

Eficiência Energética em Distribuição de Vapor em Processos de Refino de Petróleo. Impacto das Perdas Térmicas em Sistemas de Aquecimento com Traço de Vapor

Delano M. de Santana

Engenheiro Químico – CHEMTECH – A Siemens Company

Endereço de e-mail: delano.santana@chemtech.com.br

1. RESUMO

Traço de vapor é a aplicação do aquecimento a vapor para tubulações, equipamentos e instrumentos; com o propósito de manter a temperatura de processo desejada, proteção contra congelamento e controle de viscosidade. É composto por linhas de vapor de pequeno diâmetro em contato direto com as tubulações de processo, que acompanham a sua trajetória. O conjunto é então isolado para que a maior parte do calor seja transferida para o fluido de processo. O isolamento térmico diminui as perdas energéticas para o ambiente e o sistema de drenagem elimina o condensado formado a partir da troca térmica do vapor com a superfície da tubulação.

Para melhorar a eficiência do sistema de aquecimento, o isolamento térmico necessita estar em boas condições, a drenagem de condensado formado deve ser adequada para evitar alagamento das linhas, a manutenção das tubulações de traço de vapor deve ser realizada para evitar vazamentos. Essas premissas nem sempre são adotadas gerando grandes perdas térmicas.

A elevação dos custos de combustíveis e a importante preocupação com a sustentabilidade do processo de produção motivaram a elaboração do presente trabalho, que visa à conscientização do impacto gerado pela falta de acompanhamento dos sistemas de aquecimento a traço de vapor no processo de refino de petróleo.

Serão avaliadas situações reais¹ e apresentados os impactos nos custos de produção dos vazamentos nas linhas de vapor, do não funcionamento do sistema de drenagem de condensado, do não aproveitamento do condensado gerado e da danificação do isolamento térmico; de forma percentual.

Os resultados apresentados no presente estudo reforçam com números a economia energética resultante do correto dimensionamento e a conservação do sistema de traço de vapor em uma unidade de refino de petróleo.

2. INTRODUÇÃO

Na forma de vapor, a água tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume, o que proporciona uma maior facilidade de transporte de calor. A relação de temperatura e pressão de saturação permite sua utilização como fonte de calor a temperaturas médias, e de larga utilização industrial com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível.

O vapor saturado se condensa rapidamente quando em contato com superfícies mais frias, isto é, cede seu calor latente de forma rápida. Essa característica é utilizada em trocas térmicas dentro de aquecedores em um grande número de situações. É recomendada a utilização do vapor saturado entre 15-20% acima da temperatura de operação desejada de aquecimento.

As faixas de temperaturas até 150°C utilizam vapor saturado de 10kgf/cm², cuja temperatura de saturação é 183°C. Nesta faixa está a grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Maiores temperaturas são possíveis a custo do aumento da pressão de saturação, o que implica num maior custo de investimento devido à necessidade de aumento da resistência mecânica e requisitos de fabricação e inspeção do gerador de vapor.

Para controle de fluidez e prevenção contra incrustação em tubulações, instrumentos e equipamentos por

¹ As fontes e os resultados reais não podem ser divulgados.

cristalização de fluidos de processo em Refinarias de Petróleo, são utilizados sistemas de traço de vapor.

2.1. Traço de vapor

Traço de vapor é a aplicação do aquecimento a vapor para tubulações instrumentos e equipamentos, com o propósito de manter as temperaturas de processo desejadas, proteção contra congelamento e controle de viscosidade. É composto por linhas de vapor de pequeno diâmetro em contato direto com as tubulações de processo, que acompanham a sua trajetória. O conjunto é então isolado para que a maior parte do calor seja transferida para o fluido de processo.

A Figura 2.1 apresenta o desenho esquemático do aquecimento por traço de vapor.

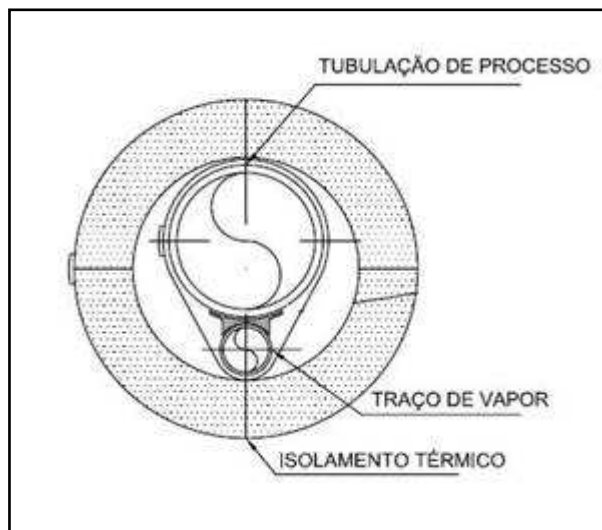


Figura 2.1 - Desenho esquemático do aquecimento com traço de vapor.

2.2. Alagamento e drenagem de condensado

O vapor, quando em contato com as superfícies do sistema de aquecimento, passa a ceder parte do seu calor latente, isto é, entra em processo de condensação em função do diferencial de temperatura existente. O condensado formado proveniente dessa troca térmica flui para a parte inferior da tubulação, devendo ser drenado. Se o vapor condensa numa taxa de condensação superior a da drenagem, haverá acúmulo de condensado. Esse efeito é chamado de alagamento. O condensado formado se encontra à mesma temperatura do vapor, o que não significa dizer que esteja com a mesma quantidade de calor, já que a entalpia do líquido é muito inferior a do vapor nas mesmas condições. Por esse motivo, a presença de condensado reduz a eficiência de troca térmica.

Dispositivos de purga de condensado sem perda de vapor são chamados de purgadores, cada qual com suas características próprias de funcionamento, que definem sua aplicação ideal. Uma purga mal dimensionada pode acarretar sérios problemas, como baixa produtividade do sistema e riscos operacionais.

As tubulações do sistema de aquecimento com vapor devem ser inclinadas, no sentido do fluxo em pelo menos 5% (Figura 2.2). Se as tubulações de distribuição de vapor possuírem uma inclinação ascendente (contra o fluxo), o condensado formado ao longo do caminho deverá descer. Porém o fluxo de vapor que poderá estar entre 25 e 30 m/s irá empurrá-lo. Dessa forma, torna-se extremamente difícil separar e retirar o condensado da tubulação, produzindo-se golpes de aríete.

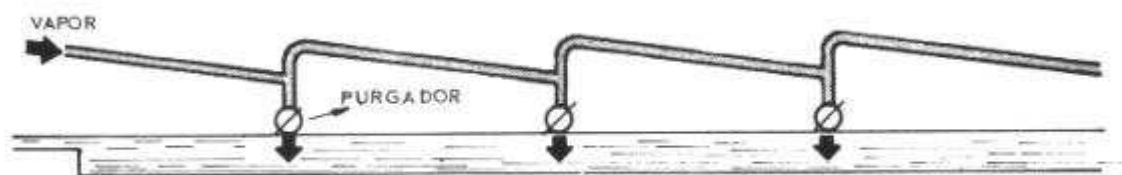


Figura 2.2– Inclinação da tubulação.

2.2.1. Golpes de Aríete

Após o aquecimento, a formação de condensado nas linhas de vapor ocorre em função da troca térmica entre a tubulação e o meio ambiente, mesmo com linhas isoladas. Caso esse condensado não seja eliminado, tem-se um êmbolo hidráulico deslocando-se com uma velocidade de aproximadamente 30 m/s, que ao encontrar qualquer obstáculo, como curvas, válvulas de bloqueio, flanges, causará golpes extremamente destrutivos e com alto nível de ruído, chamados golpes de aríete. Este evento poderá danificar equipamentos e suportes de tubulação, causar erosão nas linhas, além de produzir risco de acidentes pessoais pelo rompimento da tubulação.

2.3. Retorno de condensado

O condensado deve ser reutilizado para aproveitar o calor ainda disponível. Assim, pode ser empregado como água quente de processo, inserido no processo de desaeração, devolvido ao tanque de alimentação da caldeira, para que possa ser reutilizado sem a necessidade de tratamento e reaquecimento, com o que se economiza combustível, água de reposição e custos com tratamento químico.

2.4. Isolamento térmico

Com ampla aplicação em engenharia, os isolantes térmicos são selecionados em função de aspectos que variam de econômicos, funcionais e de segurança. A função primária de um isolante térmico é reduzir a taxa de transferência de calor entre um sistema e o meio, de modo que a energia possa ser conservada. Por isso, parte do sistema deve ser revestida com material que possua propriedades e espessura tais que as temperaturas se mantenham dentro de um determinado intervalo.

Recomenda-se que as tubulações e tanques aquecidos sejam isolados por motivos de segurança de trabalho quando as temperaturas ultrapassam 60°C e por motivos econômicos, quando a temperatura excede 120°C.

3. DESENVOLVIMENTO

Em geral, os principais problemas identificados referentes à ineficiência do sistema de traço de vapor numa refinaria são:

- Grande quantidade de vazamentos nas linhas de traço de vapor por corrosão e em função de cortes realizados pela operação, como ação imediata para garantir a continuidade operacional do sistema;
- Disposição e número de ramais incorretos no sistema de traço de vapor;
- Plano de manutenção de purgadores inadequado;
- Purga coletiva incorreta;
- Não aproveitamento do condensado na unidade por falta de um sistema de retorno para a geração de vapor;
- Problemas na operação de bombas como: cavitação, vazamentos nos selos e corrosão nos internos.
- Danos em válvulas e instrumentos referentes ao sistema de vapor, principalmente destinadas ao retorno de condensado, quando existente;
- Isolamento ineficiente nas linhas, sendo por falta, defeito, desgaste ou encharcamento do material isolante;

Para os problemas citados acima serão apresentados os impactos no consumo de vapor na unidade e possíveis soluções a serem propostas.

3.1. Vazamentos em linhas de vapor

A pressão do vapor e o pequeno diâmetro dos vazamentos geram um escoamento super sônico pelo orifício que aumenta o diâmetro do furo por erosão. Com o tempo, esse aumento gera uma maior perda e o dano é intensificado. Esse vapor devido a sua característica erosiva pode acarretar em perdas significativas após horas de ocorrência de vazamento. Por esse motivo o sistema de vapor deve ser monitorado periodicamente, para que se localize o vazamento ainda no início, pois o estrago causado pelo mesmo aumenta de forma

exponencial com o passar do tempo até o ponto que o equipamento atingido (purgadores, válvulas, filtros, entre outros) não possa ser mais reparado e tenha que ser trocado por um novo.

A partir da Figura 3.1 observa-se que quanto maior o tempo para o reparo do sistema de vapor maior serão os seus custos.

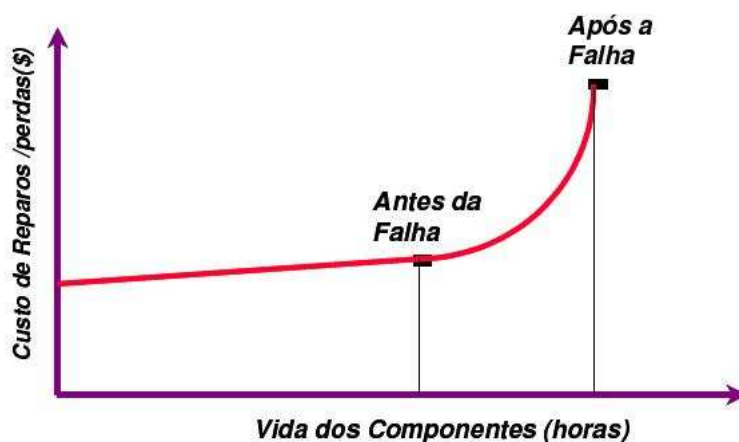


Figura 3.1 - Gráfico de Custos de reparos versus. Vida dos componentes.

A Figura 3.2 apresenta o comportamento das perdas de vapor em relação ao diâmetro do furo para diferentes pressões de operação do vapor. Assim, de posse destas informações é possível calcular a perda de vapor por vazamentos nas linhas.



Figura 3.2 - Gráfico de perdas de vapor em relação ao diâmetro do furos para diferentes pressões de operação.

Estes vazamentos em linhas de traço de vapor podem representar uma elevação do consumo de vapor de uma unidade em **8%**.

3.2. Disposição e número incorreto de ramais das linhas de traço de vapor

A norma PETROBRAS N-042 possui um ábaco que permite o cálculo do número de ramais a partir de informações da linha a ser aquecida, como diâmetro da tubulação, espessura do isolamento e temperatura desejada do fluido de processo.

A referida norma possui ainda figuras que ilustram a disposição correta dos ramais de aquecimento de acordo com o número de linhas de vapor determinadas pelo ábaco.

A disposição incorreta dos ramais de aquecimento pode gerar uma troca ineficiente de calor causando perdas energéticas desnecessárias e um alto consumo de vapor na unidade.

3.3. Purgadores

O estado de funcionamento de purgadores pode ser determinado através de medições de vibração com um medidor baseado no método de ultrassom. Juntamente com informações fornecidas pelos fabricantes, pode ser quantificado o desperdício de vapor para a atmosfera e a perda de condensado que poderia ser recuperado.

Os vazamentos de vapor pelos purgadores representam um grande desperdício de energia e nos casos onde há retorno de condensado ocasionam a pressurização das linhas prejudicando os equipamentos a ela interligados. Manter uma rotina de manutenção periódica, especificar e instalar corretamente os purgadores reduz sensivelmente estes custos e as perdas ao meio-ambiente.

Os vazamentos em purgadores do sistema de traço de vapor podem representar uma elevação do consumo de vapor de uma unidade em **2%**.

A correta manutenção e utilização de purgadores adequados eliminam o problema de alagamentos das linhas de vapor que dificultam a troca térmica nos equipamentos, submetem purgadores, válvulas e equipamentos a golpes de ariete destrutivos, danificando-os e gerando custos. Além disso, em alguns casos onde os purgadores estão represando condensado, a válvula de drenagem manual é aberta, liberando o condensado represado para garantir o aquecimento e a continuidade do processo, aumentando as perdas de condensado e de vapor.

Um plano de manutenção efetivo e aplicado com rigor nos purgadores das refinarias de Petróleo é importante para diminuir estes problemas.

3.3.1. Drenagem Coletiva

É comum observar a instalação de um único purgador para drenar dois ou mais ramais de aquecimento submetidos à mesma pressão de trabalho. Mesmo nessas condições ocorrerão problemas nas drenagens, pois os consumos de vapor nos ramais não são os mesmos, havendo conseqüentes variações de pressão. O agravante é que os maiores consumidores de vapor, conseqüentemente os maiores geradores de condensado são os que sofrem alagamentos.

Linhas de aquecimento não possuem consumos equivalentes, em função das variáveis envolvidas: gradiente de temperatura na tubulação e disposição dos ramais de aquecimento. Assim quando um dos ramais (letra C da primeira disposição da Figura 3.3) ligados a rede coletora atinge a sua temperatura ideal de processo, o vapor tende a ocupar todo o espaço ocupado anteriormente pelo condensado, já descarregado pelo purgador. Nessa condição, o purgador estará fechado, não permitindo que o condensado proveniente dos outros ramais possa ser descarregado.

Portanto a segunda disposição da Figura 3.3 é a ideal em termos de eficiência de processo, onde cada ramal de aquecimento é drenado pelo seu respectivo purgador.



Figura 3.3 – Purga coletiva.

3.4. Recuperação de condensado

Muitos pontos de purga descarregam condensado para a atmosfera gerando perdas de água tratada, aumento na geração de efluentes e perdas energéticas. O condensado gerado pelo sistema de traço de vapor contém uma grande quantidade de energia que poderia ser reaproveitada, caso este condensado fosse reutilizado como água de alimentação nas caldeiras.

Este condensado deve ser enviado para um sistema de desaeração, onde serão removidos os gases não condensáveis e a energia será economizada na forma de redução de consumo de vapor, já que quanto mais aquecida a água de entrada, menos vapor será necessário para remoção os gases.

A quantidade de energia a ser economizada pode ser calculada a partir da Equação 3.1:

$$E = m \cdot (h_g^{sat} - h_0)$$

Equação 3.1 – Cálculo da energia térmica.

Onde,

E = energia economizada;

m = massa de condensado gerada;

h_1^{sat} = entalpia da água líquida na pressão do vapor utilizado;

h_0 = entalpia da água de alimentação às suas condições de temperatura e pressão.

Normalmente considera-se a entalpia do condensado a 95°C e a entalpia da água de alimentação a temperatura ambiente.

3.4.1. Taxa de condensação

Para garantir a temperatura desejada nas linhas de processo aquecidas por traço de vapor, todo o calor perdido para o ambiente através do isolamento térmico deve ser resposto através de troca térmica com vapor. Assim o vapor saturado cede o seu calor latente e se transforma em condensado, que posteriormente deve ser recuperado.

Além das perdas térmicas da linha de processo para o ambiente, devem ser consideradas também as perdas pela tubulação de traço de vapor através do isolamento térmico, aumentando assim a taxa de condensação.

Para calcular a taxa de condensação devido ao aquecimento de linhas de processo utilizando traço de vapor, pode-se utilizar a lei de *Fourier* adequadamente representada abaixo:

$$q = -kA \frac{dT}{dr} = m \cdot H$$

Equação 3.2 – Equação para o cálculo da taxa de condensação.

Onde,

q = calor perdido por condução;

k = condutividade térmica do isolante;

T = temperatura;

r = raio;

m = massa de condensado gerado;

H = calor latente de condensação nas condições de operação.

Integrando, obtém-se:

$$q / L = 2\pi k \frac{\Delta T}{\ln(r_e/r_o)} = m \cdot H$$

Equação 3.3 – Equação final para cálculo da taxa de condensação.

Onde,

L = comprimento da linha;

ΔT = diferença entre a temperatura de operação da linha e a temperatura externa do isolamento ($T_0 - T_e$);

r_e = raio externo do isolamento da tubulação;

r_0 = raio interno.

A Figura 3.4 ilustra o sistema em questão:

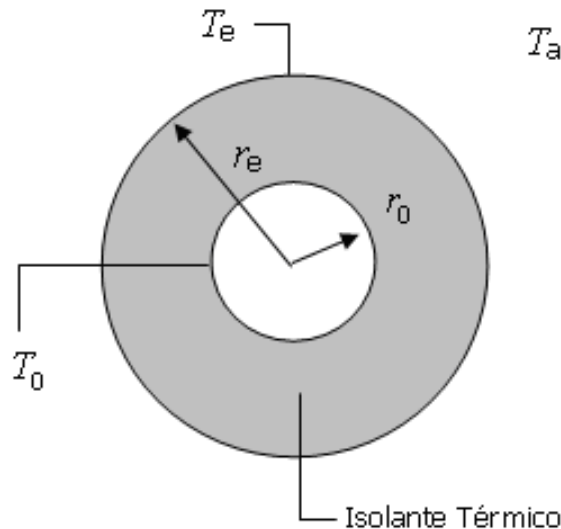


Figura 3.4 – Desenho esquemático do sistema.

Nessa taxa de condensação são consideradas somente as perdas térmicas referentes à condução.

A taxa de condensação calculada a partir da Equação 3.3 é utilizada para determinar a quantidade de energia que pode ser reutilizada e quanto que se pode ganhar em economia de água tratada descrita pela Equação 3.1.

A energia contida no condensado representa em torno de **15%** da energia total do vapor de aquecimento.

3.4.2. Bombeamento de condensado

A utilização de bombas do tipo centrífugas convencionais para o bombeamento de condensado pode trazer alguns inconvenientes, principalmente por efeito de cavitação. Por ser um fluido quente, o condensado pode sofrer re-evaporação nas áreas de baixa pressão da bomba produzindo choques que provocam erosão nos internos, diminuindo sensivelmente sua vida útil.

Para esses casos podem-se utilizar bombas de acionamento por vapor, que utilizam a própria pressão do vapor como força motriz.

3.5. Isolamento térmico

Observações de campo indicam que cerca de 10% do isolamento que cobrem as linhas de traço de vapor estão danificados ou removidos. A sua remoção ocorre normalmente como consequência de uma troca de trecho de tubulação, sem a devida recolocação do mesmo.

Os trechos de tubulação não isolados apresentam uma perda maior de calor para a atmosfera. Essa parcela de calor pode ser calculada considerando-se as perdas térmicas por convecção e radiação através da Equação 3.4, já que a temperatura da superfície da tubulação é aproximadamente igual à temperatura de operação do fluido, devido à grande condutividade térmica do aço carbono.

$$Q/A = (hc + hr) \cdot (T_e - T_a)$$

Equação 3.4 – Equação para cálculo da perda térmica por convecção e radiação.

Onde,

Q = calor perdido por convecção e radiação;

hc = coeficiente de convecção;

hr = coeficiente de radiação;

Te = temperatura da superfície cilíndrica;

A = área da superfície cilíndrica.

$$hc = 0,48 \cdot k \cdot \left(\frac{\Psi \cdot (Te - Ta)}{Lc} \right)^{0,25}$$

Equação 3.5 – Equação para cálculo do coeficiente de convecção.

Onde,

K = condutividade térmica do ar na temperatura média Tf;

Tf = (Ta+Te)/2;

Ψ = parâmetro de propriedades do ar;

Lc = dimensão característica (no caso de cilindros é o diâmetro externo).

$$hr = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \left[(Te + 273)^2 + (Ta + 273)^2 \right] \cdot (Ta + Te + 546)$$

Equação 3.6 - Equação para cálculo do coeficiente de radiação.

Onde,

E = emissividade da superfície cilíndrica.

Vários tipos de materiais isolantes são disponíveis e o uso de qualquer um deles resulta em considerável redução das perdas de calor. A recuperação destes pontos danificados ou removidos pode proporcionar uma economia de aproximadamente **35%** do calor cedido ao sistema.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a influência de eficiência energética no sistema de traço de vapor em uma refinaria de Petróleo da seguinte forma: avaliando os vazamentos, analisando o sistema de purga, observando os purgadores e as drenagens coletivas. O isolamento térmico dessas linhas e o retorno do condensado gerado por esse sistema também foram discutidos.

A solução dos problemas de vazamentos em linhas de traço de vapor e em purgadores, a recuperação do condensado gerado e a recuperação do sistema de isolamento apontam um ganho energético de aproximadamente 60% referente à redução do consumo de vapor. A Figura 4.1 apresenta a variação da economia de vapor em função das soluções.

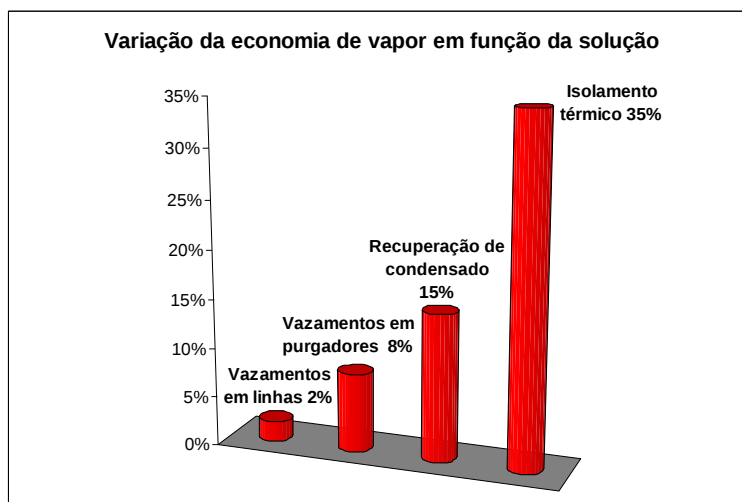


Figura 4.1 – Variação da economia de vapor em função da solução.

Além do ganho energético existem outros ganhos que não foram quantificados neste estudo, conforme mostrado abaixo:

- O novo sistema promoverá uma redução da emissão de gases poluentes resultantes da queima de combustível, inclusive o CO₂, sendo esta redução proporcional à economia de energia;
- Aumento da disponibilidade de vapor e segurança operacional;
- Diminuição da poluição sonora causada pelos ruídos dos vazamentos de vapor da unidade;
- Redução da temperatura ambiente de trabalho pela melhoria de isolamento e extinção de vazamentos;
- Melhoria e diminuição de custos de limpeza da unidade com a redução do descarte de água e assim a quantidade de líquido no solo;
- Redução na poluição visual, já que serão extintos os vazamentos nas linhas de traço de vapor e nos purgadores, além da recomposição do isolamento térmico. O ambiente de trabalho em bom estado de conservação e de higiene potencializa a conscientização dos colaboradores com as questões de saúde e meio ambiente.

O investimento necessário para a realização das melhorias propostas no estudo apresentado tem seu retorno previsto para quatro anos.

5. BIBLIOGRAFIA

SPIRAX-SARCO. *The steam and condensate loop*. Editora Spirax-Sarco, 2007.

TORREIRA R. P. *Isolamento Térmico Frio & Calor*. Editora Fulton, 1980.

Eficiência Energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

Eficiência Energética no Uso de Vapor. Manual Prático. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

WULFINGHOFF, DONALD. *Energy Efficiency Manual*. 1999.

KENNY M. T. *Effective Steam Tracing*. Ashrae Journal. Janeiro de 1999.

TELLES, PEDRO C. SILVA. *Tubulações Industriais*. 10ª Edição.

Norma PETROBRAS N-042. *Projeto de sistema de aquecimento externo de tubulação, equipamento e instrumentação, com vapor*. Revisão D.