3.16, são praticamente insubstituíveis nos dias atuais, pois eles não apresentam restrição na quantidade de vapor que podem produzir, apenas na pressão, limitada a 160 kgf/cm^2 . Os tubos curvos dos quais são feitas unem-se aos tubulões por meio de soldagem ou mandrilagem (processo de estanqueidade mecânica de elevada precisão).

Figura 3.16 | Caldeiras de tubos curvos com um (a) e dois (b) tambores



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 8).

Na sua origem, as caldeiras de tubos curvos dependiam em grande parte do revestimento de alvenaria refratária. No entanto, o aperfeiçoamento dos processos de queima do combustível, o uso de tubos de água como revestimento e o aproveitamento da radiação do calor nas fornalhas levaram à eliminação dos refratários e redução do tamanho dessas caldeiras sem prejuízo à geração de vapor. Esse modelo apresenta vantagem na facilidade de limpeza interna devido ao fácil acesso a todos os seus componentes. A vaporização específica depende do combustível, sendo 30 - 45 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ para a queima de sólidos e 50 - 80 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ para combustíveis líquidos (PERA, 1990, p. 8).

As caldeiras aquatubulares compactas são uma versão das caldeiras de tubos curvos que é capaz de atingir eficiência de 91% e geração de vapor na

ordem de 100 ton/h . Além disso, por serem compactas, essas caldeiras são comercializadas prontamente para operação necessitando apenas das instalações eletroeletrônicas e apresentam, ainda, operação totalmente automática.



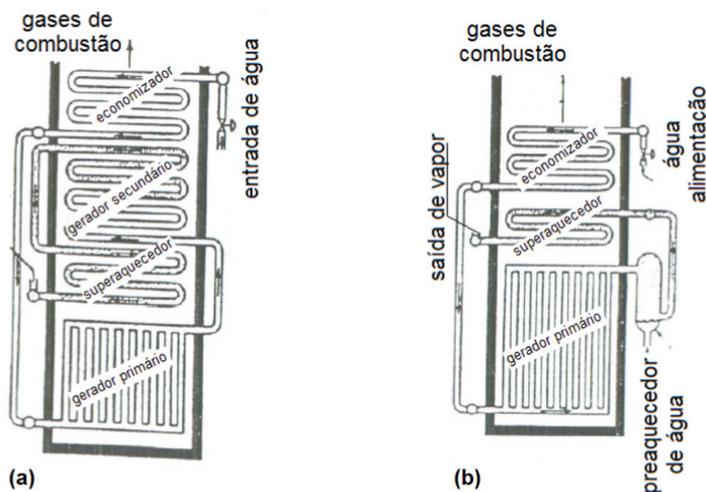
Pesquise mais

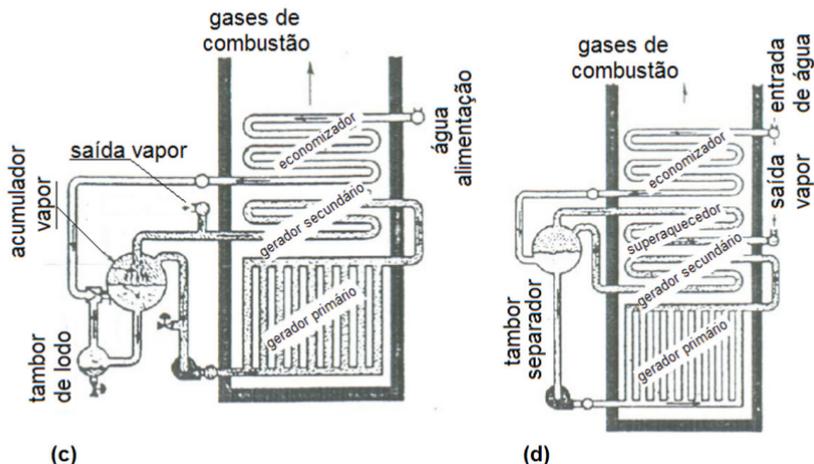
Conheça um pouco mais das características e aplicações dos diferentes tipos de caldeiras aquatubulares lendo as páginas 23 a 29 do material a seguir:

SOEIRO, E. C.; ANTONIOLLI, F. A. **Plano otimizado de inspeção de medição de espessura com base na matriz de risco das regiões internas de uma caldeira de recuperação – proposta.** 2005. 116f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

Analisando os tipos de caldeiras pela forma de circulação da água, notamos o surgimento de vários modelos de caldeiras de circulação forçada, como os apresentados na Figura 3.17, após o ano de 1920. Tais modelos de caldeiras empregam uma bomba centrífuga para realizar a alimentação da água e sua circulação pelos tubos do equipamento (denominadas once through boiler) ou uma segunda bomba apenas para a circulação forçada.

Figura 3.17 | Caldeiras de circulação positiva forçada: Benson (a), Sulzer (b), Leoffer (c) e La-Mont (d)





Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 8-28).

As vantagens das caldeiras de circulação forçada incluem, conforme Pera (1990, p. 8-28), o seu leve peso estrutural, a ausência de efeitos relacionados ao escoamento, a difícil formação de incrustações internas, a geração de vapor prontamente ao uso, a utilização de tambores de pequeno diâmetro, a produção de vapores superaquecidos ou saturados de baixa umidade e a operação com elevada eficiência térmica. Uma grande desvantagem desse tipo de caldeira é a interrupção excessiva de operação devido à perturbação mínima, geralmente devido à variação na pressão de operação da bomba.

Visando solucionar a desvantagem presente nos modelos de circulação forçada, foram desenvolvidas, após a Segunda Guerra Mundial, as caldeiras de circulação positiva natural que não empregam bombas para a circulação da água, sendo seu movimento relacionado ao efeito Eckrohn-Kessel.



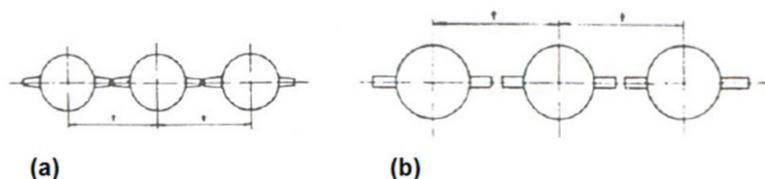
Assimile

O efeito Eckrohn-Kessel necessita de tubos afastados da fonte de calor para garantir a circulação do fluido sempre na mesma direção devido à diferença de peso específico entre o líquido a baixa temperatura e o vapor quente.

Entre 1950 e 1970 foram introduzidos no mercado os modelos de caldeiras aquatubulares com tubos aletados. O intuito de se utilizar aletas é aumentar a área de transferência de calor entre os gases quentes da combustão e a água líquida no interior dos tubos evaporadores, sendo as

aletas instaladas na parede de água da câmara de combustão, conforme apresentado na Figura 3.18.

Figura 3.18 | Parede de água com tubos aletados por pino de perfil parabólico (a) e retangular (b)



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 8-12).

No dimensionamento, é importante conhecer a diferença de temperatura originada da introdução das aletas, pois a diferença da temperatura no tubo causa dilatações térmicas distintas e, com isso, a formação de tensões de compressão na aleta e tração no tubo, extremamente indesejáveis para uma operação segura e para a vida útil do equipamento. Essa diferença de temperatura é dada pela expressão a seguir:

$$\Delta T = \frac{\left(q \frac{D_e}{D_i} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot P^{0,24}}$$

Em que D_e e D_i representam, respectivamente, os diâmetros externo e interno do tubo (m); q é a carga térmica da caldeira ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$); P representa a pressão de operação (kgf/cm^2); e ΔT é a diferença de temperatura entre a aleta e o tubo ($^{\circ}\text{C}$).



Exemplificando

Determine a temperatura na superfície externa de um tubo aletado com espessura 2 mm e diâmetro exterior de 7,6 cm para uma caldeira com carga térmica de $150000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ operando na pressão de 21 kgf/cm^2 .

Solução:

Na pressão de operação, o vapor encontra-se na temperatura de $216,23^{\circ}\text{C}$. Há um acréscimo de temperatura na parede externa devido à transferência de calor que pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\Delta T = \frac{\left(q \frac{D_e}{D_i} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot P^{0,24}}$$

Substituindo os valores, temos que o aumento de temperatura equivale a:

$$\Delta T = \frac{\left(150000 \frac{0,076}{0,072}\right)^{0,28}}{1,86 \cdot 21^{0,24}} = 7,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Portanto, a temperatura na superfície externa do tubo é:

$$T_{\text{int}} = 216,23 + 7,4 = 223,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nos cálculos, deve-se considerar, também, a diferença de temperatura devido à espessura do tubo, que depende, portanto, do material em que a caldeira é confeccionada. Para isso, utiliza-se a equação a seguir, em que k representa a condutividade térmica do material (kcal/m $^\circ\text{C}$).

$$\Delta T_{\text{esp.}} = \frac{q \cdot D_e}{2 \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)$$



Refleta

Temos que uma diferença de temperatura é encontrada em relação à espessura do tubo. Na superfície interna admitimos que a temperatura é igual à do vapor produzido e na superfície externa ela é determinada pelas equações apresentadas anteriormente. Como a condutividade térmica depende da temperatura na parede do tubo, qual a melhor temperatura para se estimar tal propriedade?

Sem medo de errar

Lembre-se de que neste momento você foi contratado por um grande escritório de engenharia e, como uma de suas funções, tem proposto soluções a respeito de projetos que envolvem os equipamentos geradores de vapor, conhecidos como caldeiras. Agora, você trabalha em um projeto que requer o dimensionamento de uma caldeira aquatubular para um importante cliente do escritório. Sua atribuição dentro da equipe de projetos é selecionar qual dos materiais disponíveis na Tabela 3.1 podem ser utilizados na confecção do feixe de tubos aletados da caldeira aquatubular.

Tabela 3.1 | Materiais disponíveis para confecção da caldeira e suas condutividades térmicas a 300 K

Material	Condutividade térmica (W/m · K)
Aço cromado	37,7
Aço AISI 302	15,1
Aço AISI 304	14,9

Material	Condutividade térmica (W/m·K)
Aço AISI 316	13,4
Aço AISI 347	14,2

Fonte: adaptada de Çengel, Ghajar e Kanoglu (2012, p. 869).

As condições de operação para esse dimensionamento incluem uma carga térmica de $1,8 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ e pressão máxima admissível de 25 kgf/cm^2 para geração de vapor. Além disso, o tubo empregado tem diâmetro interno de 7,6 cm e espessura de 3 mm.

Para especificar o material, é necessário levar em consideração duas variações de temperatura: a primeira decorre da presença da aleta como superfície de transferência de energia térmica (fator geométrico), a segunda ocorre devido à espessura do próprio material (perfil de temperatura).

A primeira variação de temperatura pode ser determinada a partir de um balanço de energia na aleta que compõe o tubo, sendo determinada pela equação a seguir.

$$\Delta T = \frac{\left(q \frac{D_e}{D_i} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot P^{0,24}}$$

Substituindo os valores fornecidos pela equipe de projeto, obtemos que existe uma variação de temperatura igual a:

$$\Delta T = \frac{\left(1,8 \times 10^5 \frac{0,079}{0,076} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot 25^{0,24}} = 7,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A segunda variação de temperatura que ocorre na aleta do tubo interno da caldeira depende do material no qual o tubo é produzido. Como nesta fase do projeto os materiais ainda não foram especificados, é preciso deixar a variação de temperatura em função desse parâmetro. A temperatura é determinada, portanto, pela seguinte expressão:

$$\Delta T_{\text{esp.}} = \frac{q \cdot D_e}{2 \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)$$

Substituindo os parâmetros conhecidos, segue que:

$$\Delta T_{\text{esp.}} = \frac{1,8 \times 10^5 \cdot 0,079}{2 \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{0,079}{0,076} \right) = \frac{275,26}{k}$$

Como a variação máxima permitida é de $10 \text{ } ^\circ\text{C}$, então determinamos qual deve ser a condutividade do material e o selecionamos a partir dos

materiais disponíveis na Tabela 3.1. Dessa forma, especificamos a condutividade térmica escrevendo que:

$$10 - 7,43 = \frac{275,26}{k}$$
$$k = 107,11 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

O valor da condutividade térmica obtido ($k = 107,11 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) é muito elevado e não há nenhum material disponível capaz de atender à condição de trabalho imposta.

Portanto, para encerrar essa etapa de sua análise, é seu dever informar ao engenheiro-chefe que as condições da caldeira são muito rigorosas para os tipos de materiais disponíveis. Pode ser necessário utilizar outro diâmetro de tubo ou um tubo com espessura diferente da especificada. Outro fator que pode ser alterado, que depende diretamente da necessidade do cliente, refere-se à carga térmica requisitada. Talvez seja preferível operar duas caldeiras menores ou empregar um combustível com carga térmica reduzida (com menor poder calorífico). Entretanto, essas discussões são de responsabilidade do engenheiro-chefe e do cliente, tendo o seu trabalho se encerrado neste momento.

Com a entrega desses cálculos, você encerra seu terceiro projeto atuando no escritório de engenharia. Os três projetos em que você atuou requisitaram seu conhecimento dos componentes dos geradores de vapor, desde a modificação de um queimador de caldeira, uma perícia técnica referente à explosão de uma caldeira flamatubular até esse projeto de dimensionamento de caldeira aquatubular. Todos os projetos foram concluídos adequadamente e, portanto, você merece os parabéns pelo trabalho!

Avançando na prática

Reaproveitamento de peças para melhoramento de cadeira

Descrição da situação-problema

Você trabalha como supervisor em uma caldeiraria e gostaria de reaproveitar alguns tubos de 4 cm de diâmetro interno e espessura 5 mm para utilizá-los como tubos trocadores de calor em uma caldeira cuja operação emprega carga térmica de $4,0 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$. Sabendo que o vapor é liberado a uma pressão de 21 kgf/cm^2 , verifique se é possível instalar aletas nos tubos mediante o uso de uma solda especial que suporta variação máxima de temperatura de 15°C .

Resolução da situação-problema

Para solucionar esse projeto, devemos determinar a variação de temperatura devido à presença de aletas. Se essa variação for superior à 15°C , então os tubos não poderão ser utilizados, pois a variação de temperatura seria prejudicial à integridade das soldas e causaria a falha térmica do equipamento devido à perda das aletas ou, então, dever-se-ia utilizar outro método que não o de soldagem para união das peças. A variação de temperatura decorrente do uso de aletas é determinada pela expressão a seguir:

$$\Delta T = \frac{\left(q \frac{D_e}{D_i} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot P^{0,24}}$$

Substituindo os dados fornecidos para o projeto, segue que:

$$\Delta T = \frac{\left(4,0 \times 10^5 \frac{0,045}{0,040} \right)^{0,28}}{1,86 \cdot 21^{0,24}} = 9,91^{\circ}\text{C}$$

Como a variação de temperatura devido ao uso de aletas é menor do que a variação suportada pela solda, isto é, $9,91^{\circ}\text{C} < 15^{\circ}\text{C}$, então conclui-se que é possível reaproveitar os tubos para a caldeira em questão. Bom trabalho!

Faça valer a pena

1. A água é encontrada em duas fases distintas no interior dos tubos de caldeiras aquatubulares: líquida e vapor. O escoamento concomitante de ambas as fases ocorre naturalmente nesses equipamentos devido à diferença do peso específico entre as fases líquida e vapor, sendo, portanto, dependente da pressão em que o vapor é gerado.

Assinale a alternativa que apresenta o número de vezes em que a fase líquida é mais densa do que a fase vapor em uma caldeira aquatubular operando com pressão de 50 bar.

- a) 23.
- b) 33.
- c) 43.
- d) 53.
- e) 63.

2. As caldeiras aquatubulares são aquelas nas quais os gases quentes da combustão percorrem o exterior de tubos cedendo calor para eles, que transferem, então, o calor à água que circula em seu interior, que é, portanto, evaporada. A respeito dos diversos tipos de caldeiras aquatubulares e suas características, julgue as afirmações a seguir.

- I. Ao final da Segunda Guerra Mundial foram desenvolvidos os modelos de caldeiras com circulação forçada mediante o uso de bombas de alimentação e de circulação,

- visando suprir a alta demanda por vapor das indústrias no pós-guerra.
- II. As caldeiras aquatubulares são classificadas em três grupos distintos apenas pelo formato dos tubos que compõem o equipamento e, também, pela quantidade de tubulões (tambores) presentes.
 - III. A introdução de aletas na superfície externa dos tubos tem o objetivo de melhorar a eficiência térmica da caldeira, no entanto, pelo fato de impedirem a circulação dos gases de combustão, a eficiência do equipamento acaba sendo prejudicada.

Assinale a alternativa que avalia corretamente as afirmativas.

- a) Nenhuma das afirmativas é verdadeira.
- b) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- c) Apenas a afirmativa III é verdadeira.
- d) Apenas as afirmativas I e II são verdadeiras.
- e) Apenas as afirmativas II e III são verdadeiras.

3. Sobre as propriedades das caldeiras aquatubulares, a quantidade de vapor gerada e os modelos desenvolvidos, julgue as afirmações a seguir:

- I. Uma caldeira com carga térmica de $4,0 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ é capaz de produzir vapor a uma pressão de 21 kgf/cm^2 . Sabendo que os tubos dessa caldeira têm diâmetro de 500 mm e 400 mm, é possível afirmar que a variação de temperatura nos tubos é de $0,5^\circ\text{C}$.
- II. Os modelos de caldeiras aquatubulares com circulação positiva forçada encontram a grande desvantagem de interrupção de operação devido às variações de pressão causadas pela própria bomba de circulação de água.
- III. As caldeiras de circulação forçada foram o último modelo de caldeira aquatubular desenvolvido e apresentam somente vantagens, como: leve peso estrutural, ausência de efeitos relacionados ao escoamento, difícil formação de incrustações internas, geração de vapor prontamente ao início de uso, uso de tambores de pequeno diâmetro, o fato de gerarem vapores superaquecidos ou saturados de baixa umidade e de operarem com elevada eficiência térmica.
- IV. As caldeiras aquatubulares são capazes de produzir grandes quantidades de vapor. Alguns modelos apresentam capacidades de geração de 600 - 750 ton/h de vapor a uma pressão de 150 - 200 kgf/cm^2 e temperatura de 450 - 500 $^\circ\text{C}$. Essas variações nas condições do vapor dependem unicamente do tipo de combustível empregado na combustão.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações verdadeiras.

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) I e III, apenas.
- d) II, III e IV, apenas.
- e) I, II, III e IV.

ALBERICHI, M. **Estudo das instalações e operações de caldeiras de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob ótica da NR-13 e NR-28**. 2013. 103f. Monografia (especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3818/1/CT_CEEEST_XXVI_2014_24.pdf. Acesso em: 5 fev. 2019.

BAUKAL JR., C. E. et al. **Industrial Burners Handbook**. 1. ed. Washington: CRC Press, 2003.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora nº 13, atualizada em 12 de dezembro de 2017 pela Portaria nº 1.084, de 28 de setembro de 2017**. NR 13 – Caldeiras, vasos de pressão e tubulação. Brasília, DF: Ministério do Trabalho, 2017. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-13-caldeiras-vasos-de-pressao-e-tubulacoes>. Acesso em: 5 fev. 2019.

CENTRAIS Elétricas Brasileiras. FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; KANOGLU, M. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Tradução de Fátima A. M. Lino. Revisão técnica de Kamal A. R. Ismail. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam – its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio: The Babcock & Wilcox Company, 2005.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Fama, 1990.

SOEIRO, E. C.; ANTONIOLLI, F. A. **Plano otimizado de inspeção de medição de espessura com base na matriz de risco das regiões internas de uma caldeira de recuperação – proposta**. 2005. 116f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. Disponível em: http://mecanica.ufes.br/sites/engenha0riamecanica.ufes.br/files/field/anexo/elder_e_fabio.pdf. Acesso em: 5 fev. 2019.

Unidade 4

Equipamentos, dispositivos de controle e segurança, distribuição de vapor

Convite ao estudo

Você, provavelmente, já sabe que as indústrias produzem uma grande quantidade de resíduos. Porém, não é muito conhecido que, às vezes, é preferível queimar os resíduos e aproveitar a energia liberada pela combustão na geração de vapor de recuperação ou de potência por meio de um gerador elétrico, pois, dessa forma, gera-se menos poluição com os produtos da combustão do que com o descarte dos resíduos propriamente dito. Independentemente do combustível queimado e da finalidade do vapor, é preciso controlar as variáveis do processo visando uma operação eficiente e segura. Na indústria, em particular, uma vez que o vapor foi produzido, deve-se distribuí-lo para os diversos setores da indústria no qual ele será utilizado e, para que isso também ocorra de forma segura e eficiente, é necessária a correta disposição de tubos, conexões e válvulas.

Nesta unidade, vamos empregar nossa curiosidade para entender como alguns resíduos de processo podem ser empregados na geração de vapor de recuperação, bem como entender as variáveis importantes de serem controladas durante esse processo de geração. Além disso, raciocinaremos criticamente sobre a distribuição do vapor ao longo dos equipamentos de processo da indústria para garantir o suprimento de vapor de qualidade, inclusive, para o caso da geração de eletricidade.

Para isso, imagine que você foi contratado para atuar em um grande escritório de engenharia, tendo sido alocado no departamento de projetos da empresa. Você atua, junto a outros profissionais, no desenvolvimento de projetos referentes à geração de vapor e sua distribuição para equipamentos industriais por meio de tubulações apropriadas. Neste momento, você fará parte, separadamente, de três projetos. O primeiro projeto envolve o dimensionamento da produção de vapor de uma caldeira de recuperação; o segundo objetiva propor um sistema automático de controle de alimentação em uma caldeira; e, por fim, o terceiro envolve otimizar o uso de vapor em uma linha de condensado. Mas, você sabe de que é uma caldeira de recuperação? Como atuam os sistemas de controle de caldeiras? O que é a linha de condensado e qual a sua finalidade? As respostas para essas perguntas o auxiliarão no desenvolvimento desses projetos.

O início desta unidade apresenta os conceitos de caldeiras para obtenção de vapor de recuperação e de geradores elétricos. Além disso, serão abordados componentes necessários à geração eficiente de vapor, como os superaquecedores, economizadores e pré-aquecedores de ar. Na sequência, a segunda seção trata dos principais sistemas de controle de uma caldeira, ou seja, do controle da temperatura, pressão de vapor, alimentação e combustão. Para finalizar a unidade, a terceira seção aborda a distribuição do vapor após sua geração, ou seja, estudaremos como captar e remover o condensado que é gerado na distribuição do vapor, eliminação de ar nas linhas de vapor, redução da pressão do vapor e de sua reevaporação. Além disso, veremos também questões de esforços mecânicos nas tubulações de distribuição de vapor e do seu isolamento térmico. Bom estudo!

Caldeiras de recuperação, superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar

Diálogo aberto

A geração de vapor por uma indústria requer o consumo de grande quantidade de energia. Para otimizar esse processo, é comum que as empresas utilizem a energia de correntes quentes do processo ou realizem a queima de resíduos, desde que os produtos da combustão sejam menos poluentes, visando à geração de vapor denominado de vapor de recuperação. Com isso, melhora-se a eficiência térmica da planta industrial e aumenta-se a lucratividade da empresa. Esse fenômeno está presente em empresas de diversos segmentos industriais, como nas indústrias produtoras de ácidos sulfúrico, em que a reação do enxofre com o oxigênio libera grande quantidade de calor, que é empregado na geração de vapor.

Para explorarmos esse conceito de geração de vapor de recuperação, imagine que uma indústria química produtora de ácido sulfúrico contratou a empresa na qual você trabalha para dimensionar uma caldeira. No processo químico, existe a possibilidade de reaproveitar o calor de correntes químicas (após a combustão do enxofre elementar, os 950 kg/h de gases quentes precisam resfriar de 950 °C para 300 °C antes de seguirem para a etapa de absorção úmida) por meio da caldeira de recuperação. Sua função neste projeto consiste em estimar a produção de vapor pela caldeira considerando a composição de gases quentes apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 | Composição de gases quentes para reaproveitamento de energia

Componente	Composição (%)	$C_p^{\text{médio}}/R$	Massa molar (g/mol)
SO ₂	10,7	4,796	64,065
O ₂	10,2	3,535	31,999
N ₂	79,1	3,502	28,014

Fonte: adaptada de Smith, Van Ness e Abbott (2007, p. 512).

As especificações do projeto fixam a água de alimentação a 102 °C ($H = 427,5 \text{ kJ/kg}$) e pressão de vapor produzido à 20 kgf/cm^2 ($H = 2796,7 \text{ kJ/kg}$). Se necessário, utilize a constante universal dos gases como $8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.

Qual é o princípio de funcionamento de uma caldeira de recuperação? Quais equações podem ser utilizadas nesse projeto? As respostas desses questionamentos podem ajudá-lo a estimar a quantidade de vapor produzida.

Dedique-se durante o estudo dos conceitos desta seção, pois, além de ajudá-lo na solução desse projeto, eles serão úteis na sua vida profissional, visto que várias empresas empregam caldeiras de recuperação e/ou geradores elétricos em sua planta, nos quais são acoplados superaquecedores, economizadores e pré-aquecedores de ar, visando otimizar a eficiência térmica da caldeira e maximizar a rentabilidade do processo industrial no qual o equipamento é empregado.

Não pode faltar

A caldeira de recuperação (do inglês *Waste-Heat Boiler*) é um conceito de caldeira desenvolvido especificamente para reaproveitar o calor excedente gerado em processos industriais que liberam calor para a vizinhança. Por isso, são caldeiras muito empregadas na indústria de papel e celulose, de produtos químicos de base (produção de ácido sulfúrico, por exemplo) e em processos de incineração de resíduos (industriais ou urbanos). Elas são classificadas de acordo com o processo que apresenta o calor disponível para reaproveitamento. Os grupos classificatórios, portanto, são: recuperação de calor sensível, recuperação de gases combustíveis residuais, recuperação de calor e de produtos químicos em fábricas de celulose, recuperação de calor em ciclos combinados e aproveitamento do lixo urbano.

As caldeiras de recuperação de calor sensível, como o próprio nome indica, tem a finalidade de reaproveitar o calor sensível presente em uma corrente quente de um determinado processo químico. Comumente, tais caldeiras são empregadas em aplicações marítimas e na indústria de produção de ácido sulfúrico, pois nesta a combustão do enxofre elementar produz uma corrente quente, cuja energia térmica pode ser transferida para a geração de vapor em uma caldeira de recuperação. A quantidade de calor (Q_r) recuperado a partir de uma determinada vazão mássica (\dot{m}) de gases oriunda desse processo de combustão é determinada pela expressão a seguir.

$$\dot{Q}_r = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)$$

Em que T_e e T_s representam a temperatura de entrada e saída dos gases, respectivamente, e c_p representa sua capacidade calorífica à pressão constante.



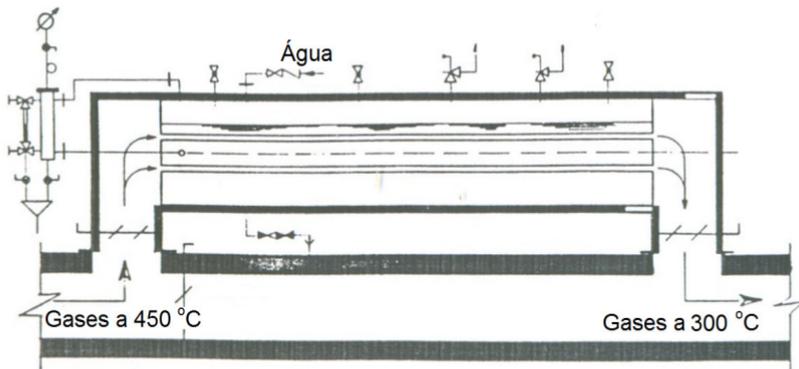
Refleta

Na expressão $\dot{Q}_r = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)$, note que o aproveitamento da energia térmica disponível na corrente química depende da temperatura final dos gases. Com isso em mente, é possível reaproveitar, ao menos em teoria, todo o calor sensível de uma corrente química? Em termos econômicos, esse reaproveitamento seria viável?

As caldeiras de recuperação de calor sensível devem ser projetadas a fim de que os gases de saída apresentem a menor temperatura possível e, para isso, projeta-se o equipamento de forma que os fluidos circulem o equipamento em contracorrente e com a menor resistência ao escoamento possível. Com isso, e devido à pressão de operação da caldeira, garante-se que os gases de saída apresentem, aproximadamente, de 70 °C a 80 °C acima da temperatura de ebulição da água. Sob o ponto de vista da inspeção e da manutenção desses equipamentos, o acesso ao seu interior deve ser fácil e rápido. Sempre que possível, confecciona-se o equipamento de forma a permitir a eliminação de partículas dos gases de combustão.

Modernamente, as caldeiras recuperam calor de gases processuais que se encontram a temperaturas relativamente inferiores à temperatura dos gases de combustão de caldeiras convencionais. Por esse fator, e devido à necessidade de se garantir uma eficiente troca térmica pelo equipamento, foram desenvolvidos um modelo de caldeira de recuperação flamatubular (horizontal ou vertical) e outro aquatubular, para serem sempre inseridos na linha de transporte dos gases quentes. Um exemplo de caldeira de recuperação e seu princípio de funcionamento é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 | Exemplo de caldeira de recuperação de calor sensível e seu funcionamento



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 11-2).

Os modelos flamatu­bulares são capazes de recuperar vapor na pressão de 12 kgf/cm² com vazão de até 4 ton/h e operando com temperaturas entre 450 °C e 300 °C. Já os modelos aquatu­bulares, maiores, produzem de 10 ton/h a 30 ton/h de vapor entre 350 °C e 40 °C. Ambas as caldeiras são inseridas no sistema de circulação de gases do processo industrial desejado e possuem um superaquecedor e economizador acoplados, além de um coletor de cinzas.

As caldeiras de recuperação apresentam a mesma eficiência térmica, apenas constata-se diferença decorrente de concepções de projeto. No entanto, é preferível empregar as caldeiras flamatu­bulares devido ao menor uso de refratários, por permitir hermeticidade perfeita e, também, pelas perdas devido ao calor irradiado serem menores do que nas aquatu­bulares. Além disso, o custo das caldeiras flamatu­bulares é menor. O modelo aquatu­bular é utilizado somente para pressões acima de 18 kgf/cm².

A quantidade de vapor recuperado por uma caldeira de recuperação pode ser determinada pela equação a seguir, em que h_v e h_l representam, respectivamente, a entalpia do vapor e do líquido na pressão de operação da caldeira, e V_r é a vazão de vapor recuperado (em kg/h).

$$V_r = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)}{h_v - h_l}$$



Exemplificando

Determine a pressão de operação de uma caldeira que recupera, aproximadamente, 8000 MJ/h na produção de 3,5 ton/h de vapor utilizando água de alimentação com entalpia de 1087,4 kJ/kg. Se necessário, utilize os dados da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 | Dados de vapor superaquecido na temperatura de 475 °C

Pressão (kPa)	5000	5100	5200	5300	5400
h_v (kJ/kg)	3375,8	3374,5	3373,3	3372,0	3370,8

Fonte: adaptada de Smith, Van Ness e Abbott (2011, p. 569).

Solução:

A produção de vapor recuperado é determinada pela expressão:

$$V_r = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)}{h_v - h_l}$$

Em que o lado esquerdo equivale a 3,5 ton/h , e o numerador do lado direito é igual a 8 MJ/h . Com isso, determinamos que a entalpia do vapor produzido é:

$$3500 \text{ kg/h} = \frac{8 \times 10^6 \text{ kJ/h}}{h_v - (1087,4 \text{ kJ/kg})}$$

$$h_v = 3373,11 \text{ kJ/kg}$$

A entalpia do vapor recuperado consiste em uma condição aproximada de superaquecimento a 475 °C e 5200 kPa. Portanto, a pressão de operação da caldeira é de 5200 kPa.

As caldeiras de recuperação de gases combustíveis residuais diferem do grupo anterior, pois a fonte energética consiste na queima de um resíduo previamente gerado pela indústria, cujos gases quentes da combustão podem ser empregados na recuperação de vapor. Esse tipo de caldeira é utilizado com frequência na indústria petroquímica, pois o processo de craqueamento catalítico de frações do petróleo produz grandes quantidades de gases quentes e, também, na indústria do ferro gusa. Em ambas as aplicações, os gases (majoritariamente CO) podem ser oxidados a CO₂ por meio de uma reação exotérmica conduzida entre 785 °C e 980 °C.

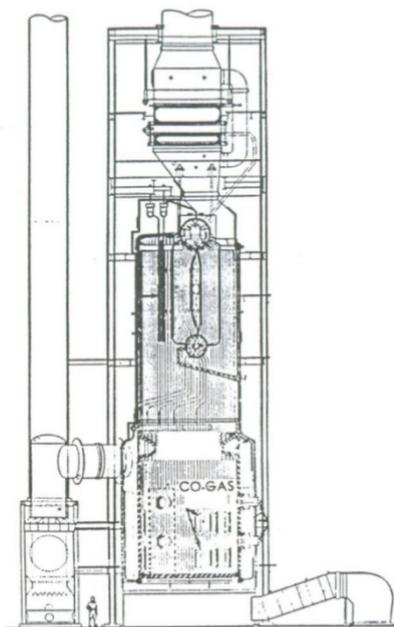


Assimile

A temperatura elevada exigida para queima do CO requer iniciar a operação da caldeira com óleo combustível. Atingidas as condições de estabilidade de chama, introduz-se de 65% a 75% de CO para economia de combustível e recuperação de vapor.

Um exemplo deste tipo de caldeira empregado na indústria petroquímica é apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 | Modelo de caldeira de recuperação de vapor para queima de gás de refinaria



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 11-14).



Refleta

Na indústria do ferro gusa, por exemplo, existem muitas impurezas e umidade nos minérios utilizados nos altos fornos. Como a presença de impurezas e umidade pode influenciar na recuperação de vapor?

A queima de resíduos químicos requer, necessariamente, a presença de um sistema de remoção de fuligem e/ou de partículas nas caldeiras de recuperação de gases combustíveis residuais. É exigido por lei que as indústrias de papel e celulose realizem a recuperação de alguns produtos químicos ao invés de descartá-los, por serem extremamente poluentes. Com essa recuperação, a indústria é capaz de gerar vapor, energia elétrica e, também, compostos químicos utilizados pelo próprio processo Kraft de fabricação de papel e celulose.



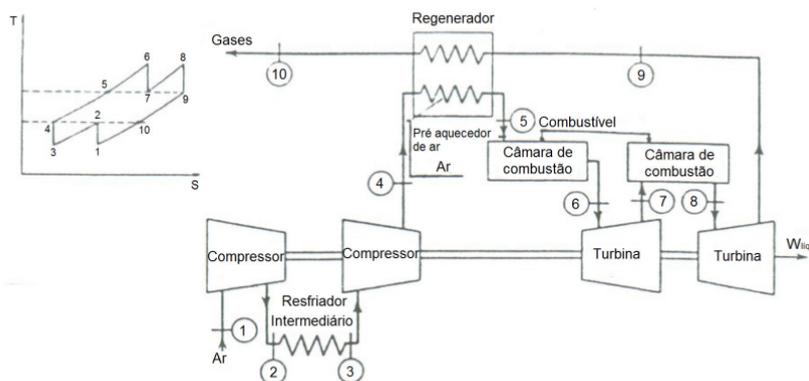
Pesquise mais

Para conhecer as particularidades das caldeiras de recuperação empregadas nas indústrias produtoras de papel e celulose (também denominadas de caldeiras de recuperação de químicos), leia as páginas 3 a 8 da obra indicada a seguir:

FERREIRA, D. J. O. **Modelagem de caldeira de recuperação química Kraft**. 2013, 238f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26072013-122445/publico/Tese_FerreiraDJO_unprotected.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

As caldeiras de ciclos binários são aquelas que utilizam o calor sensível recuperado de uma turbina a gás para movimentar uma turbina a vapor, conforme apresentado na Figura 4.3. Note que a recuperação do calor sensível das turbinas não exclui a necessidade da queima de um combustível, gás ou óleo, para a geração de vapor.

Figura 4.3 | Ciclo ideal de uma caldeira de recuperação binária com seu diagrama T-S



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 11-28).

As caldeiras de ciclo binário são capazes de fornecer vapor sob pressão de 110 kgf/cm² com temperatura de 540 °C e vazões de até 270 ton/h. Esse modelo de caldeira apresenta a maior eficiência térmica dentre os modelos de caldeiras de recuperação, pois possui no seu ciclo, ainda, reaquecimento e ressuperaquecimento de vapor, além de empregar um economizador com elevada superfície para troca térmica.



Pesquise mais

A incineração de resíduos para recuperação de vapor e/ou geração elétrica é empregada há anos em diversos países, porém existe grande preocupação e discussão acerca do potencial poluidor de tais empreendimentos. Conheça mais sobre esse processo de recuperação lendo as páginas 24 a 26 da obra indicada a seguir:

CHIRICO, V. D. **Incineração de resíduos urbanos**. Tradução Paula Mantovani e Gandolla Mauro. 2013. Disponível em: http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/txt_349995799.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

As caldeiras que operam com incineração de resíduos urbanos são menos indicadas para a geração de vapor de recuperação (13 ton/h a 20 kgf/cm^2), pois a natureza diversificada dos resíduos torna sua queima oscilante, gerando vapor de maneira instável (o PCI varia fortemente entre 800 kcal/kg até 3500 kcal/kg).

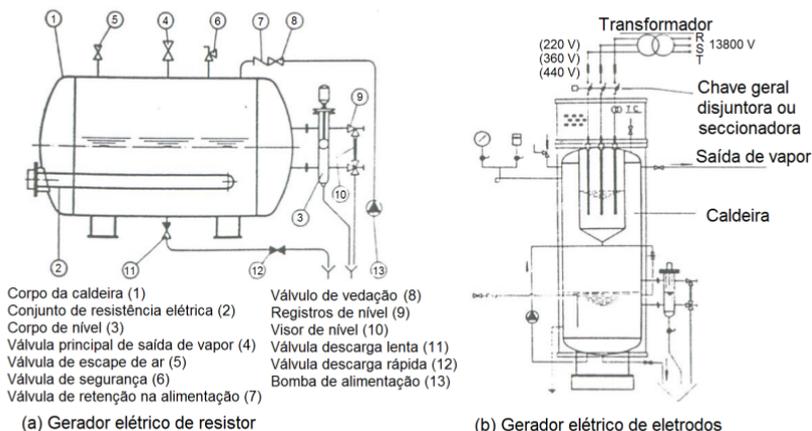


Assimile

Normalmente, os resíduos urbanos passam por uma etapa de reciclagem antes de serem incinerados. Com isso, há um melhor reaproveitamento dos resíduos e melhora-se a qualidade e composição do resíduo encaminhado como combustível e, dessa forma, a operação de combustão é facilitada.

A produção de vapor a partir da energia elétrica é conhecida desde meados de 1900, porém essa prática é, atualmente, restrita no ambiente industrial, devido, em grande parte, ao elevado custo da energia elétrica frente aos combustíveis industriais clássicos. Os equipamentos que convertem a eletricidade em energia térmica para geração de vapor são denominados de geradores elétricos e podem ser confeccionados em dois tipos diferentes, conforme apresentado na Figura 4.4, isto é, geradores com resistores, de pequena capacidade de vapor (150 kW equivalente a 200 kg/h de vapor), ou com eletrodos, de maior capacidade (2000 kW).

Figura 4.4 | Geradores elétricos com resistores (a) e com eletrodos (b)



Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 12-4 e 12-7).

Ambos os tipos de caldeiras operam graças ao efeito Joule, isto é, durante o transporte da energia elétrica entre os polos do equipamento, parte da eletricidade é transformada em calor para aquecimento da água e para sua vaporização. Esse princípio de operação torna os geradores elétricos muito mais simples do que qualquer modelo de caldeira de combustão.



Assimile

No Brasil, cuja matriz elétrica é majoritariamente proveniente de hidrelétricas, o regime sazonal de chuvas não torna atrativo o uso de geradores elétricos no âmbito industrial. Porém, a disponibilidade nacional da hidroeletricidade é uma vantagem no uso desses equipamentos.

A quantidade de vapor produzida pelas caldeiras elétricas (V , em kg) pode ser determinada em função da potência elétrica P (em kWh), conforme a seguinte expressão:

$$V = \frac{P \cdot 860 \cdot \eta}{h_v - h_l}$$

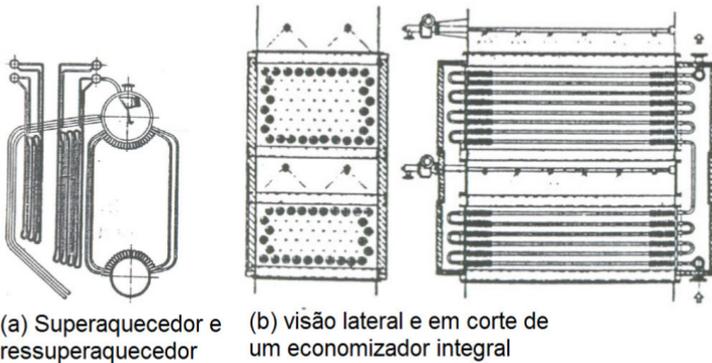
Em que η é o rendimento da caldeira, e as entalpias do vapor e líquido são dadas em kcal/kg. O rendimento é determinado pela expressão a seguir, em que f representa um percentual da perda de potência total devido à irradiação e às perdas na bomba de circulação de água, geralmente considerada como sendo 1%.

$$\eta = \frac{(1-f) \cdot (h_v - h_a)}{(h_v - h_a) + x \cdot (h_l - h_a)}$$

Em que h_a é a entalpia da água líquida na condição de alimentação, e x é a purga específica.

O vapor, ao ser formado no tambor das caldeiras, encontra-se saturado devido ao equilíbrio com a água líquida. Somente é possível aquecer ainda mais o vapor, mantendo a pressão constante, utilizando um superaquecedor ou ressuperaquecedor, conforme apresentado na Figura 4.5a.

Figura 4.5 | Exemplo de superaquecedor e ressuperaquecedor em uma mesma caldeira



(a) Superaquecedor e ressuperaquecedor

(b) visão lateral e em corte de um economizador integral

Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 13-2).

O superaquecedor e o ressuperaquecedor são constituídos por tubos trocadores de calor (32 a 51 mm de diâmetro) e são instalados no circuito de vapor do sistema de geração de vapor e/ou potência de tal forma que os gases quentes da fornalha percorram seu exterior. No entanto, o ressuperaquecedor somente é empregado em sistemas com ressuperaquecimento, sendo alimentado, portanto, com vapor úmido após ter percorrido uma turbina ou um estágio da turbina.

No interior desses componentes, o vapor escoava com velocidade entre 30 m/s a 50 m/s, dependendo da temperatura de operação (que é definida conforme o processo em questão). O atrito do escoamento e, também, da saída do tambor e entrada do superaquecedor gera perdas de carga da ordem de 3% a 5%, sendo, por isso, necessário dimensionar a caldeira para uma pressão ligeiramente superior à de operação do superaquecimento.

Um aumento de 3% ou 4% na geração de vapor pode ser atingido mediante a instalação de um economizador na caldeira. Esse componente tem a finalidade de aquecer a água, que é alimentada na caldeira, diminuindo a diferença de temperatura para sua evaporação. Uma melhora da eficiência

térmica é alcançada porque o aquecimento da água é realizado com a energia residual dos gases de combustão. Além disso, a alimentação de água quente é preferida (uma vez que a água fria (25 °C) ocasiona diminuição indesejada da pressão na caldeira), pois proporciona maior estabilidade na operação do equipamento. Os economizadores, conforme apresentado na Figura 4.5b, são constituídos por tubos com superfícies aletadas, em cujo interior circula a água de alimentação da caldeira. Vale ressaltar que a água precisa ser tratada para uso no economizador, de tal forma a eliminar gases dissolvidos, como o oxigênio e o gás carbônico.

Analogamente aos economizadores, os pré-aquecedores são instalados previamente à fornalha, com a finalidade de aquecer o ar que participará da reação de combustão. Com isso, melhora-se a eficiência do processo de queima do combustível e da geração de vapor como um todo.



Pesquise mais

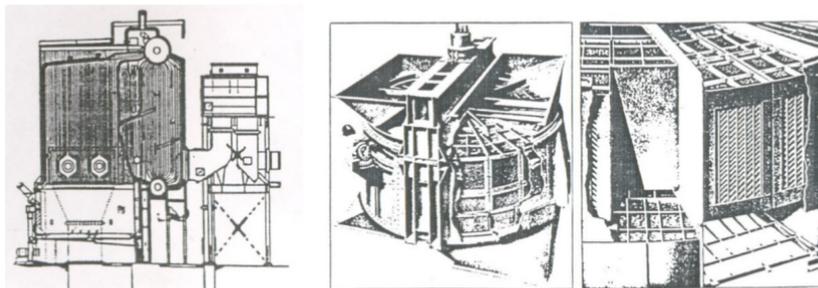
Conheça um pouco mais sobre a finalidade do economizador e do pré-aquecedor de ar lendo as páginas 18 a 20 da obra indicada a seguir:

KIESOW, R. M. **Desenvolvimento de um sistema para pré-aquecimento de água de alimentação de uma caldeira fumotubular**. 2015, 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/2159/TCC%20Renato%20Muller%20Kiesow.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 nov. 2018.

O aquecimento do ar de combustão utiliza a energia térmica contida nos gases emitidos pela chaminé da caldeira. Com isso, diminui-se a temperatura dos gases de exaustão e aumenta-se a eficiência térmica do equipamento. Como regra geral, pode-se considerar um incremento de 1% na eficiência para cada 20 °C de diminuição na temperatura dos gases. Além disso, o consumo de combustível pela fornalha é reduzido por necessitar menor energia para o aquecimento do ar.

A Figura 4.6 apresenta um modelo de pré-aquecedor de ar do tipo regenerativo. Neste modelo, os gases de combustão e o ar trocam calor sob uma mesma superfície do equipamento mantido sob rotação de 2 rpm a 3 rpm. Segundo Pera (1990), a seleção do pré-aquecedor depende do espaço disponível para o equipamento, seu consumo energético, o custo necessário para instalação e para aquisição do componente, e as despesas necessárias com a manutenção.

Figura 4.6 | Exemplo de caldeira com pré-aquecedor regenerativo e visão do seu compartimento



(a) Caldeira com aquecedor regenerativo (b) Pré-aquecedor regenerativo e visão do seu comportamento

Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 15-3 e 15-4).

Sem medo de errar

Neste momento, a empresa na qual você trabalha foi contratada para dimensionar uma caldeira de recuperação em uma indústria química. Você ficou responsável por determinar a quantidade de vapor possível de ser gerado por meio da recuperação da energia térmica proveniente da combustão do enxofre elementar, visto que os 950 kg/h de gases quentes gerados nessa etapa precisam resfriar de 950 °C para 300 °C antes de seguirem para a etapa de absorção úmida. Você deve considerar a composição de gases quentes apresentadas na Tabela 4.1, no início da seção, a qual está replicada a seguir.

Tabela 4.1 | Composição de gases quentes para reaproveitamento de energia

Componente	Composição (%)	$C_p^{\text{médio}}/R$	Massa molar (g/mol)
SO ₂	10,7	4,793	64,065
O ₂	10,2	3,535	31,999
N ₂	79,1	3,502	28,014

Fonte: adaptada de Smith, Van Ness e Abbott (2007, p. 512).

As especificações do projeto fixam a água de alimentação a 102 °C ($H = 427,5 \text{ kJ/kg}$) e a pressão de vapor produzido à 20 kgf/cm² ($H = 2796,7 \text{ kJ/kg}$).

A quantidade de vapor recuperado pode ser determinada pela expressão a seguir.

$$V_r = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_e - T_s)}{h_v - h_l}$$

Note que basta determinarmos o valor da capacidade calorífica na pressão de 20 kgf/cm² (pois esta é a pressão de operação da caldeira) que a solução do projeto se torna direta por meio da substituição dos valores especificados em projeto na expressão apresentada. Isso pode ser realizado de duas maneiras:

- Utilizar o valor de $C_p^{\text{médio}}$ de cada substância a fim de determinar a quantidade de vapor gerada por cada componente da mistura gasosa e, ao final, somar o total de vapor produzido.
- Determinar um valor médio da capacidade calorífica para a mistura de gases por meio de uma média ponderada das capacidades caloríficas médias de cada substância.

Ambos os métodos são corretos, porém, devido à simplicidade matemática, apresentaremos o método descrito em (b). Dessa forma, o valor da capacidade calorífica para a mistura de gases é determinado por meio de uma média ponderada, conforme a composição da corrente gasosa, isto é:

$$\frac{\langle C_p^{\text{médio}} \rangle_{\text{mistura}}}{R} = \frac{0,107 \left\langle \frac{C_p^{\text{médio}}}{R} \right\rangle_{\text{SO}_2} + 0,102 \left\langle \frac{C_p^{\text{médio}}}{R} \right\rangle_{\text{O}_2} + 0,791 \left\langle \frac{C_p^{\text{médio}}}{R} \right\rangle_{\text{N}_2}}{0,107 + 0,102 + 0,791}$$

Substituindo os valores e utilizando a constante universal dos gases igual a 8,314 J/mol·K, obtemos:

$$\frac{\langle C_p^{\text{médio}} \rangle_{\text{mistura}}}{8,314} = \frac{0,107 \cdot 4,796 + 0,102 \cdot 3,535 + 0,791 \cdot 3,502}{0,107 + 0,102 + 0,791}$$

$$\langle C_p^{\text{médio}} \rangle_{\text{mistura}} = 30,295 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Antes de substituir o valor médio calculado para a capacidade calorífica da mistura na expressão que determina a quantidade de vapor a ser produzida, precisamos converter a unidade molar para unidade mássica. Assim, determinamos, analogamente, uma massa molar média para a corrente de gases.

$$\text{MM}_{\text{média}} = \frac{0,107 \cdot 64,065 + 0,102 \cdot 31,999 + 0,791 \cdot 28,014}{0,107 + 0,102 + 0,791} = 32,278 \text{ g/mol}$$

Agora, temos condições de substituir os valores obtidos e as especificações

de projeto na expressão que determina a quantidade de vapor a ser produzida. Dessa forma, segue que:

$$V_r = \frac{\left(9,5 \cdot 10^5 \frac{\text{g}}{\text{h}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ mol}}{32,278 \text{ g}}\right) \cdot \left(30,295 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right) \cdot (950 - 300) \text{K}}{(2796,7 - 427,5) \frac{\text{J}}{\text{g}}} = 244,6 \text{ kg/h}$$

Logo, a caldeira é capaz de recuperar pouco mais de 244 kg de vapor por hora de operação. Vale lembrar que a energia utilizada nessa recuperação seria perdida, pois a etapa seguinte do processo de síntese do ácido sulfúrico (absorção úmida) é uma etapa que ocorre a baixas temperaturas. Então, o emprego da recuperação de vapor é vantajoso ao processo de síntese do ácido sulfúrico.

Com este projeto, nota-se que o emprego de uma caldeira de recuperação é capaz de transformar a energia sensível contida em uma corrente de processo em energia térmica útil para outros processos da indústria, neste caso, gerando vapor, que evita, dessa forma, a perda de eficiência térmica da planta de processo da indústria química. Bom trabalho!

Avançando na prática

Operação de um gerador elétrico

Descrição da situação-problema

Você trabalha em um pequeno galpão industrial que produz alguns tipos de queijos e derivados do leite. Sua função é operar um gerador elétrico de 150 kW, a fim de fornecer vapor para esterilização de equipamentos e superfícies. No entanto, a bomba de alimentação de água do equipamento queimou e você deseja repor a água de alimentação manualmente até que a equipe de manutenção disponibilize uma bomba nova, pois você não deseja que a empresa arque com os custos de manter o processo parado, gerando, também, perda de lotes de produtos alimentícios. Portanto, é preciso que você determine a taxa de reposição manual de água no gerador.

Resolução da situação-problema

A quantidade mássica total de vapor produzida por um gerador elétrico é determinada por:

$$V = \frac{P \cdot 860 \cdot \eta}{h_v - h_l}$$

Substituindo os valores fornecidos na problematização, segue que:

$$V = \frac{150 \cdot 860 \cdot 0,99}{668,43 - 102,17} = 225,53 \text{ kg}$$

Como o gerador opera durante 24 h ininterruptamente, a quantidade de água adicionada deve ser de:

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{225,53 \text{ kg}}{24 \text{ h}} = 9,4 \text{ kg/h}$$

Portanto, a adição de 9,4 kg de água líquida a cada hora de operação do gerador garante seu funcionamento sem a necessidade da bomba de alimentação. Com isso, é possível evitar os custos de manter o processo parado até que a nova bomba seja entregue.

Faça valer a pena

1. A caldeira de recuperação é um modelo de gerador de vapor desenvolvido, a fim de otimizar a eficiência energética de uma indústria por meio do aproveitamento de calor sensível residual de algumas correntes de processo para a geração de vapor. A respeito das caldeiras de recuperação, julgue as afirmativas a seguir.

- I. São classificadas em: recuperação de calor sensível, recuperação de gases combustíveis residuais, recuperação de calor e de produtos químicos, recuperação de calor em ciclos combinados e aproveitamento do lixo urbano.
- II. O modelo de caldeira para recuperação sensível é projetado de modo a captar a energia térmica disponível em uma corrente de processo química, transferindo-a para outra corrente de processo e, assim, evitando a perda dessa parcela energética.
- III. Uma variação térmica de 10 °C em uma corrente de processo com capacidade calorífica de 2,5 J/g·°C e vazão de 2,0 kg/s apresenta potencial de recuperação de 50 kg/s de vapor.
- IV. As caldeiras de recuperação do tipo aquatubular são capazes de gerar vapor em condições mais rigorosas de T e P quando comparadas com o tipo flamatubular, no entanto produzem vazões menores.

Assinale a alternativa que apresenta o julgamento correto das afirmativas apresentadas no texto-base. É(são) correta(s) a(s) afirmativa(s):

- a) I, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) II e IV, apenas.
- d) I, II e III, apenas.
- e) I, II, III e IV.

2. A fonte energética para geração de vapor é utilizada na classificação das caldeiras. A caldeira de recuperação, por exemplo, é aquela que emprega a energia térmica presente em uma corrente de processo para a geração de vapor, já um gerador elétrico utiliza a eletricidade para essa finalidade. Sobre as diversas características das caldeiras de recuperação e dos geradores elétricos, julgue as afirmativas apresentadas a seguir.

I. As caldeiras de recuperação de calor sensível recebem esse nome porque utilizam a energia sensível presente na água quente, que se forma após a condensação do vapor em uma turbina.

II. A incineração de resíduos urbanos, indiscriminadamente, se apresenta como uma ótima prática, pois, além de diminuir a quantidade de resíduos urbanos e da necessidade de aterros, a energia liberada na combustão desse resíduo pode ser empregada na geração de vapor por uma caldeira apropriada.

III. A produção de 3 ton/h de vapor por uma caldeira que recupera 7,0 MJ/h necessita ser alimentado por água de entalpia $h_1 = 1042,47 \text{ kJ/kg}$, produzindo vapor com entalpia de $h_v = 3375,8 \text{ kJ/kg}$.

IV. Os geradores elétricos são divididos em dois grupos: geradores elétricos de eletrodos com potências de até 2000 kW e geradores elétricos de resistores cuja potência atinge somente 150 kW.

V. O princípio de funcionamento dos geradores elétricos de resistores é o efeito Joule, já o dos eletrodos fundamenta-se no efeito Coulomb.

Assinale a alternativa que apresenta o julgamento correto das afirmativas apresentadas no texto-base. É(são) correta(s) a(s) afirmativa(s).

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) III e IV, apenas.
- e) I, IV e V, apenas.

3. Em uma caldeira, é comum ser instalado um economizador, um superaquecedor e um pré-aquecedor de ar, a fim de aumentar o rendimento da caldeira e a quantidade de vapor produzida. A respeito desses componentes, julgue as afirmativas a seguir.

I. O rendimento de uma caldeira elétrica que opera idealmente, isto é, não perde calor por irradiação e nem por efeitos na bomba de alimentação, pode ser determinado em termos das entalpias do líquido (na condição de alimentação e de operação), da entalpia do vapor e da quantidade de líquido purgado especificamente.

II. O economizador é um componente instalado no circuito de alimentação de água de uma caldeira para utilizar parte da energia térmica dos gases residuais da combustão para aquecer a água de alimentação e, assim, aumentar em 3 ou 4% a quantidade de vapor gerado.

III. O superaquecedor é responsável por aquecer o vapor saturado a uma temperatura superior ao seu estado de saturação. Devido ao escoamento do vapor no interior dos seus tubos, a supersaturação sempre ocorrerá em pressão menor do que à de projeto, dada as perdas de carga no escoamento.

IV. O pré-aquecimento do ar de combustão de uma caldeira não se justifica, pois somente é possível incrementar 1% no rendimento do processo, independentemente da temperatura dos gases da chaminé.

Assinale a alternativa que apresenta o julgamento correto das afirmativas apresentadas no texto-base. É(são) correta(s) a(s) afirmativa(s).

a) I, apenas.

b) I e II, apenas.

c) II e III, apenas.

d) I, III e IV, apenas.

e) II, III e IV, apenas.

Dispositivos de controle e segurança

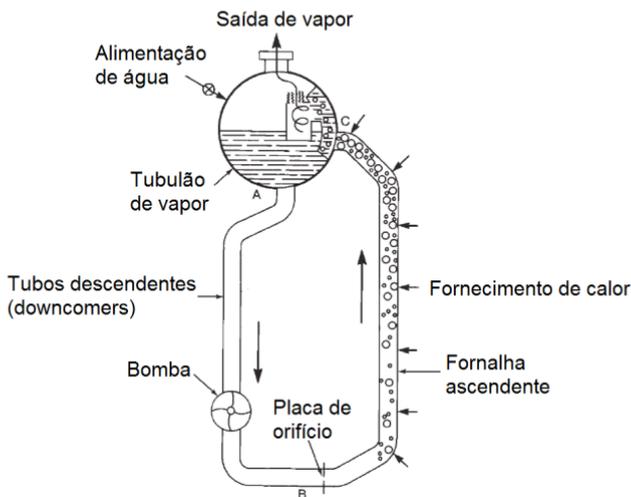
Diálogo aberto

Na seção anterior, vimos dois tipos especiais de geradores de vapor: a caldeira de recuperação e os geradores elétricos. Além disso, aprendemos como melhorar o processo de geração de vapor por meio do uso de superaquecedores, economizadores e pré-aquecedores de ar. Agora, voltaremos nossa atenção para os sistemas de controle necessários à geração de vapor.

Você, provavelmente, já viu uma panela de pressão cozinhando um alimento. No topo da tampa, existe uma pequena válvula de metal responsável por regular a pressão de cozimento na panela, caso contrário, haveria aumento excessivo da pressão e, conseqüentemente, risco de explosão. O mesmo princípio de controle e segurança é utilizado nas caldeiras, no entanto, devido às condições muito mais rigorosas de processo, tais equipamentos apresentam um sistema de controle robusto, geralmente automático, das variáveis de processo, como temperatura e pressão.

Para contextualizar esses assuntos, lembre-se de que você foi contratado por um grande escritório de engenharia, tendo sido alocado no departamento responsável pelos projetos de geração de vapor e sua distribuição para os equipamentos industriais. Neste momento, uma empresa de pequeno porte contratou o escritório de engenharia no qual você trabalha para projetar uma caldeira aquatubular. O projeto desse equipamento deve seguir critérios técnicos de engenharia para garantir uma operação eficiente e, principalmente, segura da caldeira. Esse é um projeto trabalhoso que demanda a participação de muitos engenheiros. Neste caso, após a distribuição das tarefas pelo engenheiro-chefe, você ficou encarregado de propor o sistema de controle de alimentação de água da caldeira aquatubular, que está apresentado na Figura 4.7

Figura 4.7 | Esquema da caldeira que necessita de um sistema de controle de alimentação de água



Fonte: Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

Quais elementos podem ser utilizados nos sistemas de controle de caldeiras? Quais variáveis precisam ser medidas e quais devem ser controladas?

Responder a essas questões o ajudará na solução deste projeto e, para resolvê-lo, você deve se empenhar nos estudos dos sistemas de controle de temperatura e pressão das caldeiras, bem como dos sistemas automáticos de controle de alimentação de água e combustível, pois são assuntos importantes para a sua formação. Então, bom estudo!

Não pode faltar

Todo e qualquer projeto de dimensionamento de uma caldeira deve especificar alguns parâmetros de segurança que levem em consideração as variações nas condições de operação ao longo da vida útil do equipamento. Por exemplo, uma caldeira precisa ter uma pressão máxima de operação menor do que a sua resistência estrutural suporta, devido à espessura de seus tubos. Contudo, essa pressão máxima deve considerar uma possível perda de espessura dos tubos e, conseqüentemente, diminuição da resistência ao longo do tempo de operação, devido à corrosão, por exemplo.



Assimile

As caldeiras, por causa do constante risco de acidentes, devem estar sempre sob inspeção e monitoramento, sendo adotadas estratégias de manutenção, correção e prevenção, conforme necessário.

Algumas formas de acidente podem ocorrer com a operação de caldeiras quando as medidas de controle e/ou de segurança, por ventura, falharem. A explosão é o tipo de acidente mais conhecido, devido à catástrofe ocasionada, porém choques elétrico, intoxicação por gases e incêndios também são exemplos de acidentes que ocorrem em uma caldeira. Quanto à explosão, suas principais causas são o aumento de pressão acima do máximo admitido pelo equipamento, elevação excessiva e localizada de temperatura (superaquecimento excessivo), modificações no equipamento, como o abaulamento de tubos devido à variação térmica, corrosão, incrustação e a ignição de material inflamável residual.

Os tubos confeccionados conforme a ASTM 178 / NBR 5595 são utilizados em caldeiras e devem, obrigatoriamente, ser testados antes de instalados. O teste requer que o tubo suporte, por cinco segundos, uma pressão (P, em psi) definida pela expressão a seguir.

$$P = 3,2 \times 10^4 \frac{e}{D_{\text{ext}}}$$

Em que e é a espessura do tubo (entre 0,70 e 14 mm) e D_{ext} representa o diâmetro externo do tubo (entre 12,7 e 127 mm).



Exemplificando

Determine a pressão de teste para que um tubo em aço-carbono ASTM 178 / NBR 5595 de 7 mm de espessura e 60 mm de diâmetro interno possa ser utilizado com segurança em uma caldeira.

Solução:

O diâmetro externo do tubo é $D_{\text{ext}} = 60 \text{ mm} + (2 \times 7 \text{ mm}) = 74 \text{ mm}$

Portanto, a pressão para teste é definida pela expressão a seguir:

$$P = 3,2 \times 10^4 \frac{e}{D_{\text{ext}}} = 3,2 \times 10^4 \frac{7}{74} = 3,03 \times 10^3 \text{ psi}$$

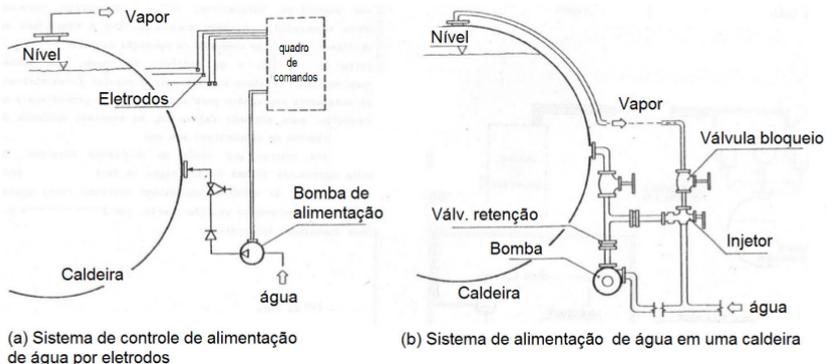
Logo, o tubo deve suportar a pressão de $3,03 \times 10^3$ psi durante cinco segundos.

Para garantir a operação segura das caldeiras, ou de qualquer gerador de vapor, são instalados componentes auxiliares que objetivam, por exemplo, controlar a alimentação de água e combustível necessários, e sistemas para controlar a temperatura e a pressão do vapor. A seguir, vamos analisar cada um desses sistemas e suas particularidades com mais atenção.

O **sistema de controle de água** deve ser acoplado à bomba de alimentação, e sua função é manter constante o nível de água no tambor da caldeira, que deve ser suficiente para resfriar a caldeira e nunca deixar a água faltar. Note que, para cada unidade mássica de vapor produzido, o sistema de controle deve alimentar a mesma quantidade de água na caldeira, do contrário o nível de água diminuirá. Contrariamente, se a massa de água adicionada for maior do que a vazão mássica de vapor gerado, então o nível de água aumentará. O controle não deve ser realizado em termos volumétricos, pois o volume específico do vapor é muito superior ao da água líquida.

Cada caldeira deve apresentar dois sistemas de alimentação de água independentes para que, caso um falhe, o segundo entre em ação. O tipo de controlador de tais sistemas é dado em função do tamanho da caldeira. Controladores com acionamento (atuador) pneumático ou elétrico são empregados em caldeiras de médio e grande porte (acima de 50 ton/h); já nas de pequeno porte usa-se controlador com atuador de eletrodo, conforme exemplificado na Figura 4.8a, ou termo-hidráulico.

Figura 4.8 | Exemplo de controlador de nível de água e sistema de alimentação de água em caldeiras



(a) Sistema de controle de alimentação de água por eletrodos

(b) Sistema de alimentação de água em uma caldeira

Fonte: adaptada de Bazzo (1995, p. 110-111).

No caso de o sistema de controle não ser automático, o operador deve introduzir a quantidade necessária de água nos momentos adequados para manter o nível, aproximadamente, constante e, para isso, o visor de nível mostrado na Figura 4.9a é fundamental.

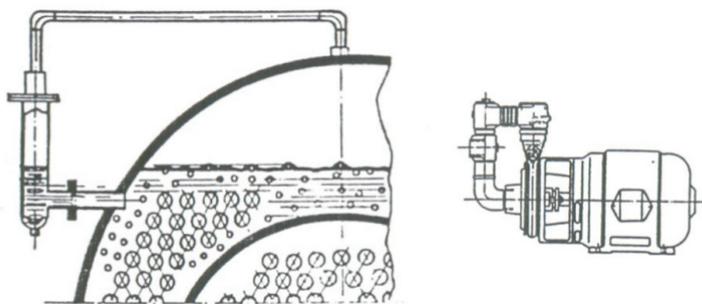


Assimile

Observe que dizer que um sistema é automático não é o mesmo que afirmar que ele é elétrico. Por exemplo, um controlador que atue segundo princípios hidrostáticos pode controlar o nível de água de uma caldeira automaticamente, sem a necessidade de eletricidade.

O sistema da Figura 4.8b é um exemplo de uma alimentação de água em pequenas caldeiras, baseada na diferença de pressão ocasionada pelo vapor produzido no próprio equipamento. Devido à queda de pressão ocasionada pelo escoamento do vapor, o injetor succiona a água que é introduzida no tambor da caldeira, garantindo o seu suprimento. Esse é um sistema de segurança que entra em operação no caso de falha da bomba, e a Figura 4.9b apresenta uma bomba centrífuga de alimentação de água já com um injetor acoplado.

Figura 4.9 | Visor de nível e bomba centrífuga para controle de água de alimentação em caldeiras



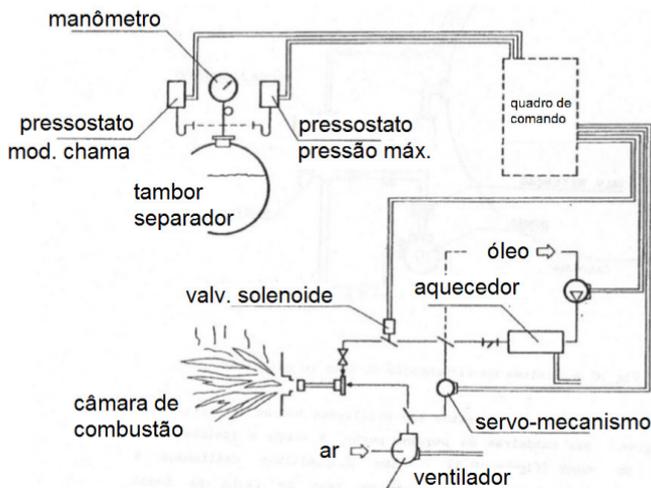
(a) Visor de nível de água

(b) Bomba centrífuga com injetor

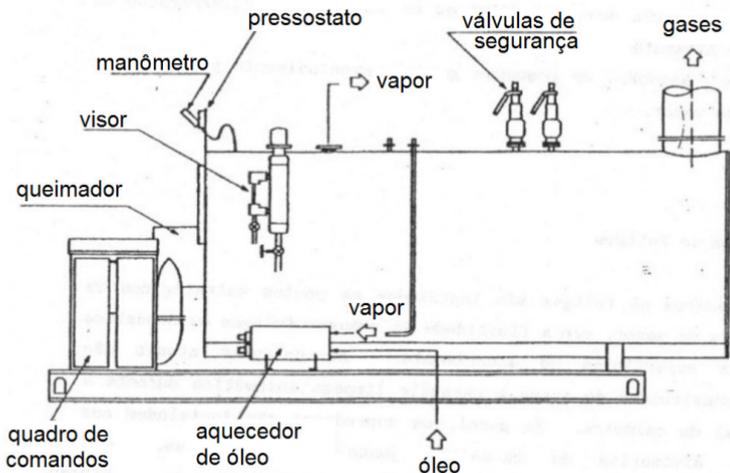
Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 18-8 e 19-3).

Já o sistema de controle da pressão de operação da caldeira (pressão de vapor, portanto) atua de forma indireta, ou seja, tal variável é controlada mediante o sistema de alimentação de combustível na fornalha da caldeira (controle da combustão), conforme mostrado na Figura 4.10a. Nesse sistema, os pressostatos atuam em conjunto com os queimadores da fornalha, a fim de manter constante a pressão de alimentação do combustível, e o manômetro se torna responsável por informar a pressão real de vapor para o operador do equipamento. O mesmo sistema pode ser observado em uma caldeira flama-tubular horizontal de pequeno porte, como mostra a Figura 4.10b.

Figura 4.10 | Sistema de controle de pressão em caldeiras utilizando pressostatos e manômetro



(a) Controle de pressão em caldeira por pressostato e manômetro



(b) Sistema de controle de combustão em caldeira flamatubular horizontal

Fonte: adaptada de Bazzo (1995, p. 112 e 114).

O controle de combustão corresponde ao controle do consumo de combustível na fornalha da caldeira e, também, do ar de combustão necessário para a sua queima e, por fim, da remoção dos gases gerados pela combustão e dos gases não reagidos (ar em excesso, por exemplo). Um sistema de controle eficiente dessas variáveis implicará no fornecimento adequado de calor para a geração de vapor, bem como visa atingir o ponto de operação ótima do

equipamento, garantindo, dessa forma, que os parâmetros da queima estejam dentro dos limites desejados.



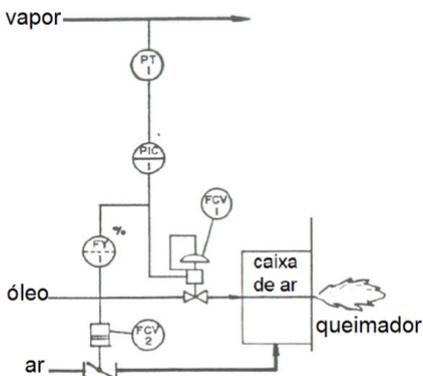
Pesquise mais

A vazão de combustível está atrelada à energia demandada pela geração de vapor, sendo, portanto, difícil controlá-la. Dessa forma, é possível controlar a combustão mediante a vazão de ar. Para conhecer mais sobre esse procedimento, leias as páginas 44 a 46 da obra indicada a seguir:

CERON, L. P. **Controle do excesso de ar em processos de combustão**. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281716804_Controlo_do_excesso_de_ar_em_processos_de_combustao. Acesso em: 3 dez. 2018.

A Figura 4.11 apresenta um esquema do controle de combustão mediante o uso de um sensor de pressão (PT). Esse sensor mede a pressão do vapor no coletor de vapor e emite um sinal para o controlador (PIC), que, conforme o valor padrão (*set-point*) para essa variável, regula a vazão de óleo e de ar de combustão conforme o necessário, ou seja, aumentando ou diminuindo ambas as vazões de acordo com a variação inicial.

Figura 4.11 | Esquema de uma malha para controle de combustão em caldeiras



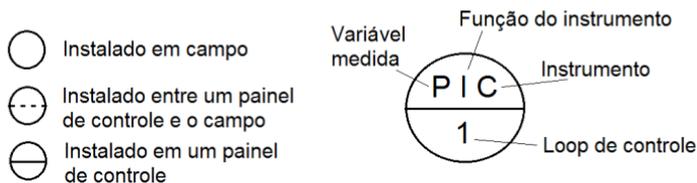
Fonte: adaptada de Pera (1990, p. 20-14).



Saiba mais

Na simbologia de instrumentos e equipamentos, cada elemento do símbolo possui um significado que é importante conhecermos. Observe algumas representações apresentada na Figura 4.12.

Figura 4.12 | Simbologia em instrumentos de medida



Fonte: adaptada de ANSI/ISA-5.1 (2009).

Note que, tanto na Figura 4.8 quanto na Figura 4.10, são instalados dispositivos auxiliares ao sistema de controle para garantir seu funcionamento e maximizar a segurança. Tais componentes podem incluir válvulas de vários tipos, solenoides, termômetros, entre outros.

As válvulas de segurança são muito importantes, pois impedem que, devido a uma falha, haja aumento de pressão na caldeira. Elas são instaladas em posições distintas, dependendo do modelo do equipamento. Normalmente, elas atuam quando a pressão ultrapassa um limite de 10% acima da pressão normal de operação, mas esse limite pode variar.

Para garantir um controle eficiente da operação das caldeiras geradoras de vapor, é necessário o controle simultâneo de vários sistemas e, para isso, a automação se torna uma peça fundamental. O objetivo da automação é controlar automaticamente o fornecimento de água, o consumo de combustível, a quantidade de ar de combustão, a pressão do vapor gerado e a eliminação dos gases residuais da combustão.

Nos sistemas automáticos de controle, existe uma diferença entre a variável medida e a variável de controle que é importante conhecermos. Tome como exemplo a pressão de vapor: um manômetro monitora a pressão de vapor (variável de controle) na caldeira, no entanto a variável medida pelo instrumento é a força do vapor sobre seu êmbolo.

Os controladores são classificados em Liga/Desliga ou em Modulante, conforme seu princípio de atuação. O modelo Liga/Desliga possui limites inferior e superior, por exemplo, para o nível de água, indicando à bomba quando esta deve ou não atuar. Já o controle Modulante sempre está atuante, ou seja, o instrumento constantemente sinaliza que a bomba envie água para a caldeira, mas uma válvula reguladora restringe a vazão de água alimentada no equipamento, por exemplo. Temos que o tipo Liga/Desliga é indicado para caldeiras pequenas, e o Modulante, para caldeiras maiores.

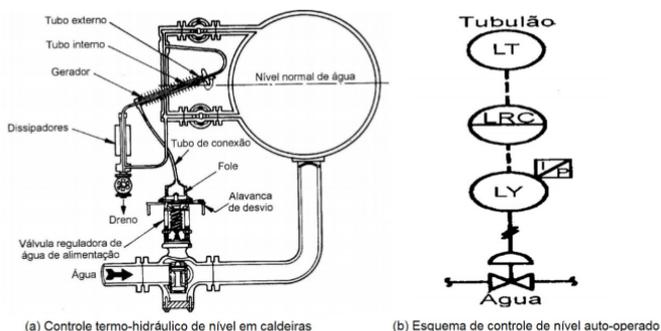


Refleta

Imagine que, devido a um erro de calibração, um controlador indique o acionamento de uma bomba de alimentação de água para uma caldeira que já se encontra na sua capacidade máxima. Quais seriam as consequências desse erro? Você espera que a manutenção e a calibração dos controladores sejam efetuadas regularmente ou com periodicidade longa?

São encontrados três tipos distintos de controladores modulantes: a um elemento (auto-operado ou piloto-operado), a dois elementos e a três elementos. A Figura 4.13a apresenta um sistema de controle a um elemento, sendo este a vazão de água de alimentação. A malha de controle (Figura 4.13b) atua com feedback (retroalimentação), isso significa que o nível é controlado (LC) após uma variação no nível de água. Por exemplo, após uma diminuição do nível de água, o transmissor (LT) emite um sinal para o controlador (LRC), que compara o sinal recebido com um valor padrão (*set-point*) de operação e, neste caso, emite um sinal para abertura da válvula de alimentação de água, visando corrigir a diminuição de água para o valor inicial.

Figura 4.13 | Sistema de controle de nível a um elemento do tipo termo-hidráulico



Fonte: adaptada de Marques (2005, p. 69-70 apud PERA, 1990, 20-7).



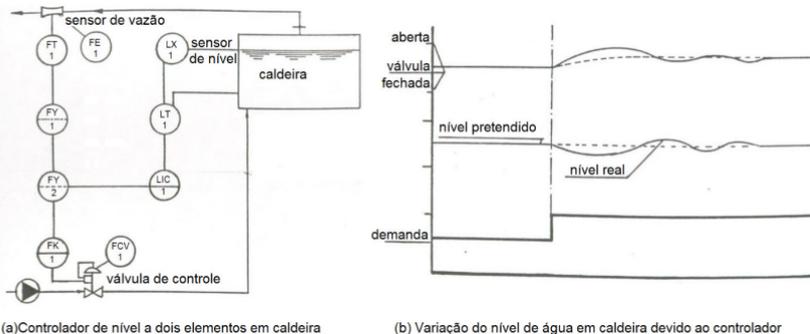
Pesquise mais

Para conhecer mais sobre os diversos tipos de controladores e seus elementos, leia as páginas 68 a 74 da obra indicada a seguir:

MARQUES, F. A. P. **Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo.** 2005, 130f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2005-1/2005040801-2005040801/file>. Acesso em: 3 dez. 2018.

O controlador de nível a um elemento de uma caldeira possui apenas um elemento atuando sobre a medição do nível de água do equipamento, o que torna o sistema sujeito a oscilações. Para melhorar o controle do sistema, pode-se utilizar o controlador a dois elementos atuando sobre a variação do nível de água e a vazão de vapor, conforme mostrado pela Figura 4.14.

Figura 4.14 | Controlador de nível a dois elementos (a) e gráfico de variação do nível de água (b)



(a) Controlador de nível a dois elementos em caldeira

(b) Variação do nível de água em caldeira devido ao controlador

Fonte: adaptada de Pera (1990, 20-9).

Note que existe uma mudança na demanda de água pela caldeira representada por um 'degrau' na Figura 4.14b. A partir dessa variação na demanda, o sistema de controle a dois elementos entra em atuação, e o nível de água na caldeira oscila entre um valor máximo e outro mínimo que se atenuam ao longo do tempo até entrar em equilíbrio, isto é, até o estabelecimento do novo nível de água.



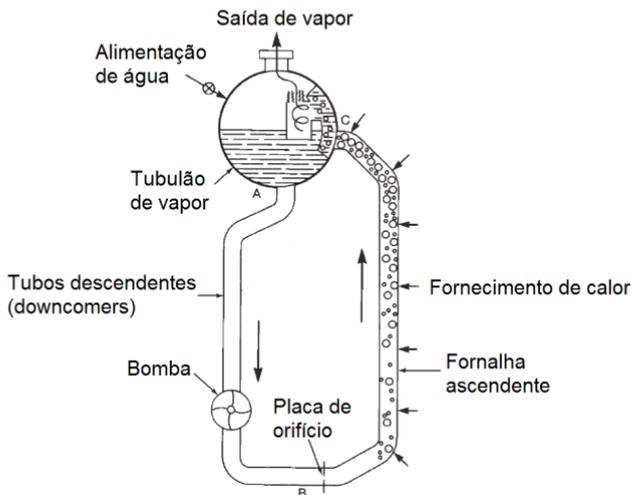
Refleta

Toda variação na demanda de água implicará, necessariamente, no estabelecimento de um novo nível de água devido à atuação do controlador, ou você espera que existam variações muito bruscas da demanda que torne impossível ao controlador estabelecer um novo nível de água estável?

Sem medo de errar

Relembrando que você trabalha no departamento de projetos de um escritório de engenharia e tem elaborado soluções para projetos sobre a geração de vapor e sua distribuição em equipamento industriais; neste momento, você trabalha com um grupo de engenheiros no dimensionamento de uma caldeira aquatubular para uma indústria, tendo sido alocado pelo engenheiro-chefe para propor o sistema de controle de alimentação de água do equipamento apresentado na Figura 4.7, no início desta seção.

Figura 4.7 | Esquema da caldeira que necessita de um sistema de controle de alimentação de água

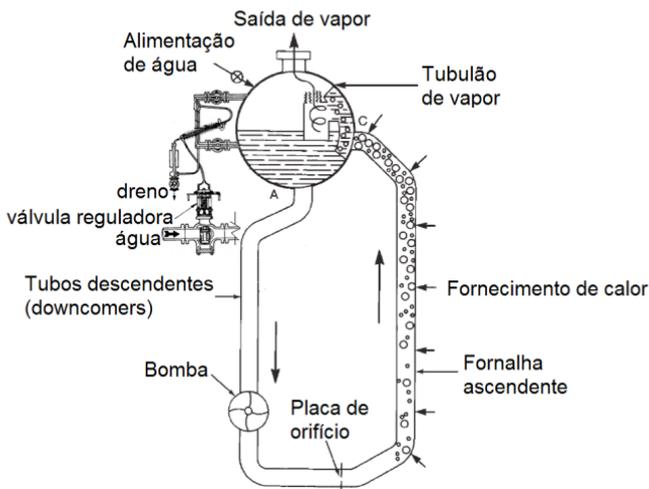


Fonte: Kitto e Stultz (2005, p. 1-4).

A alimentação de água de uma caldeira aquatubular é feita mediante o uso de uma bomba de alimentação e/ou de um injetor a vapor. O controle de tais componentes é realizado medindo-se o nível de água no tambor (tubulão) da caldeira e, para isso, pode-se empregar sistemas de um, dois ou três elementos, ficando essa escolha a cargo do projetista e das condições de operações requisitadas pela utilização da caldeira. Vamos apresentar, aqui, a implementação de um sistema de controle a um elemento que emprega o princípio termo-hidráulico. Essa implementação está demonstrada na Figura 4.15. Note que a saída da válvula reguladora deve ser conectada à tubulação de alimentação de água, e não aos *downcomers*.

Além desse sistema de controle, é necessário implementar um sistema de controle da combustão, pois a quantidade de vapor gerada pela caldeira impacta no nível de água: quanto maior o consumo de combustível, maior calor fornecido na fornalha, maior a geração de vapor e do consumo de água. Portanto, o nível de água tende a diminuir rapidamente (observe a variação de grau na Figura 4.14b).

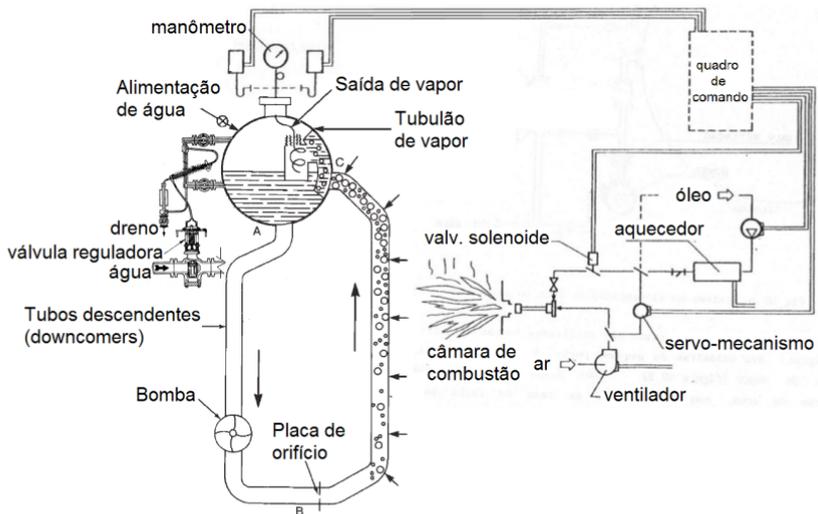
Figura 4.15 | Implementação de controle termo-hidráulico no projeto da caldeira



Fonte: adaptada de Kitto e Stultz (2005, p. 1-4) e Marques (2005, p. 69-70 *apud* PERA, 1990, 20-7).

Você pode encerrar o projeto de implementação do sistema de controle da caldeira mediante a apresentação da Figura 4.16 ao engenheiro-chefe. Note que esse sistema só é possível de ser proposto porque a fornalha é ascendente, isto é, a caldeira é flamatubular (vertical).

Figura 4.16 | Projeto de implementação do sistema de controle de uma caldeira



Fonte: adaptada de Kitto e Stultz (2005, p. 1-4), Bazzo (1995, p. 112) e Marques (2005, p. 69-70 *apud* PERA, 1990, 20-7).

Assim, você encerra sua contribuição para o dimensionamento de uma caldeira, tendo realizado a implementação do sistema de controle de nível de água, garantindo o correto fornecimento de água para a operação do equipamento. Além disso, o controle da combustão proposto auxiliará na otimização da geração de vapor, e isso reflete no consumo e no nível de água. Bom trabalho!

Avançando na prática

Avaliação da operação de uma caldeira

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma indústria produtora de álcool e de açúcar como engenheiro responsável pela inspeção de equipamentos de diversos setores da empresa. Ao inspecionar a montagem de uma caldeira, você suspeitou que houve erro nas especificações dos tubos e, assim, acredita que haverá falha no momento de acionamento da caldeira que deve produzir vapor a 210 psi. Os tubos utilizados são de aço-carbono ASTM178 / NBR 5595, com espessura de 5 mm e diâmetro interno de 25 mm. Você precisa avaliar se é seguro operar a caldeira com os tubos mencionados.

Resolução da situação-problema

Os tubos confeccionados em aço-carbono ASTM 178 / NBR 5595 podem ser utilizados com segurança em caldeiras, desde que suportem uma pressão de teste, definida pela equação a seguir, durante 5 s.

$$P = 3,2 \times 10^4 \frac{e}{D_{\text{ext}}}$$

O diâmetro externo do tubo utilizado tem dimensão de $D_{\text{ext}} = 25 \text{ mm} + 2 \times 5 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$.

Dessa forma, substituindo as especificações do tubo na equação da pressão, obtemos que:

$$P = 3,2 \times 10^4 \frac{e}{D_{\text{ext}}} = 3,2 \times 10^4 \frac{5 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = 4,57 \times 10^3 \text{ psi}$$

Portanto, como $210 \text{ psi} < 4570 \text{ psi}$, você confirmou que os tubos especificados podem ser instalados na caldeira em questão, que operará produzindo vapor a 210 psi com segurança.

1. Para que uma caldeira seja capaz de gerar vapor de forma segura e eficiente, é necessário que o operador seja capaz de controlar algumas variáveis do processo, como a temperatura e a pressão do vapor gerado e, também, o nível de água no tambor da caldeira. A respeito dos sistemas de controle das caldeiras, julgue as afirmações a seguir.

- I. A válvula de controle tem a função de controlar a pressão do vapor produzido.
- II. Não se deve interromper a geração de vapor em uma caldeira a fim de realizar uma inspeção do equipamento. Esse procedimento somente deve ser realizado nas paradas programadas para manutenção.
- III. Os acidentes mais comuns em caldeiras envolvem explosão, choques elétricos, intoxicação por gases e incêndios.
- IV. Caldeiras classificadas de médio ou grande porte empregam atuadores pneumáticos ou elétricos nos seus sistemas de controle.
- V. Em relação ao controle da combustão, o tipo de sistema empregado independe do modelo da caldeira.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e II, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) III e IV, apenas.
- e) IV e V, apenas.

2. Em relação aos sistemas de controle das caldeiras e sua automatização, julgue as afirmações a seguir.

- I. Os sistemas de controle das caldeiras, geralmente, são automáticos, pois fornecem uma resposta rápida a uma variação, por exemplo, do nível de água, que seria inviável do ponto de vista prático para que um operador controlasse manualmente.
- II. A combustão na caldeira não pode ser controlada diretamente, pois o consumo de combustível é comandado pela quantidade de vapor necessária a ser fornecida pelo equipamento.
- III. O controle da combustão é realizado mediante o controle do ar consumido na reação de combustão dentro da fornalha e, para isso, o atuador do sistema opera em conjunto com os queimadores.

IV. De modo geral, as caldeiras possuem apenas um sistema central para controle da água de alimentação.

V. O controle do nível de água em uma caldeira somente é realizado por um atuador termo-hidráulico, que indica o acionamento de uma bomba de alimentação ou o seu desligamento.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e IV, apenas.
- b) II e V, apenas.
- c) I, II e III, apenas.
- d) II, III e IV, apenas.
- e) II, IV e V, apenas.

3. Os sistemas de controle de caldeiras podem ser classificados conforme sua função ou em relação à quantidade de elementos atuantes. A respeito das características desses sistemas de controle, julgue as afirmações a seguir.

I. O sistema de controle Liga/Desliga atua de forma intermitente, ou seja, a partir de um valor pré-estabelecido (set-point) o sistema informa um sinal para o atuador ligar ou desligar. Por exemplo, se o nível de água estiver abaixo do nível pré-estabelecido, o sistema de controle emite um sinal para ligar a bomba de alimentação.

II. O sistema Modulante está sempre em operação, e o controle da variável medida é realizado mediante uma válvula, por exemplo, que se abre ou fecha (parcialmente), conforme valores pré-estabelecidos (set-point).

III. Os sistemas de controle podem ser de um, dois ou três elementos, sendo que os sistemas de um único elemento ainda podem ser divididos em auto-operado ou piloto operado.

IV. Os sistemas de controle operam segundo a medição de uma variável mensurável, a qual nem sempre é a mesma variável de controle.

V. Uma caldeira, para operar seguramente, precisa deter um sistema de controle de alimentação de água, de combustível, de ar de combustão, da pressão de vapor e de eliminação de gases.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e III, apenas.
- b) II e IV, apenas.
- c) I, II e IV, apenas.
- d) II, IV e V, apenas.
- e) I, II, III, IV e V.

Tubulações de vapor

Diálogo aberto

As tubulações industriais de vapor perdem parte da sua energia térmica para o ambiente, pois estão a uma temperatura mais elevada. Nesse processo, ocorre a condensação de parte do vapor no interior das tubulações, o que é indesejado, pois a formação de condensado no interior dos tubos de vapor é prejudicial aos tubos, válvulas e conexões, além de causar outros malefícios ao sistema de distribuição de vapor. Para evitar a perda de calor pelas tubulações de vapor e a consequente formação do condensado, algumas estratégias podem ser colocadas em prática e, para estudá-las, situaremos você em um contexto de vivência profissional.

Lembre-se de que você está atuando em um escritório de engenharia e já concluiu dois projetos relacionados aos equipamentos geradores de vapor. Neste momento, você tem em mãos o compromisso de atuar com as tubulações que compõem a rede de distribuição de vapor, visto que o escritório em que você trabalha foi contratado para realizar a otimização da distribuição de vapor em uma indústria regional. Neste projeto, você ficou responsável por algumas tubulações referentes à recuperação de condensado. Em particular, você precisa determinar a quantidade de condensado formado durante o aquecimento de uma seção linear de 100 m de tubo de aço ($D_{\text{interno}} = 7,6$ cm e 3 mm de espessura) e apresentar algumas soluções de como otimizar o aproveitamento do vapor, ou seja, reduzir a formação de condensado na seção em análise. Você deve considerar que a tubulação foi produzida com um aço cujo valor do calor específico é igual a $0,50$ kJ/kg \cdot° C e que tem massa específica de 7800 kg/m 3 . Além disso, a energia de vaporização da água é $2002,55$ kJ/kg. Qual é a equação que quantifica a formação de condensado? Qual solução de engenharia pode diminuir a formação de condensado durante o aquecimento e favorecer o aproveitamento energético do vapor?

A resposta dessas perguntas o ajudará na solução do projeto e, para respondê-las, você deve conhecer como captar e remover o condensado produzido ou então como instalar uma tubulação para retorná-lo à caldeira. Também, é importante conhecer o método de redução de pressão do vapor, a eliminação de ar nas linhas de vapor e o vapor de reevaporação. Entender a dilatação térmica das tubulações e como isolá-las termicamente também são conhecimentos que o auxiliarão na solução desse projeto. Além disso, estudaremos a flexibilidade das tubulações e a distância entre guias, bem como os esforços aplicados nos apoios fixos das tubulações. Estude todos esses assuntos, pois eles são fundamentais para a sua formação. Bons estudos!

Uma vez que o vapor é produzido por uma caldeira de recuperação, por um gerador elétrico ou por uma autoclave, ele precisa ser transportado até seu local de utilização. Muitas são as utilidades do vapor, tais como: geração elétrica a partir de uma turbina, aquecimento de fluidos diversos em trocadores de calor, cozimento de alimentos em restaurantes, uso direto em processos industriais (destilação, por exemplo), uso em lavanderias, em hospitais e em clínicas odontológicas, entre outras. Todas essas utilizações possuem em comum algum sistema particular para a distribuição do vapor, e é sobre isso que abordaremos nesta seção: vamos estudar as formas de transportar o vapor do seu local de geração até o seu ponto de consumo, de forma eficiente, controlada e com poucas perdas energéticas e mecânicas.

Nesta seção, vamos denominar de vapor saturado, ou simplesmente vapor, aquele que é produzido na sua pressão e temperatura de saturação. Caso o vapor esteja em uma temperatura acima dessa condição, ele será dito superaquecido. Note que o vapor pode ser úmido, quando contém gotículas de água na sua composição (condensado), ou seco, na ausência de gotículas, de tal forma que, quanto maior a umidade, pior é a qualidade do vapor devido à diminuição na capacidade de transferência térmica.



Assimile

Vapor saturado seco é aquele cuja composição somente constitui-se de vapor, isto é, quando temos que $x_v = 1,0$ e $x_l = 0,0$.

Vapor saturado úmido é aquele cuja composição apresenta gotículas de água líquida, isto é, quando temos que $x_l > 0,0$ e $x_v < 1,0$, de tal forma que $x_v + x_l = 1,0$.

A umidade origina-se de perdas térmicas (calor latente) durante o transporte do vapor com conseqüente condensação parcial dele. Vale lembrar que o vapor superaquecido, primeiramente, perde calor sensível até seu ponto de saturação, para, então, condensar-se devido à perda de calor latente. Na condensação, temos que a temperatura é constante.

De acordo com Macintyre (2017), os sistemas de produção e distribuição de vapor devem conter: redes de tubos distribuidores de vapor, elementos acessórios (purgadores, eliminadores de ar, válvulas de segurança, bombas de condensado, filtros e válvulas), pontos redutores de pressão, locais de aquecimento, caldeira e acessórios complementares à caldeira.

A tubulação de distribuição do vapor precisa, necessariamente, possuir uma inclinação (i) de, no mínimo, 0,5% na direção do fluxo de vapor, a fim

de escoar o condensado formado. A inclinação de uma tubulação é determinada pela expressão a seguir:

$$i (\%) = \frac{\text{altura da tubulação (em metros)}}{\text{comprimento horizontal da tubulação (em metros)}} \cdot 100\%$$



Exemplificando

Condensado é produzido no topo de um degrau de 15 cm de altura, e uma tubulação de 30 m de comprimento é utilizada para escoar, por gravidade, o condensado até um poço. Determine a inclinação da tubulação.

Solução:

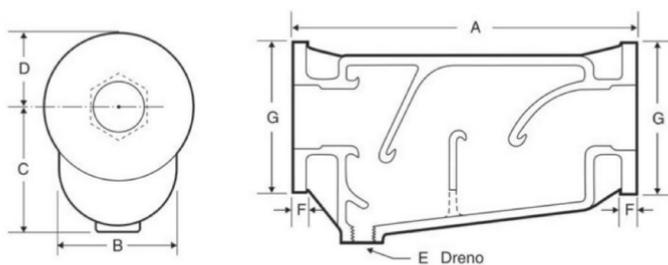
O condensado sofre um desnível de 15 cm para os 30 m de tubo utilizado. Dessa forma, a inclinação da tubulação é dada pela seguinte expressão:

$$i = \frac{0,15 \text{ m}}{30 \text{ m}} = 0,005 \text{ m/m} = 0,5\% = 0,5 \text{ cm/m}$$

Portanto, temos que a inclinação da tubulação é de 0,5%.

Dessa maneira, a cada 30-50 m de distância, instalam-se pontos de coleta de condensado (pontos de drenagem ou de purga), conforme o tipo Tê exemplificado na Figura 4.17a. Se a linha de vapor for muito longa, pode ser interessante dividir a declividade em vários trechos, instalando um ponto de drenagem (ou purga) em cada ponto baixo da linha (Figura 4.17b). A porção horizontal de uma linha principal de distribuição de vapor também deve conter um ponto de coleta, conforme apresentado na Figura 4.17c, além do purgador de ar e outros elementos.

Figura 4.18 | Esquema de um separador de condensado da SARCO SPH tipo horizontal



Medida em mm

Tamanho	A	B	C	D	E	F	G	Peso	
Flangeado	1½ pol.	365	190	114	63,5	12,7	16	127	12.500 kgf
	2 pol.	456	114	145	76,2	12,7	17,5	152,4	27.000 kgf
	3 pol.	487	155	177	95,3	25,4	20	190,5	44.000 kgf
	4 pol.	700	195	233	114,3	25,4	23	228,6	82.000 kgf
	6 pol.	716	355	236	139,7	25,4	24	279,4	205.000 kgf
	8 pol.	765	424	305	111	38,1	28,6	368,7	255.000 kgf

Fonte: Macintyre (2017, p. 387).

Uma vez que o condensado é retirado das tubulações por meio dos separadores, conexões, tês, entre outros, ele deve ser eliminado por meio dos purgadores, os quais são elementos destinados à remoção de condensado sem eliminar vapor das linhas de distribuição. Eles são divididos em três categorias, de acordo com seu princípio de atuação: mecânicos, termostáticos e termodinâmicos.

Os purgadores mecânicos atuam devido à diferença de massa específica existente entre a água e o vapor; já os termostáticos operam graças à diferença de temperatura do vapor e do condensado após um determinado tempo de sua formação; e os purgadores termodinâmicos se fundamentam no Princípio da Conservação de Energia, isto é, o mecanismo de abre/fecha do purgador atua devido à diferença de energia entre a fase de vapor (alta energia na forma de elevada velocidade das moléculas no estado vapor) e de condensado (baixa energia refletida na forma de moléculas com baixa velocidade).



Pesquise mais

Os tipos mais comuns de purgadores são os purgadores de boia simples, de boia termostático com eliminador de ar ou com eliminador de vapor, de balde aberto ou invertido, de pressão balanceada, de expansão líquida, bimetálicos, de disco móvel e de fluxo distribuído com filtro acoplado. É importante que você conheça tais modelos, suas particularidades e funcionamento a partir da leitura das páginas 388 a 392 do material indicado a seguir:

MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas**: prediais e industriais. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 579p.

Disponível gratuitamente em sua biblioteca virtual.

Há grande interesse industrial em coletar o condensado formado e encaminhá-lo à caldeira para evaporação, pois, como o condensado encontra-se a uma temperatura superior à da água de alimentação, haverá menor consumo de combustível na caldeira. Estima-se uma redução de 2% na quantidade de combustível queimado para cada 10 °C de aumento de temperatura na água admitida à caldeira. Além disso, a remoção do condensado de linhas de transporte de vapor também é desejável, pois o vapor em alta velocidade pode carregar gotículas que causam a corrosão de válvulas, vibrações nas tubulações e suas conexões, entre outros problemas.

A inclinação da linha de condensado é responsável por escoar o líquido até um poço em que é misturado com água de *make-up* para, então, ser bombeado à caldeira. Porém, pode ser necessário utilizar uma bomba para o condensado, se a gravidade for insuficiente.



Assimile

Água de *make-up* é aquela adicionada à água de alimentação de uma caldeira para suprir a quantidade de água perdida pela evaporação natural do fluido, no acionamento de alguns equipamentos ou outras formas.

A quantidade de condensado produzido em uma linha de distribuição de vapor devido às perdas térmicas de calor depende de diversas variáveis, de acordo com a equação a seguir:

$$C = c_p \cdot m \times \frac{[T_f - T_i]}{L}$$

Em que C é a quantidade de condensado produzido (kg), c_p é a capacidade calorífica do material da tubulação (normalmente, o aço, com valor $0,49 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$), m é a massa da tubulação no trecho considerado (kg), L é o calor latente da água ($2002,55 \text{ kJ/kg}$) e T_i e T_f representam a temperatura inicial e final, respectivamente, da tubulação no trecho considerado ($^\circ\text{C}$).



Pesquise mais

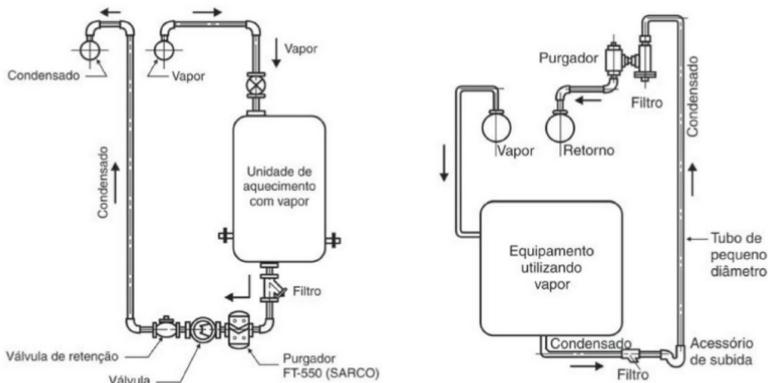
Uma vez determinada a quantidade de condensado produzido em uma tubulação, pode-se especificar o diâmetro da tubulação da linha de remoção de condensado por meio da Tabela 9.3 – Tubulação de condensado, apresentada na página 394 da obra indicada a seguir:

MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas**: prediais e industriais. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 579p.

Disponível gratuitamente em sua biblioteca virtual.

Mesmo com a inclinação, a linha de condensado pode situar-se acima do purgador. Nesse caso, para realizar o escoamento do condensado, faz-se uso ou da pressão de vapor no próprio purgador, que é capaz de impulsionar o condensado a uma altura de até 5 m para cada 1 bar de diferença de pressão, ou capta-se o condensado em um reservatório para, posteriormente, bombeá-lo. No primeiro caso, é necessária a instalação de alguns filtros e acessórios, conforme apresentado na Figura 4.19, para evitar o aprisionamento de vapor, dito vapor preso.

Figura 4.19 | Instalação de purgador e acessório para captação de condensado



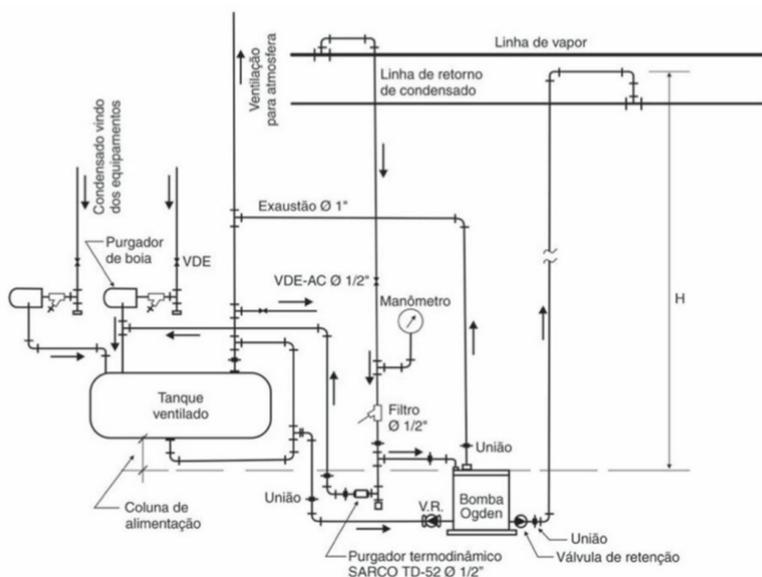
(a) Captação e retorno de condensado do purgador à linha

(b) Uso de purgador acima da linha de condensado

Fonte: adaptada de Macintyre (2017, p. 395).

Quando a quantidade de condensado a ser transportada é muito alta, ou os aspectos mencionados anteriormente não são atendidos, é necessário utilizar uma bomba de condensado (temos que a bomba Ogden é um modelo de bomba específico para o transporte de condensado em linhas de vapor), conforme mostra a Figura 4.20. Nessa instalação, a linha de retorno do condensado, os purgadores e os filtros são instalados conforme os aspectos já discutidos.

Figura 4.20 | Instalação de uma bomba de condensado que atua devido ao escoamento do vapor



Fonte: Macintyre (2017, p. 396).

É possível obter o vapor de reevaporação a partir do condensado expulso pelos purgadores, pois, ao expulsar o líquido para a pressão atmosférica, forma-se vapor naturalmente, porque a temperatura de saturação deve ser de 100 °C necessariamente. Tal vapor de reevaporação pode ser captado por um tanque após a purga e reintroduzido na linha de distribuição de vapor, economizando, portanto, combustível na geração de vapor fresco.

O vapor é produzido nas caldeiras sob uma determinada pressão que é maior do que a necessária pelos equipamentos, formando vapor seco sob elevada temperatura. Ao longo da linha de distribuição de vapor, a pressão diminui naturalmente devido ao escoamento, porém, muitas vezes, é necessário reduzir a pressão do vapor e, para isso, utiliza-se uma válvula redutora de pressão.

As válvulas de redução de pressão são divididas em três categorias: de ação direta, de duplo diafragma (ou ação piloto) e de comando pneumático.

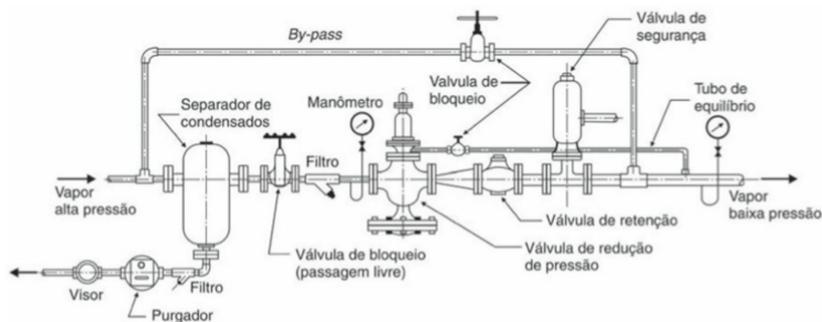


Assimile

A válvula de ação direta é utilizada quando o vapor é alimentado unicamente em um equipamento e não há grande variação na vazão do vapor. As válvulas de ação piloto reduzem a pressão do vapor de diversos equipamentos e quando a vazão de alimentação varia fortemente. Já as válvulas de comando pneumático são utilizadas em situações em que se necessita de grande precisão no controle da pressão e da vazão de vapor.

Os fabricantes de válvulas redutoras de pressão fornecem gráficos (ou ábacos), os quais são utilizados para selecionar o tipo de válvula mais adequado para uma determinada aplicação. Tais gráficos utilizam a diferença de pressão entre a válvula e a quantidade de vapor circundante na linha e são únicos para cada fabricante. Uma vez selecionado o modelo adequado de válvula, segue-se sua instalação e de seus acessórios, conforme apresentado na Figura 4.21. Observe que, após a válvula, existe um aumento no diâmetro da tubulação que deve satisfazer a vazão e pressão do vapor. Além disso, os filtros e separadores-purgadores garantem uma sobrevida às válvulas mediante a remoção do condensado, que poderia causar corrosão ou outros malefícios.

Figura 4.21 | Instalação de uma válvula redutora de pressão e componentes acessórios



Fonte: Macintyre (2017, p. 397).

O *by-pass* apresentado na Figura 4.21 é utilizado para desviar o vapor na seguinte situação: para realização da manutenção da válvula redutora de pressão ou de algum acessório. Devido às paradas na operação do vapor, ocorre o preenchimento da tubulação com ar, que precisa ser eliminado antes de retomar a distribuição de vapor, do contrário o ar será arrastado e ficará alojado nos purgadores, prejudicando seu funcionamento. Para eliminar o ar,

utilizam-se eliminadores de ar, como o apresentado na Figura 4.22, que atua automaticamente.

Figura 4.22 | Eliminador de ar para a saída de um purgador

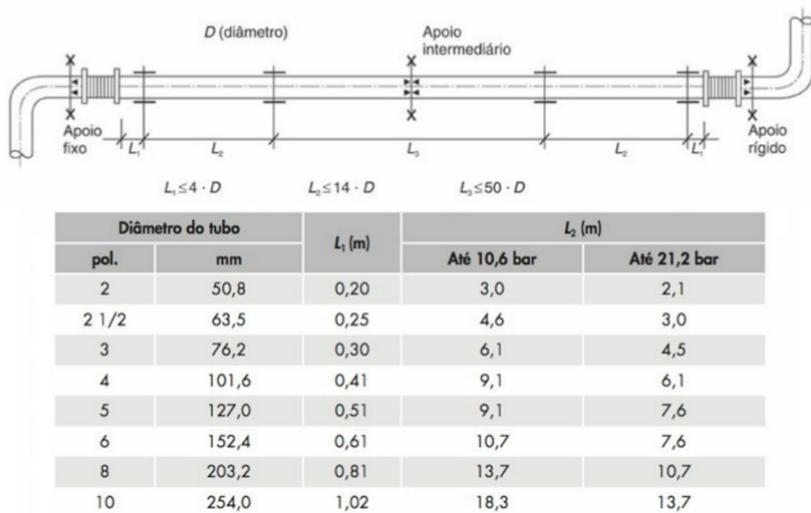


Fonte: Macintyre (2017, p. 397).

Devido à grande variação de temperatura observada na rede de distribuição de vapor, também são observados drásticos efeitos de dilatação que ocasionam tensões indesejadas. Por isso, é interessante utilizar algumas estratégias para minimizar tais efeitos e permitir certa flexibilidade às tubulações de vapor. Vejamos algumas dessas estratégias a seguir.

Quando a rede de distribuição de vapor permite sua ampla instalação, faz-se uso de juntas de expansão (ou de dilatação) como sendo um espaço para a dilatação térmica da rede. Os tipos mais comuns de juntas são as deslizantes (com deslocamento telescópico) ou sanfonadas (com expansão das dobras da sanfona). Em ambos os casos, surgem esforços consideráveis nas guias de ancoragem das tubulações que devem ser considerados. As guias devem permitir, portanto, o deslocamento longitudinal (expansão) dos tubos por meio das juntas e impedir o movimento transversal por meio de apoios fixos, conforme mostrado na Figura 4.23, em que a distância entre os apoios fixos é dependente da pressão do vapor no interior da tubulação e do diâmetro da tubulação. Note que a instalação dos apoios pode ser na vertical ou na horizontal, respeitando-se a perda de carga do escoamento e a instalação de componentes acessórios, como válvulas, purgadores, entre outros.

Figura 4.23 | Distância entre os apoios de uma tubulação de vapor e disposição das juntas dilatadoras



Fonte: adaptada de Macintyre (2017, p. 400).

Quando as dilatações térmicas são absorvidas pelas juntas, dizemos que existe flexibilidade no trecho da tubulação; caso contrário, a tubulação é rígida e surgem esforços nos apoios. O projeto de uma rede de distribuição de vapor deve sempre ser o mais flexível possível, e os pormenores necessários a esse dimensionamento podem ser encontrados em materiais especializados no assunto.



Pesquise mais

As juntas sanfonadas causam esforços nos apoios das tubulações devido à expansão das suas dobras. O esforço depende do tipo de sanfona utilizada e de um gráfico da força de reação na junta devido à pressão de operação. Conheça os tipos de sanfonas e o gráfico lendo as páginas 399 a 401 da obra indicada a seguir:

MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas: prediais e industriais**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 579p.

Disponível gratuitamente em sua biblioteca virtual.

Toda transferência de calor a partir da superfície externa das tubulações para o ambiente é indesejável, pois representa um aumento no consumo de combustível pela fornalha. Para diminuir as perdas térmicas, faz-se o

isolamento das tubulações economizando, portanto, combustível. Para essa tarefa, vários materiais estão disponíveis para diversas aplicações e diferentes condições. As lãs de vidro são adequadas para isolar tubos com vapor de até 450 ou 550 °C e estão disponíveis em feltros, painéis, tubos bipartidos, mantas, painéis ou como enchimento e, por isso, são aplicáveis em várias regiões de geometria complexa. Esse material é bom isolante térmico e acústico, além de ser resistente, não comburente, imputrescível, entre outras vantagens. Para temperaturas de até 750 °C, emprega-se isolamento com lã de rocha, porém esse material suporta picos de até 1000 °C e apresenta as mesmas vantagens que a lã de vidro. Outros materiais isolantes são os tubos bipartidos de silicato de cálcio hidratado (até 815 °C) ou tijolos refratários, que são utilizados em situações com temperaturas superiores a 1000 °C.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você foi contratado para atuar em um escritório de engenharia e que sua atribuição consiste na elaboração de soluções de alguns projetos que envolvem conceitos de geração e distribuição de vapor. Até o momento, você já atuou em dois projetos desse tipo: o primeiro relacionado ao dimensionamento de uma caldeira de recuperação, e o segundo referente ao sistema de controle de uma caldeira. Agora, o projeto em questão remete às técnicas de distribuição de vapor em tubulações industriais. Um trecho linear de 100 m de uma tubulação de 3 mm de espessura e D_{interno} de 7,6 cm transporta vapor que se condensa parcialmente. É necessário que você estime a quantidade de condensado produzido no trecho em análise e, também, apresente algumas soluções de como minimizar a formação de condensado, a fim de otimizar o aproveitamento do vapor. Para isso, você pode considerar que o calor específico do aço do qual a tubulação foi produzida é igual a 0,50 kJ/kg·°C, com massa específica de 7800 kg/m³, e que a energia específica de vaporização da água é 2002,55 kJ/kg.

Você deve iniciar a solução deste projeto determinando a quantidade de condensado formado nas condições especificadas. Para isso, você precisa utilizar a seguinte expressão:

$$C = c_p \cdot m \times \frac{[T_r - T_i]}{L}$$

Em que C representa a quantidade de condensado produzida (em kg).

Há um empecilho neste momento, isto é, não conhecemos a variação de temperatura na tubulação de vapor e não podemos utilizar diretamente a expressão anterior. Para contornar esse problema, consideraremos uma base de cálculo, ou seja, vamos realizar a quantificação de condensado baseado

em uma variação unitária de temperatura (1 °C) no trecho de 100 m da tubulação. Assim, uma simples medição de temperatura no início e no final da tubulação é capaz de fornecer a variação real de temperatura, digamos, por exemplo, de 10 °C, sendo, portanto, a quantidade de condensado formado 10 vezes a do valor calculado.

Agora, precisamos quantificar a massa da tubulação no trecho considerado (m) e, para isso, utilizamos a massa específica de 7800 kg/m³ e o fato de a tubulação ser um cilindro oco de D_{interno} = 7,6 cm e diâmetro externo calculado por:

$$D_{\text{externo}} = D_{\text{interno}} + \text{espessura} = 7,6 \text{ cm} + 3 \text{ mm} = 7,9 \text{ cm}$$

A massa de material no cilindro é obtida por uma simples expressão:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{\pi}{4} (D_{\text{externo}}^2 - D_{\text{interno}}^2) \cdot h$$

Em que V é o volume (dado em m³), ρ é a massa específica (dada em kg/m³) e h é o comprimento da tubulação. Dessa forma, substituindo os valores fornecidos no projeto, segue que:

$$m = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} (0,079^2 - 0,076^2) \cdot 100 = 284,86 \text{ kg}$$

Portanto, agora é possível quantificar a quantidade de condensado formado, isto é:

$$C = 0,50 \cdot 284,86 \cdot \frac{1}{2002,55} = 0,071 \text{ kg}$$

Vale lembrar que o valor determinado é equivalente a uma variação unitária de temperatura no trecho da tubulação. Se, por exemplo, a variação real de temperatura for de 10 °C, então a formação de condensado será 10 vezes o valor calculado, ou seja, 0,71 kg de condensado.

Portanto, é possível diminuir a quantidade de condensado formado mediante o isolamento térmico da tubulação ou pelo seu encurtamento. Como o encurtamento depende da realocação da posição dos equipamentos em relação ao layout da fábrica, e isso é um processo caro, demorado e, muitas vezes, limitado por diversas razões, torna-se útil realizar apenas o isolamento térmico do trecho em questão.

A escolha do material para isolar depende da temperatura do vapor, sendo que você pode sugerir o uso de lã de vidro caso a temperatura do vapor (lembre-se de que esse parâmetro não foi fornecido e, portanto, é desconhecido) seja de até 550 °C. No caso de vapor com temperatura de até 750 °C,

pode-se usar a lâ de rocha, ou hidrosilicato de cálcio, para vapor a 815 °C. Vale ressaltar que os tijolos refratários não devem ser indicados neste caso, pois eles não são usados no isolamento de tubulações, mas de equipamentos, como fornalhas de caldeiras.

Com tais indicações e tendo calculado a quantidade de condensado formado, você pôde concluir seu terceiro projeto, tendo analisado e proposto diversas soluções para problemas que utilizaram os conceitos acerca da geração e distribuição de vapor em caldeiras e que são muito úteis ao gerente industrial e/ou profissional responsável. Bom trabalho!

Avançando na prática

Validação de projeto de uma linha de distribuição de vapor

Descrição da situação-problema

Nesse momento, imagine que você trabalha como supervisor de uma indústria química, sendo responsável por todos os sistemas geradores de vapor e por sua distribuição. A empresa na qual você trabalha passa por um processo de expansão, em que várias linhas de distribuição de vapor foram dimensionadas e seus projetos precisam de sua validação e aprovação. Um projeto em particular lhe chamou a atenção devido à instalação de uma válvula redutora de pressão sem a linha de *by-pass* e com diâmetros iguais das tubulações de entrada e de saída. Você precisa avaliar esse projeto, aprovando-o ou recusando-o e fornecendo o parecer técnico da sua análise.

Resolução da situação-problema

O projeto em questão está incorreto e não pode ser validado, pois a ausência de um caminho *by-pass* ao redor da válvula redutora de pressão é imprescindível, pois ele garante o desvio do vapor (ou seja, o *by-pass* isola a válvula redutora) para que a válvula possa sofrer manutenção e/ou calibração (ou mesmo a substituição), garantindo a segurança do operador e sem a necessidade de interromper completamente a geração de vapor.

Vale lembrar que devem constar componentes acessórios antes e após a instalação da válvula, por exemplo, o separador de condensado, a válvula de bloqueio, flange tipo raquete, entre outros. Além disso, uma vez que a pressão do vapor é reduzida, o diâmetro da tubulação de saída, necessariamente, precisa ser maior do que o diâmetro de entrada. Como isso não foi

especificado no projeto, podemos concluir que há grande possibilidade de ocorrerem problemas hidráulicos na linha de vapor dimensionado. Dessa maneira, o projeto deve ser recusado, pois algumas alterações são necessárias para sua validação.

Faça valer a pena

1. A distribuição de vapor de uma caldeira até um equipamento qualquer requer a correta instalação de tubos, conexões, válvulas, entre outros acessórios. Sobre isso, julgue as afirmações a seguir.

- I. A presença de vapor em equilíbrio com gotículas de água configura o denominado vapor úmido, que pode ser saturado ou superaquecido, dependendo da sua temperatura e pressão.
- II. Durante o transporte de vapor por uma tubulação, ocorre a formação de água líquida, denominada de condensado.
- III. O escoamento natural do condensado somente pode ser realizado de modo descendente.
- IV. Purgadores, eliminadores de ar, válvulas de segurança, bombas de condensado, filtros e válvulas são exemplos de componentes necessários ao transporte do vapor e do condensado em uma rede de distribuição de vapor.
- V. A formação de condensado se deve à transferência de energia térmica das tubulações para o ambiente. Pode-se diminuir as perdas térmicas, porém é impossível cessá-las completamente.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e III, apenas.
- b) II e IV, apenas.
- c) IV e V, apenas.
- d) II, IV e V, apenas.
- e) III, IV e V, apenas.

2. A respeito da distribuição de vapor em tubulações industriais, julgue os itens a seguir.

- I. As tubulações distribuidoras de vapor horizontais necessitam de uma leve inclinação.
- II. Além dos acessórios, é necessário que os sistemas de distribuição de vapor contenham tubos corretamente dimensionados, válvulas redutoras de pressão e pontos de aquecimento para o transporte do vapor até longas distâncias.

- III. Um conector tipo Tê é utilizado para captar o condensado de uma linha de vapor e deve ser instalado nas linhas de vapor somente a cada 30-50 m.
- IV. O vapor de reevaporação é aquele originado do condensado que foi encaminhado novamente à caldeira.
- V. A formação de 1 kg de condensado ao longo de 200 kg de uma tubulação de aço não isolada termicamente sofre um abaixamento de temperatura menor que 0,50 °C.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e II, apenas.
- b) II e III, apenas.
- c) I, II e III, apenas.
- d) II, III e IV, apenas.
- e) III, IV e V, apenas.

3. Sobre as instalações industriais para transporte de vapor e remoção de condensado, julgue os itens a seguir.

- I. Um separador de condensado da SARCO SPH tipo horizontal com dreno de 12,7 mm é utilizado em tubulações de 1,5 ou 2 polegadas.
- II. O *by-pass* é um desvio da tubulação principal de vapor utilizado para transferir o fluxo de vapor ao redor de uma válvula de redução de pressão para que um operador possa realizar uma manutenção ou calibração do instrumento com segurança.
- III. É possível isolar as tubulações de distribuição de vapor com lâ de vidro ou lâ de rocha, dependendo da temperatura do vapor transportado: até 550 °C para o vidro, e 750 °C para a rocha.
- IV. As dilatações térmicas são esforços que acontecem nas juntas de união de dois tubos distribuidores de vapor.
- V. Uma tubulação de vapor é dita flexível quando não há dilatação térmica devido ao escoamento do vapor no seu interior.

A partir da avaliação da veracidade das afirmações apresentadas no texto-base, assinale a alternativa correta. São verdadeiras:

- a) I e II, apenas.
- b) II e III, apenas.
- c) I, II e III, apenas.
- d) II, IV e V, apenas.
- e) III, IV e V, apenas.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ANSI/ISA-5.1**. Instrumentation Symbols and Identification. 2009. 131p.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 216p.

CERON, L. P. **Controle do excesso de ar em processos de combustão**. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281716804_Controle_do_excesso_de_ar_em_processos_de_combustao. Acesso em: 3 dez. 2018.

CHIRICO, V. D. **Incineração de resíduos urbanos**. Tradução Paula Mantovanini e Gandolla Mauro. 2013. Disponível em: http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/txt_349995799.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

FERREIRA, D. J. O. **Modelagem de Caldeira de Recuperação Química Kraft**. 2013, 238f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-26072013-122445/publico/Tese_FerreiraDJO_unprotected.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

KIESOW, R. M. **Desenvolvimento de um sistema para pré-aquecimento de água de alimentação de uma caldeira fumotubular**. 2015, 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/2159/TCC%20Renato%20Muller%20Kiesow.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 nov. 2018.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam – its generation and use**. 41. ed. Ohio: Barberton, 2005.

MACINTYRE, A. J. **Instalações hidráulicas: prediais e industriais**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 579p.

MARQUES, F. A. P. **Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo**. 2005, 130f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2005-1/2005040801-2005040801/file>. Acesso em: 3 dez. 2018.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de Energia com vistas à preservação da Ecologia**. 2. ed. São Paulo: Editora FAMA, 1990. 503p.

SMITH, J. M.; VANNESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. Tradução Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 626p.

ISBN 978-85-522-1405-2



9 788552 214052 >