

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

NOÇÕES DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE TUBULAÇÕES



contém um

EXTRATO DA BIOGRAFIA DE BENJAMIN FRANKLIN

Professor Paul Fernand Milcent

Segunda Edição (: revista e melhorada :): 2º semestre de 2006

Segunda Reprodução da Segunda Edição (60 cópias): 1º semestre de 2007

SUMÁRIO

Preâmbulo	1
Introdução	2
Formatos e tipos dos isolantes térmicos	2
Isolamento e temperatura de operação	3
Acabamentos (coberturas)	3
Dedução de expressões da taxa (velocidade) de transferência de calor e dos coeficientes globais de transferência	4
Condutividade máxima do material isolante	7
Determinação da espessura econômica do isolamento	8
Determinação da perda de calor pelo isolamento	9
Determinação do custo associado a perda de calor	10
Amortização do custo do isolamento	12
Determinação da espessura ótima	12
Raio crítico do isolamento	12
Exemplo de cálculo da espessura econômica do isolamento	13
Exemplo da determinação do raio crítico do isolamento	18
Determinação da quantidade de calor perdida se não houvesse isolamento	18
Irradiação e isolamento térmico de superfícies	19
Cálculo da espessura mínima do material isolante	20
Isolamento térmico de linhas a baixa temperatura	22
Exemplo numérico de isolamento térmico de linhas a baixa temperatura	23
Proposta de trabalho	27
Sites de interesse	29
Bibliografia	29
Apêndice A – Propriedades do ar seco na pressão atmosférica	30
Apêndice B – Benjamin Franklin	31

PREÂMBULO

O presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de orientar os alunos de graduação do curso de Engenharia Química, da disciplina de Integração III, na realização de parte de suas tarefas.

Todas as notas de rodapé foram extraídas do livro Poor Richard's Almanack, publicado pela Peter Pauper Press e adquirido pelo site www.amazon.com.

A obra se constitui numa coletânea de máximas, levadas ao conhecimento do público norte americano durante os anos nos quais os Almanques foram publicados, pelo bem conhecido sábio, Benjamin Franklin, oriundo da Filadélfia.

Na verdade, Benjamin Franklin não criou todos estes ditos. Segundo ele mesmo, esta é uma sabedoria de muitas épocas e nações.

Por outro lado, tais aforismos foram filtrados pela mente de Franklin e tingidos com a inteligência que tão forte e caracteristicamente marcou o que ele disse e escreveu.

O professor Paul Fernand Milcent é Engenheiro Químico formado pela UFPR e professor desta mesma Universidade desde 1981.

INTRODUÇÃO

¹Homens encontram-se, montanhas nunca.

Quando um sistema está em temperatura maior ou menor que a ambiente, ocorrerão trocas de calor, que poderão alterar sua temperatura e ainda resultarão numa perda de energia. Para reduzir tais efeitos se emprega basicamente uma camada de material de baixa condutividade térmica sobre as superfícies de troca.

O isolante térmico (como também o acústico) incorpora em seu interior uma grande quantidade de pequenas bolhas de gás, evitando sua movimentação e reduzindo assim a transferência de calor por convecção. Como a condutividade térmica do gás é baixa, a condutividade do isolante térmico tenderá a este valor.

A condutividade térmica do gás e conseqüentemente do material isolante varia com a temperatura de trabalho.

A condutividade do isolamento, apesar de poder ser encontrada em livros texto a título de referência, deve ser confirmada junto aos fabricantes.

A condutividade é função também da idade e do conteúdo de umidade do material.

Algumas características desejáveis ou necessárias dos isolantes seriam: resistência às temperaturas as quais será submetido (fusão e combustão); não toxidez; facilidade de aplicação; bom preço; resistência a agentes agressivos e as intempéries e resistência mecânica.

FORMATOS E TIPOS DOS ISOLANTES TÉRMICOS

Para a incorporação do gás, o isolante é basicamente poroso ou fibroso.

Pode ser encontrado na forma de flocos, pó ou fibras soltas, introduzidas entre duas paredes rígidas. Palha de arroz e bagaço de cana se enquadrariam nesta categoria. Também estão nesta classe, os flocos amorfos de lã de rocha, a diatomita e a vermiculita, que preenchem quaisquer espaços que necessitem de isolamento.

Temos ainda os painéis rígidos, semi-rígidos e flexíveis aglomerados com resinas, disponíveis em diferentes densidades, espessuras e dimensões. Podem ser constituídos de lã de rocha, silicato de cálcio e poliestireno e poliuretano expandidos.

Outras alternativas seriam as peças pré moldadas para por exemplo, o isolamento de válvulas e os tradicionais blocos e tijolos.

Para o isolamento térmico de tubulações, assumem particular importância:

Os “one-piece-pipe” que são tubos de material isolante em uma peça única com corte longitudinal em um lado e um semi corte interno do lado oposto. Estão disponíveis em diversas espessuras e são facilmente ajustados ao tubo que se pretende isolar. São indicados digamos ao isolamento de tubos de até 4 in.

Em altas temperaturas se efetua uma construção em dupla camada, visto que o tubo se expande significativamente. Assim o isolamento é efetuado em camadas duplas com juntas escalonadas. Outra alternativa seria a do emprego de tubos bipartidos e segmentados (multi-partidos) que se constituem em segmentos iguais e separados. Seriam a princípio indicados para tubulações com diâmetros nominais de 4 in a 16 in. Tal tipo de isolamento igualmente está disponível comercialmente em diversas espessuras.

Podemos empregar ainda as mantas constituídas de materiais fibrosos, tais como fibra de vidro, fibra de silicato de alumínio e lã de rocha basáltica. Tais mantas podem ser empregadas para o isolamento de tubulações, dutos, flanges, tanques, vasos de pressão, etc.

Por fim podemos citar o cimento expandido, que incorpora grande quantidade de bolhas de gás em seu interior, e que é vertido em molde adequado antes de seu endurecimento.

²Ah! homem simplório. Quando jovem, duas pedras preciosas te foram dadas: Tempo e Bons Conselhos. Uma tu a tendes perdido e a outra, a jogastes fora.

ISOLAMENTO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

Com relação à temperatura da tubulação que se pretende isolar, podemos analisar três casos distintos.

Quando esta temperatura for inferior a 0°C estaremos trabalhando provavelmente com fluidos refrigerantes e eventualmente com câmaras frigoríficas. Lembrando que o ar ambiente contém umidade, o material isolante empregado deve ser completamente impermeável a esta. Caso tal não ocorra, a água cristalizará nos espaços livres. Como a condutividade térmica do gelo é mais de vinte vezes maior que dos isolantes comuns, a capacidade isolante se perderá. O gelo ainda ocupará um espaço crescente no isolamento, que o danificará fisicamente. Seriam isolantes recomendados o poliestireno expandido, a espuma de poliuretano, a fibra de vidro, o cimento expandido e talvez outros materiais impermeáveis tais como aqueles impregnados com resinas repelentes à água.

Caso a temperatura da tubulação esteja ao redor da ambiente podemos empregar lã de vidro; aglomerados de fibras vegetais; materiais plásticos porosos, inclusive em grânulos. Se a temperatura for baixa (menor que a ambiente), deve-se igualmente procurar impedir a absorção de umidade e conseqüente condensação de água. Em temperaturas superiores a ambiente, deve-se procurar impedir a entrada de água líquida e facilitar a saída de vapor.

Para temperaturas elevadas a seleção dos materiais está condicionada a sua resistência térmica. Em casos extremos é muito conveniente confirmar aplicabilidade junto ao fabricante. A princípio temos a disponibilidade da fibra de vidro; lã de rocha basáltica; silicato de cálcio; diatomita e vermiculita. (A diatomita se constitui em fósseis de organismos marinhos. A vermiculita é um tipo de argila.) A tabela 1 abaixo, procura melhor esclarecer o já comentado.

Tabela 1 – Condutividades térmicas de gás, vapor, líquido e sólidos

	temperatura (°C)	k (W/m.K)
ar seco	100	0,032
vapor d'água	46	0,021
vapor d'água	100	0,024
água líquida	30	0,616
gelo	0	2,255
carbonato de cálcio	30	2,255
granito	40	1,743
mármore	20	2,092

ACABAMENTOS (COBERTURAS)

Os acabamentos revestem o material isolante básico. Podem ter a finalidade de oferecer uma barreira à umidade do ambiente, bem como a vapores agressivos e ao tempo; dar um bom aspecto ao isolamento ou conferir-lhe resistência mecânica; dar-lhe proteção ao fogo; minimizar a transferência de calor por radiação no caso de superfícies metálicas mais ou menos polidas, como será discutido posteriormente. Neste último caso, há a opção do emprego de folhas de alumínio, níquel, aço e eventualmente de outros metais.

Podemos ter envoltórios de material plástico ou papel, este último material eventualmente impregnado por asfalto ou outra substância repelente de água. Telas metálicas incorporadas a mantas de material isolante facilitam a sua conformação ao sistema que se pretende isolar.

O isolamento pode ser pintado, recoberto por resinas ou material polimérico.

³Não fale com desrespeito com ninguém, de um escravo a um rei; a moderada abelha tem e usará o ferrão.

A fixação do isolamento na tubulação se faz por aglutinação e ou amarração com arames ou fitas. No caso de blocos, pode-se empregar pinos soldados ou efetuar uniões por meio de encaixes adequados do próprio isolamento.

DEDUÇÃO DE EXPRESSÕES DA TAXA (VELOCIDADE) DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DOS COEFICIENTES GLOBAIS DE TRANSFERÊNCIA.

Para uma melhor compreensão de parte dos tópicos seguintes, passemos a deduzir formalmente as expressões que nos serão úteis, da velocidade de transferência de calor e do coeficiente global de transferência.

Observe a figura 1, que mostra o corte de uma tubulação, recoberta por uma camada de isolamento.

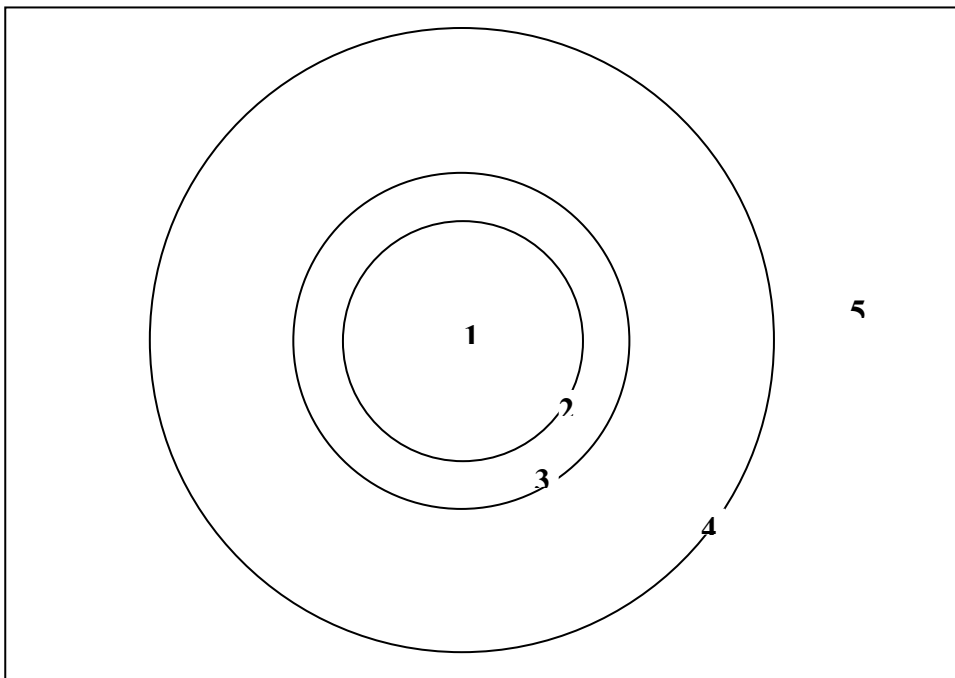


Figura 1 – Corte de uma tubulação isolada

Com respeito a esta figura, os sub índices referir-se-ão:

- 1 – uma região no interior do tubo
- 2 – face interna da parede do tubo
- 3 – face externa da parede do tubo e face interna do isolamento
- 4 – superfície externa do isolamento
- 5 – região onde se encontra o fluido que envolve o isolamento (normalmente ar)

Nas expressões que seguir-se-ão, empregaremos a seguinte simbologia:

- r – raio
- T – temperatura
- k – condutividade térmica
- L – comprimento do tubo
- q – taxa de transferência de calor

⁴Avareza e felicidade nunca se vêem; como podem então se tornar familiares?

A – área de troca de calor

Consideraremos que o fluido quente é aquele contido no interior do tubo. Portanto $T_1 > T_3$ e o calor fluirá de dentro para fora do tubo.

O mecanismo de transferência de calor pela parede do tubo e pelo isolamento é o de condução. Considerando a transferência de calor unidirecional (pelo raio), em regime permanente (sem acúmulo), sem geração de calor pela parede e com condutividade térmica constante, vale a expressão:

$$q = -k.A \frac{dT}{dr} = -k.(2\pi .r.L) \frac{dT}{dr}$$

integrando:

$$q \int_i^e \frac{dr}{r} = -k.2\pi .L \int_i^e dT$$

$$q \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) = -k.2\pi .L.(T_e - T_i) = k.2\pi .L.(T_i - T_e)$$

Assim:

$$q_{2-3} = \frac{2\pi .L.k_{2-3}.(T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}$$

e

$$q_{3-4} = \frac{2\pi .L.k_{3-4}.(T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}$$

A transferência de calor por convecção ocorrerá no fluido no interior do tubo e no fluido que envolve o tubo. A expressão básica da transferência de calor por convecção é:

$$q = h.A\Delta T$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Assim,

$$q_{1-2} = h_{1-2}.A_2.(T_1 - T_2)$$

e

⁵Investigues os outros por suas virtudes; tu mesmo por teus vícios.

$$q_{4-5} = h_{4-5} \cdot A_4 \cdot (T_4 - T_5)$$

Define-se um coeficiente global de troca térmica por meio da seguinte expressão:

$$q_{TOTAL} = A_J \cdot U_J \cdot \Delta T_{TOTAL}$$

onde

q_{TOTAL} – é a taxa total de calor que se transfere

A_J – é a área de troca de referência; a qual se refere U_J

ΔT_{TOTAL} – a diferença de temperatura total considerada

U_J – o coeficiente global de troca térmica

Se considerarmos o $\Delta T_{TOTAL} = T_1 - T_5$, podemos escrever:

$$\Delta T_{TOTAL} = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_4) + (T_4 - T_5)$$

Substituindo as diferenças de temperatura pelas suas respectivas expressões já mostradas, teremos:

$$\frac{q_{TOTAL}}{A_J \cdot U_J} = \frac{q_{1-2}}{h_{1-2} \cdot A_2} + \frac{q_{2-3} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi \cdot L \cdot k_{2-3}} + \frac{q_{3-4} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_5}\right)}{2\pi \cdot L \cdot k_{3-4}} + \frac{q_{4-5}}{h_{4-5} \cdot A_4}$$

Mas neste caso, a transferência de calor se dá em série e não há acúmulo de calor no percurso, assim:

$$q_{TOTAL} = q_{1-2} = q_{2-3} = q_{3-4} = q_{4-5}$$

e se pode simplificar. Além disto a área de referência adotada pode ser a área externa, de modo que:

$$A_J = A_4 = 2\pi \cdot r_4 \cdot L$$

Multiplicando-se todos os termos por esta área e simplificando, teremos:

$$\frac{1}{U_4} = \frac{r_4}{h_{1-2} \cdot r_2} + \frac{r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{2-3}} + \frac{r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_5}\right)}{k_{3-4}} + \frac{1}{h_{4-5}}$$

A taxa de transferência de calor fica sendo dada assim por

$$q = A_4 \cdot U_4 \cdot (T_1 - T_5)$$

$$q' = \frac{2\pi L(T_1 - T_5)}{\frac{1}{h_{1-2} r_2} + \frac{1}{k_{2-3}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_{3-4}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_{4-5} r_4}}$$

⁶Enxerte sempre bons frutos ou não os enxerte de modo algum.

Caso não tivéssemos a camada de isolamento, a dedução nos conduziria à expressão:

$$\frac{1}{U_3} = \frac{r_3}{h_{1-2} \cdot r_2} + \frac{r_3 \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{2-3}} + \frac{1}{h_{3-5}}$$

E a expressão da velocidade de transferência seria:

$$q = A_3 \cdot U_3 \cdot (T_1 - T_5)$$

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_5)}{\frac{1}{h_{1-2} r_2} + \frac{1}{k_{2-3}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{h_{3-5} r_3}}$$

Numa última análise, a temperatura externa do tubo, T_3 , pode ser conhecida. Neste caso não precisamos estimar o coeficiente de transferência de calor no interior do tubo, h_{1-2} . As expressões do coeficiente global e da velocidade de transferência ficam sendo:

$$\frac{1}{U_4^{11}} = \frac{r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_{3-4}} + \frac{1}{h_{4-5}}$$

$$q^{11} = \frac{2\pi \cdot r_4 \cdot L(T_3 - T_5)}{\frac{r_4}{k_{3-4}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_{4-5}}}$$

CONDUTIVIDADE MÁXIMA DO MATERIAL ISOLANTE

Como a área de troca térmica aumenta com a espessura do isolamento sobre uma superfície cilíndrica, há uma condutividade máxima do isolamento a partir da qual não se tem mais efeito isolante.

Caso não se empregue isolamento algum, a expressão da taxa (velocidade) de transferência de calor já foi deduzida e chamada de (q).

Com a aplicação do isolamento, a taxa de transferência de calor passa a ser dada por (q')

Para que se tenha efeito realmente isolante, $q' < q$

Isto acarreta que:

$$\frac{1}{k_{3-4}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_{4-5} r_4} > \frac{1}{h_{3-5} r_3}$$

mas h_{4-5} e h_{3-5} são símbolos para o mesmo coeficiente. Assim temos que:

⁷Palavras podem mostrar a inteligência de um homem, mas ações, as suas intenções.

$$k_{3-4} \left(\frac{r_3 r_4}{\ln \frac{r_4}{r_3}} \right) h_{4-5}$$

Alguma precaução deve ser tomada aqui, pois não se levou em conta o calor transmitido ao ambiente por radiação.

DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA ECONÔMICA DO ISOLAMENTO

Se uma tubulação conduzir um fluido em temperatura inferior aquela reinante em seu exterior, o fluido frio se aquecerá. Caso contrário, se a linha conduzir um fluido em temperatura superior a externa, haverá uma perda de calor do fluido para o meio externo que por sua vez pode ser convertida num desperdício de recursos financeiros.

Para evitar, ou melhor, reduzir tais trocas de calor, que acarretam também na alteração da temperatura do fluido, se efetua o isolamento térmico das tubulações.

No caso da condução de um fluido quente, quanto maior for a espessura do isolamento, menor será a quantidade de calor perdida e também menor a quantidade de dinheiro desperdiçado correspondente a esta perda. Caso só esta variável seja analisada, se poderá concluir que o melhor seria empregar-se um isolamento de espessura infinita, zerando-se assim a perda de calor.

Porém, por outro lado, o isolamento tem um custo; exige um investimento inicial. Tal investimento deve ser reembolsado para o industrial num determinado período de tempo de amortização do capital, com algum juro. Num caso extremo, este período de amortização será o tempo de vida útil do isolamento ou o tempo de vida útil da própria instalação industrial.

É fácil observar que as despesas aumentam com o aumento da espessura do isolamento. Dependem ainda do custo do acabamento empregado e das despesas de colocação do isolante.

Estas duas funções variam de forma inversa, de tal forma que o custo total, obtido pela soma do custo do isolamento com o custo da perda de calor, (calculados para um determinado período de tempo de operação da instalação,) apresentará um mínimo. A espessura econômica, como calculada tradicionalmente, é a espessura do isolamento correspondente a este custo mínimo.

A figura 2 ilustra o que foi dito. A espessura econômica não precisa coincidir no valor da abscissa correspondente ao ponto de intersecção do custo da perda de calor com o custo do isolamento.

⁸Mantenha tua profissão e tua profissão te manterá.

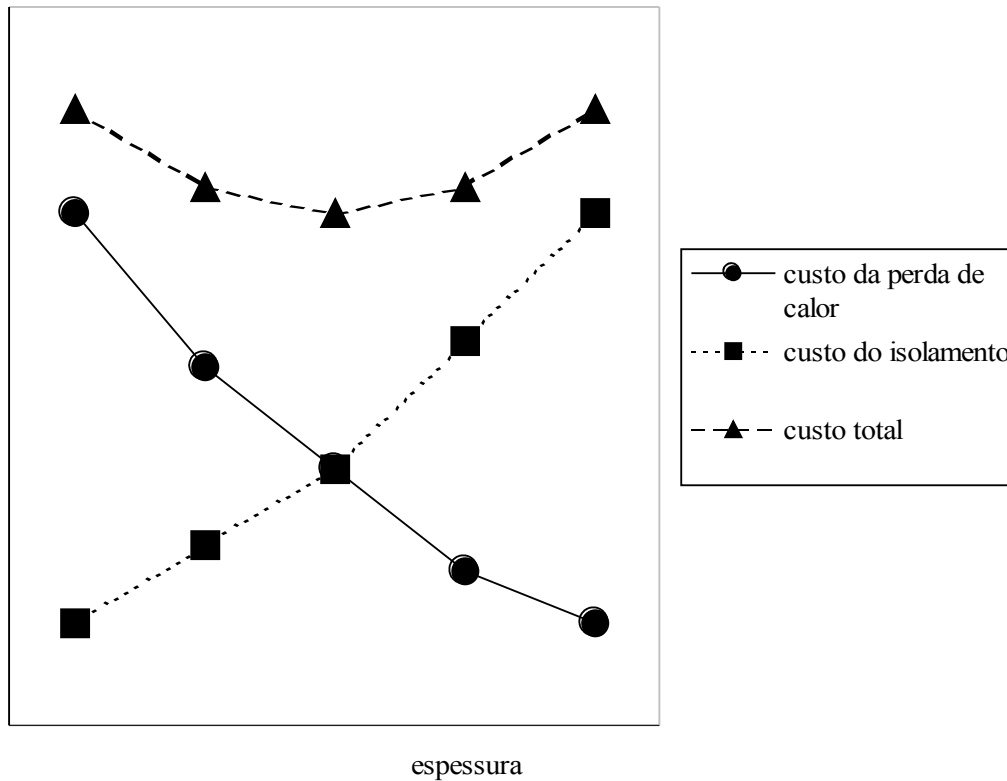


Figura 2 – Comportamento qualitativo dos custos relacionados à espessura do isolamento.

DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CALOR PELO ISOLAMENTO

A equação básica da taxa de transferência de calor é dada por:

$$q = AU\Delta T$$

Consideraremos a título de simplificação a temperatura da parede, T_3 , conhecida.

A área de troca térmica é dada por:

$$A = 2\pi r_4 L$$

O coeficiente global de troca térmica em relação ao raio externo do isolamento, considerando condução e convecção (ignorando radiação) já foi deduzido e é dado por:

$$\frac{1}{U_4^{11}} = \frac{r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_{3-4}} + \frac{1}{h_{4-5}}$$

Para a estimativa do coeficiente de transmissão de calor por convecção existem várias equações na literatura técnica.

Através de HOLMAN e ainda de outros autores, obtemos para convecção livre por cilindros longos horizontais a equação dita de Churchill e Chu:

⁹Aquele que se afasta do casamento, ou se iludirá ou será iludido.

$$Nu^{1/2} = 0,60 + 0,387 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{+16/9}} \right)^{1/6}$$

para $10^{-5} < Gr \cdot Pr < 10^{12}$

onde

$$Nu = h \cdot d / k$$

$$Pr = cp \cdot \mu / k$$

$$Gr = g \cdot \beta (T_e - T_\infty) d^3 / \nu^2$$

$$\nu = \mu / \rho$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

e onde T_f é a temperatura do filme e está em Kelvin.

Para convecção livre em ar tranqüilo e parede cilíndrica longa horizontal, autores citados na bibliografia fornecem as seguintes expressões:

$$h = 1,24 \Delta T^{1/3} \quad \text{para } 10^9 < aL^3 \Delta T < 10^{12}$$

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} \quad \text{para } 10^3 < aL^3 \Delta T < 10^9$$

$$\text{Onde: } a = \frac{cp \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta}{\mu \cdot k} \quad \text{e } L = \text{diâmetro}$$

DETERMINAÇÃO DO CUSTO ASSOCIADO A PERDA DE CALOR

Determinada a taxa de transferência de calor, se calcula a quantidade de calor perdida, para cada espessura, num dado período de tempo de referência, digamos um ano. Em seguida se converte esta perda de energia em perda de capital.

Se a fonte de energia é oriunda de um combustível que será queimado, tal conversão pode ser facilmente efetuada com a determinação do poder calorífico do combustível e do seu preço.

Caso a indústria empregue a energia elétrica como fonte de energia, a perda de energia pela tubulação multiplicada pelo preço da energia nos dará a quantidade de recursos desperdiçados..

Se definirmos a eficiência de um gerador de vapor como:

$$\eta = \frac{\text{energia _ conduzida _ pelo _ vapor _ gerado}}{\text{energia _ cedida}}$$

¹⁰A esperança e um trapo vermelho são iscas para homens e cavalinhas.

teremos uma eficiência muito próxima de 100% quando do uso da energia elétrica. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (2006), o preço da energia para a indústria na região sul é de aproximadamente R\$ 0,190/KWh. No caso de um gerador de vapor operando pela queima de um combustível, a expressão da eficiência é a mesma, isto é:

$$\eta = \frac{\text{energia_conduzida_pelo_vapor_gerado}}{\text{energia_cedida_pela_queima_do_combustivel}}$$

No entanto esta só ultrapassará em pouco a 90% e mesmo assim quando do emprego de geradores de vapor aquatubulares de grande porte.

O poder calorífico inferior do gás natural depende de sua composição (principalmente metano), mas no Brasil deve estar ao redor de 8600 Kcal/Normais m³. Como a densidade do ar, dada pela lei dos gases é de aproximadamente 1,2 Kg/m³, temos um PCI \cong 7200 Kcal/Kg \cong 30150 KJ/Kg

Porém, 1 KJ = 1 KJ.s/s = 1 KW.s = 1 KW.s.h/3600 s = 1 KW.h/3600 = 2,78 x 10⁻⁴ KWh

Assim para o gás natural, o PCI \cong 30150 KJ/Kg \cong 8,37 KWh/Kg

O preço do gás natural deve estar, segundo a Agência Nacional de Petróleo (2006), ao redor de R\$ 160,00 / 1000 Normais m³ ou \cong R\$ 0,133 /Kg

Assim:

Preço/PCI = R\$ 0,133/Kg / 8,37 KWh/Kg \cong R\$ 0,016 / KWh

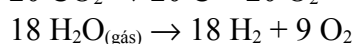
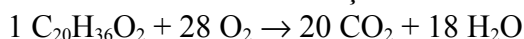
Como a eficiência do aproveitamento da energia liberada na queima do combustível pode ser considerada, $\eta \cong 0,92$, o custo da energia oriunda da queima do gás natural deve estar ao redor de:

R\$ 0,016/KWh / 0,92 \cong R\$ 0,017/KWh

Toda esta avaliação de custos pode ser bastante afetada se considerarmos outros fatores tais como os impostos envolvidos, praticidade de uso e fatores ambientais.

Como último exemplo na discussão dos custos associados à perda de calor, analisemos o biodiesel como alternativa energética. Esta substância é obtida por esterificação, pela reação de ácidos graxos com o álcool etílico, no caso do Brasil.

O poder calorífico inferior do biodiesel igualmente dependerá de sua composição. Considerando que a fórmula representativa seja H₃₁C₁₈OOC₂H₅, podemos estimar seu poder calorífico inferior por meio dos calores de formação.



$$\Delta H_c = 20 \times 94,052 \text{ Kcal/gmol}$$

$$\Delta H_c = 18 \times 57,798 \text{ Kcal/gmol}$$

$$\therefore \Delta H_c = - [20 \times 94,052 + 18 \times 57,798] \text{ Kcal/gmol}$$

$$\therefore \text{PCI} \cong 2900 \text{ Kcal/gmol ou } 2900 \times (1/280 \text{ gmol/g}) \cong 10,36 \text{ Kcal/g}$$

ou ainda, PCI \cong 10300 Kcal/Kg \cong 43100 KJ/Kg \cong 12,0 KWh/Kg

¹¹Faz um inimigo, quem faz uma zombaria.

Salvo melhor entendimento, a mesma metodologia aplicar-se-á aos demais casos.

AMORTIZAÇÃO DO CUSTO DO ISOLAMENTO

Determina-se o preço do isolamento conforme a espessura do mesmo. Determina-se o preço do acabamento selecionado e se possível o preço da colocação. A soma destes preços será considerada o preço total do isolamento. Finalmente se divide este preço pelo período no qual o capital deverá ser reembolsado ao investidor.

DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA ÓTIMA

Faz-se o cálculo acima delineado sucessivas vezes para diferentes espessuras de isolamento. Traça-se o gráfico e determina-se onde o custo total passa por um mínimo. Esta será a espessura econômica do isolamento.

RAIO CRÍTICO DO ISOLAMENTO.

Se traçarmos um gráfico referente a taxa de transferência de calor em função do raio do isolamento, veremos que tal função passa por um máximo. O raio crítico do isolamento é o raio no qual a perda de calor é máxima. Isto é, há condições para pequenas espessuras de isolamento, nas quais se perde mais calor com o equipamento isolado do que sem isolamento. Este fenômeno se deve ao aumento da área de troca térmica com o aumento do diâmetro da tubulação isolada.

Supondo a transferência de calor por condução e convecção (sem radiação), a equação fica:

$$q^{11} = \frac{2\pi \cdot r_4 \cdot L(T_3 - T_5)}{\frac{r_4}{k_{3-4}} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_{4-5}}}$$

Fazendo:

$$\frac{dq}{dr_4} = 0$$

temos o máximo da função que é a expressão do raio crítico:

$$rc = k_{3-4} / h_{4-5}$$

EXEMPLO DE CÁLCULO DA ESPESSURA ECONÔMICA DO ISOLAMENTO

Como vimos, a perda de recursos financeiros diminui a medida que aumenta a espessura do isolamento aplicado a uma tubulação. Por outro lado os recursos despendidos aumentam a medida que a espessura de isolamento utilizado aumenta. A soma destas duas funções assim resulta numa terceira que passa por um mínimo. Este mínimo é o que se entende por espessura econômica do isolamento.

¹²A desconfiança pode não ser uma falha, mas exibi-la pode ser uma grande.

Vamos supor a título de exemplificação que temos uma linha de vapor d'água de 3/4 in, conduzindo vapor a 2 atm manométricas. Consideremos que esta linha esteja exposta ao ar tranqüilo na temperatura ambiente de 20 °C, tenha um comprimento de 30 m e esteja disposta na horizontal. Consideremos ainda que a energia utilizada pela indústria seja a elétrica e que esta custe R\$ 0,19 /KWh.

Consultando uma tabela de vapor teremos que a temperatura do vapor é de 132,9 °C.

Consideraremos ser esta a temperatura da parede T_3

Para esta faixa de temperatura podemos selecionar o isolante na forma de tubos bipartidos de lã de vidro da Isover Saint-Gobain, com acabamento na forma de chapa corrugada de alumínio.

A temperatura média do isolamento pode ser considerada como sendo: $\frac{132,9 + 20}{2} = 76,5$

Consultando o catálogo observaremos que a condutividade térmica do isolamento para esta temperatura é de $k = 0,037 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Um representante poderá nos informar que o preço do isolamento é de R\$ 0,4624 / mm de espessura / m de comprimento. O preço da chapa corrugada de alumínio é de R\$ 34,00/ m².

O diâmetro do tubo antes do isolamento é $d = 3/4 \text{ in} = 0,01905 \text{ m}$, ou seja, $r_3 = 0,01905 / 2 \text{ m}$

O diâmetro econômico do isolamento se faz através de cálculos repetitivos para diferentes espessuras. Efetuemos as operações referentes a uma espessura do isolamento de 1 in.

Espessura do isolamento de 1 in.

Determinação da taxa de calor perdida e o custo, a esta taxa associado.

Neste caso o diâmetro e o raio externo da tubulação ficarão:

$$d_4 = 3/4 \text{ in} + 2 \times 1 \text{ in} = 0,06985 \text{ m}$$

$$r_4 = d_4/2 = 0,03493 \text{ m}$$

O calor ao passar da região 3 para a região 5, é transferido por condução de 3 para 4 e por convecção livre de 4 para 5. Como vimos, as seguintes expressões são válidas:

$$q_{3-4} = \frac{2\pi \cdot L \cdot k_{3-4} \cdot (T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}$$

$$q_{4-5} = h_{4-5} \cdot A_4 \cdot (T_4 - T_5) = h_{4-5} \cdot 2\pi \cdot r_4 \cdot L \cdot (T_4 - T_5)$$

Mas o calor se transfere neste caso em série, de forma que:

$$q_{\text{TRANSFERIDO}} = q_{3-4} = q_{4-5}$$

Ou seja,

$$\frac{k_{3-4} \cdot (T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} = h_{4-5} \cdot r_4 \cdot (T_4 - T_5)$$

¹³O tempo é uma erva que cura todas as doenças.

Como $k_{3,4}$ já foi estimado, temos ainda duas incógnitas: a temperatura da superfície externa do isolamento T_4 e o coeficiente de convecção natural $h_{4,5}$, que depende da temperatura do filme de ar que envolve o isolamento. Para determinarmos T_4 e portanto a quantidade de calor perdida, é necessário a princípio o emprego de um procedimento de tentativas.

Estimando $h_{4,5} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\frac{0,037 \cdot (132,9 - T_4)}{\ln\left(\frac{0,03493}{0,01905/2}\right)} = 10 \times 0,03495 \cdot (T_4 - 20)$$

Assim, $T_4 = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Agora podemos confirmar ou não a estimativa de $h_{4,5}$

As propriedades do ar na temperatura média de $(28,5 + 20)/2 \cong 25^\circ\text{C}$, podem ser consideradas como:

$$c_p = 1005 \text{ J/Kg.K}$$

$$\rho = 1,2045 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 182 \cdot 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\beta = 1/T \text{ (em K)} = 1/298 \text{ K}^{-1}$$

$$k = 25,7 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$$

Assim,

$$v = \mu / \rho = 182 \times 10^{-7} / 1,2045 \quad \therefore \quad v = 15,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Gr = g \cdot \beta \cdot (T_e - T_\infty) d^3 / v^2 = 9,81 \cdot 1/298 \cdot (28,5 - 20) \cdot 0,06985^3 / (15,11 \times 10^{-6})^2 = 4,18 \times 10^5$$

$$Pr = c_p \cdot \mu / k = 1005 \cdot 1,82 \times 10^{-5} / 0,0257 = 0,712$$

$$10^{-5} < Gr \cdot Pr = 4,18 \times 10^5 \cdot 0,712 = 2,98 \times 10^5 < 10^{12}$$

Desta forma podemos empregar a equação de Churchill e Chu, para convecção livre por cilindros longos horizontais:

$$Nu^{1/2} = 0,60 + 0,387 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}\right]^{16/9}} \right)^{1/6}$$

$$Nu^{1/2} = 3,23 \quad \therefore \quad Nu = 10,41$$

$$h = Nu \cdot k / d = 10,41 \cdot 0,0257 / 0,06985 = 3,8 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Ou então, com a equação aproximada para o ar,

¹⁴Um falso amigo e uma sombra estão presentes apenas enquanto o sol brilha.

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{28,5 - 20}{0,07} \right)^{1/4} \quad \therefore \quad h = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Como o $h_{4,5}$ estimado e o calculado não foram muito coincidentes, é conveniente realizar nova estimativa. Estimando $h_{4,5} = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\frac{0,037 \cdot (132,9 - T_4)}{\ln \left(\frac{0,03493}{0,01905 / 2} \right)} = 4 \cdot 0,03495 \cdot (T_4 - 20)$$

Desta forma, $T_4 = 39,1 \text{ }^\circ\text{C}$

A temperatura média do filme de ar passa a ser $(39,1 + 20)/2 \cong 30^\circ\text{C}$. Considerando que as propriedades médias do ar praticamente não se alteram, em relação aquelas consideradas nos cálculos anteriores, e com $\beta = 1 / (273 + 30)$:

$$Gr = g \cdot \beta \cdot (T_e - T_\infty) d^3 / \nu^2 = 9,81 \cdot 1 / 303 \cdot (39,1 - 20) \cdot 0,06985^3 / (15,11 \times 10^{-6})^2 = 9,23 \times 10^5$$

$$10^{-5} < Gr \cdot Pr = 9,23 \times 10^5 \cdot 0,712 = 6,57 \times 10^5 < 10^{12}$$

Desta forma podemos empregar a equação de Churchill e Chu, para convecção livre por cilindros longos horizontais:

$$Nu^{1/2} = 0,60 + 0,387 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6}$$

$$Nu^{1/2} = 3,60 \quad \therefore \quad Nu = 12,9$$

$$h = Nu \cdot k / d = 12,9 \cdot 0,0257 / 0,06985 = 4,7 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Ou então, com a equação aproximada para o ar,

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{39,1 - 20}{0,07} \right)^{1/4} \quad \therefore \quad h = 5,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

A princípio podemos considerar que não necessitamos de novas iterações e assumir $h_{4,5} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ e:

$$\frac{0,037 \cdot (132,9 - T_4)}{\ln \left(\frac{0,03493}{0,01905 / 2} \right)} = 5 \cdot 0,03495 \cdot (T_4 - 20)$$

Assim, $T_4 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$

¹⁵Após perdas e infortúnios, os homens crescem mais humildes e sábios.

Empregando como acabamento uma superfície polida, salvo melhor juízo, podemos ignorar a perda de calor por radiação.

Desta forma o coeficiente global de transferência de calor é dado por:

$$\frac{1}{U} = \frac{r_4}{k_{3-4}} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{h_{4-5}} = \frac{0,03493}{0,037} \ln \frac{0,06985}{0,01905} + \frac{1}{5,0} = 1,43 \quad \therefore U_4 = 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Como o comprimento do tubo foi fixado em 30 m , a área de troca será :

$$A_4 = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0,034925 \cdot 30 = 6,58 \text{ m}^2$$

A quantidade de calor perdida é então calculada por:

$$q = A U \Delta T = 6,58 \cdot 0,70 \cdot (132,9-20) = 520 \text{ W} \cong 0,52 \text{ KW}$$

Em uma hora serão gastos : $q' = 0,52 \text{ KWh}$

Um ano tem 8760 horas. No entanto nem todo este tempo é normalmente empregado como tempo útil numa instalação industrial. Supondo que são trabalhadas 8000 horas em um ano, teremos:

$$q'' = 0,52 \cdot 8000 = 4160 \text{ KWh perdidas em um ano}$$

Como o preço da energia foi fixado em R\$ 0,19 / KWh ,

$P_1 = 4160 \cdot 0,19 = \text{R\$ } 790,40$ de recursos ainda desperdiçados em um ano de operação, se o isolamento empregado for de 1 in de espessura.

Determinação do preço do isolamento.

Para a espessura de 1 in $\cong 25 \text{ mm}$ teremos, se considerarmos o preço do isolamento como R\$ 0,4624 /mm/m = R\$ 11,56 /m

O preço da chapa de alumínio corrugado pode ser estimado em R\$ 34,00 /m²

A quantidade necessária de acabamento pode ser estimada por:

$$A = L \cdot \pi \cdot (D+0,013) \quad \text{ou} \quad A/L = \pi \cdot (D+0,013)$$

onde o fator 0,013 m tenta levar em conta a sobreposição de parte da chapa no enrolamento.

Assim para $d_4 = 0,06985 \text{ m}$

$$A/L = \pi (0,06985+0,013) = 0,26 \text{ m}^2/\text{m}$$

O que resulta num preço de: $\text{R\$ } 34,00/\text{m}^2 \times 0,26 \text{ m}^2/\text{m} = \text{R\$ } 8,85 / \text{m}$

Desta forma podemos considerar o preço total como: $\text{R\$ } 11,56/\text{m} + \text{R\$ } 8,85/\text{m} = \text{R\$ } 20,41/\text{m}$

¹⁶Aquele que produz a si mesmo, é mais sábio do que o que produz livros.

Não conhecemos o custo envolvido com a colocação do isolamento, portanto neste exemplo vamos ignorar este valor.

Em 30 m de tubo, $30 \times 20,41 = \text{R\$ } 612,30$

Tal quantia investida pelo industrial deverá a ele retornar com juros num determinado período de tempo. Supondo que este tempo seja fixado em 1 ano,
 $P2 = \text{R\$ } 612,30 / 1 = \text{R\$ } 612,30$

Assim para a espessura de 1 in, a soma do custo referente a perda de energia mais o custo referente a amortização do isolamento será: $PT = P1 + P2 = \text{R\$ } 790,40 + \text{R\$ } 612,30 = \text{R\$ } 1402,70$

Custos para outras espessuras de isolamento

Para a determinação do ponto de mínimo, precisamos repetir os cálculos para outras espessuras. A título de exemplo, efetuamos os cálculos para as espessuras de 50 mm e 13 mm.

Os resultados obtidos se encontram na tabela 2:

Tabela 2- Quadro demonstrativo do exemplo numérico da determinação da espessura econômica do isolamento.

ESPESSURA (mm)	h_{4-5} (W/m ² K)	T_4	P1 (R\$)	P2 (R\$)	PT (R\$)
	\cong	\cong			
0	11,6	132,9	3572,00	0,00	3572,00
13	6,5	45	1094,40	364,50	1458,90
25	5,0	36	790,40	612,30	1402,70
50	3,9	29	592,80	1123,20	1716,00

A segunda linha se refere a uma tubulação não isolada, o que será discutido posteriormente. Como esperado, o desperdício de energia diminui com a espessura do isolamento enquanto o valor necessário à amortização aumenta. Observamos também que neste cálculo, a função passa por um mínimo, com a espessura ao redor de 25 mm que é a resposta do exemplo, isto é, é a espessura econômica de isolamento para o caso estudado.

EXEMPLO DA DETERMINAÇÃO DO RAIOS CRÍTICO DO ISOLAMENTO

É o raio no qual a perda de calor é máxima.

Supondo a transferência de calor por condução e convecção (sem radiação), a taxa de transferência de calor é dada pela expressão:

$$q = \frac{2\pi \cdot L \cdot (T_3 - T_5)}{\frac{\ln r_4 / r_3}{k_{3-4}} + \frac{1}{r_4 \cdot h_{4-5}}}$$

fazendo $\frac{dq}{dr_4} = 0$, teremos o máximo da função que é dado por $rc = k_{3-4} / h_{4-5}$

¹⁷Limpe seu dedo antes de apontar as minhas manchas.

Para a espessura do isolamento de 25 mm, o coeficiente de transferência de calor por convecção, conforme o exemplo anterior, é dado por $h \cong 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

$$\text{Assim } rc = k_{3-4} / h_{4-5} = 0,037 / 5,0 = 7,4 \cdot 10^{-3} \quad \therefore rc = 7,4 \text{ mm}$$

Observe que este resultado é aproximado pois o coeficiente de transferência de calor é estimado e varia com o raio.

DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CALOR PERDIDA SE NÃO HOUVESSE ISOLAMENTO

Como a condutividade térmica de metais é alta, podemos desprezar a resistência devida a condução pela parede. Assim a taxa de transferência de calor será dada aproximadamente por:

$$q = A U \Delta T = A_3 \cdot h_{3-5} \cdot (T_3 - T_5)$$

e a temperatura da parede é $132,9^\circ\text{C}$.

As propriedades do ar na temperatura média de $(132,9+20)/2 \cong 76^\circ\text{C}$ podem ser consideradas:

$$c_p = 1009 \text{ J/Kg.K}$$

$$\rho = 0,9950 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 208,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\beta = 1/T \text{ (em K)} = 1/349 \text{ K}^{-1}$$

$$k = 30 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$$

Pelo problema anterior, agora para o diâmetro de 0,01905 m:

$$aL^3 \Delta T = \frac{c_p \cdot \rho^2 \cdot g \beta D^3 (T_i - T_w)}{\mu k} = \frac{1009 \cdot 0,995^2 \cdot 9,81 \cdot 1 / 349 \cdot 0,01905^3 \cdot (132,9 - 20)}{208,2 \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 10^{-3}}$$

$$\therefore aL^3 \Delta T = 3,50 \cdot 10^4 \text{ que está compreendido entre } 10^3 < aL^3 \Delta T < 10^9$$

$$\text{Assim } h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{(132,9 - 20)}{0,01905} \right)^{1/4} = 11,58 \quad \therefore h = 11,58 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A = \pi dL = \pi \cdot 0,01905 \cdot 30 = 1,80 \text{ m}^2$$

$$q = 1,80 \text{ m}^2 \cdot 11,58 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot (132,9 - 20)^\circ\text{C} = 2353 \text{ W}$$

$$\text{Em uma hora, } q' = 2,35 \text{ KWh}$$

$$\text{Em 8.000 horas de trabalho por ano, teremos a perda de } q'' = 18.800 \text{ KWh / ano}$$

$$\text{Com o preço da energia em R\$ } 0,19 \text{ /KWh, } P = 0,19 \cdot 18.800 = \text{R\$ } 3572,00 \text{ / ano}$$

¹⁸Arrancar pela raiz a cada ano um hábito vicioso, em tempo fará um homem ruim, inteiramente virtuoso.

IRRADIAÇÃO E ISOLAMENTO TÉRMICO DE SUPERFÍCIES

No caso de sistemas que se encontram em temperaturas elevadas, as perdas por irradiação podem ser muito mais importantes que as perdas por convecção.

Considerando a transferência de calor entre duas superfícies, é válida a expressão abaixo:

$$q/A = F_E F_A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

onde:

q = taxa de transferência de calor por radiação

A = superfície de troca térmica da fonte emissora

F_E = fator de emissão que é função de emissividades tabeladas do emissor e do receptor e das configurações das superfícies

F_A = fator geométrico

σ = constante de Stefan- Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

T_1 e T_2 = temperaturas absolutas dos corpos.

Quando toda a energia deixando um meio, alcança o outro, $F_A=1$. Este é o caso, por exemplo, de esferas concêntricas.

Para o caso de corpo emissor completamente envolvido, sendo pequeno em relação ao corpo envolvente, $F_A = 1$ e $F_E = \epsilon_1$

Onde

ϵ_1 = emissividade da superfície emissora.

A equação fica conseqüentemente,

$$q/A = \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Superfícies metálicas brilhantes tem emissividades extremamente reduzidas. A título de ilustração, observe a tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades termofísicas de metais

Metal	t (°C)	k (W/m.K)	ϵ
alumínio polido	0-400	202-250	0,04-0,06
alumínio comercial			0,07-0,09
alumínio oxidado			0,2-0,3
cobre polido	0-600	385-350	0,02-0,04
cobre comercial			0,1-0,2

¹⁹Aquele que derrama o rum, perde somente a este. O que o bebe, freqüentemente perde este e a si mesmo.

ferro (C=0,4%) polido	0-1000	52-35	0,2-0,25
ferro oxidado			0,55-0,65
níquel polido	0-400	93-59	0,05-0,07
níquel oxidado			0,35-0,49
aço (C=1%) polido	0-1000	43-28	0,07-0,17
aço (Cr=1%) polido	0-1000	62-33	0,07-0,17
zinco polido	0-400	112-93	0,02-0,03
zinco oxidado			0,10-0,11
zinco galvanizado			0,2-0,3

Pelo comportamento do coeficiente de emissão, se conclui que a superfície do isolamento eventualmente empregado poderá ter uma emissão de energia superior à da superfície da parede do tubo, caso este não seja isolado, e assim irradiar mais calor mesmo que esteja com uma menor temperatura superficial. Ou seja, pode-se perder mais calor com uma tubulação isolada do que com uma tubulação sem isolamento. Isto devido ao efeito da radiação e particularmente verdadeiro em altas temperaturas.

Num cálculo rigoroso cabe portanto se determinar a espessura mínima necessária do isolamento para evitar que tal fenômeno ocorra.

Para se determinar a quantidade de calor perdida por uma tubulação levando em conta a radiação, se considera as perdas de calor por convecção e radiação ocorrendo em paralelo a partir da superfície do isolamento. Para isto um processo de tentativas é necessário, pois se desconhece a princípio a temperatura da superfície.

É fácil de compreender que se revestirmos o isolamento com um material razoavelmente brilhante, estaremos minimizando a perda por radiação.

CÁLCULO DA ESPESSURA MÍNIMA DO MATERIAL ISOLANTE

Consideremos uma tubulação a 132,9°C , de 3/4 in (D = 0,01905 m) , com comprimento de 30 m , de aço inoxidável polido, com emissividade de 0,07.

A condutividade térmica do isolante será considerada como sendo de 0,037 W/m.°C e sua emissividade, de 0,9. Neste caso não se está empregando cobertura metálica.

A temperatura do ambiente será considerada igual a 20°C e se deseja saber a espessura mínima do isolamento para que este realmente torne a perda de calor menor.

Determinando as perdas de calor por convecção e radiação, para o tubo sem isolamento:

$$hc = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{132,9 - 20}{0,01905} \right)^{1/4} = 11,58 \quad \therefore hc = 11,58 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot 0,01905 \cdot 30 = 1,8 \text{ m}^2$$

$$q_c = h \cdot A \cdot \Delta T = 11,58 \cdot 1,8 \cdot (132,9 - 20) = 2353,3 \text{ W}$$

$$q_r = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) = 0,07 \cdot 1,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (406,1^4 - 293,2^4) = 141,9 \text{ W}$$

$$q_{\text{TOTAL}} = q_c + q_r = 2495,2 \text{ W}$$

Variando a espessura do isolamento, varia a temperatura da face externa, de forma que também varia o coeficiente de convecção e a taxa de transferência de calor por radiação. O processo adotado

²⁰Evite o ganho desonesto; nenhum preço pode recompensar as angústias do vício.

será de tentativa e erro, estimando-se a temperatura da superfície do isolamento. Para simplificar, consideremos constante o diâmetro do tubo e válida para todo o intervalo, a equação do coeficiente de transferência de calor já empregada.

Supondo a temperatura da face externa, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$hc = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{50 - 20}{0,01905} \right)^{1/4} = 8,32 \quad \therefore hc = 8,32 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$qc = h.A.\Delta T = 8,32 \cdot 1,8 \cdot (50 - 20) = 449,3 \text{ W}$$

$$qr = \varepsilon.A.\sigma.(T_1^4 - T_2^4) = 0,9 \cdot 1,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (323,2^4 - 293,2^4) = 323,4 \text{ W}$$

$$q_{\text{TOTAL}} = qc + qr = 772,7 \text{ W}$$

Supondo a temperatura da face externa, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$hc = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{100 - 20}{0,01905} \right)^{1/4} = 10,6 \quad \therefore hc = 10,6 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$qc = h.A.\Delta T = 10,6 \cdot 1,8 \cdot (100 - 20) = 1530,2 \text{ W}$$

$$qr = \varepsilon.A.\sigma.(T_1^4 - T_2^4) = 0,9 \cdot 1,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (373,2^4 - 293,2^4) = 1103,0 \text{ W}$$

$$q_{\text{TOTAL}} = qc + qr = 2633,2 \text{ W}$$

Desejamos conhecer o caso limite no qual as perdas com a parede isolada e sem isolamento são iguais.

Aplicando o método de convergência das secantes:

Quando $t = 132,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\varepsilon = 0,07$) , $q_{\text{total}} = 2495,2 \text{ W}$

Quando $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\varepsilon = 0,9$) , $q_{\text{total}} = 772,7 \text{ W}$

Quando $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ($\varepsilon = 0,9$) , $q_{\text{total}} = 2633,2 \text{ W}$

$$\text{Assim: } \frac{2633,2 - 772,7}{100 - 50} = \frac{2633,2 - 2495,2}{100 - t} \quad \therefore t = 96,3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Confirmando:

$$hc = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{96,3 - 20}{0,01905} \right)^{1/4} = 10,5 \quad \therefore hc = 10,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$qc = h.A.\Delta T = 10,5 \cdot 1,8 \cdot (96,3 - 20) = 1442,1 \text{ W}$$

$$qr = \varepsilon.A.\sigma.(T_1^4 - T_2^4) = 0,9 \cdot 1,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (369,5^4 - 293,2^4) = 1033,4 \text{ W}$$

²¹É um bem gasto centavo que poupa um real.

$q_{\text{TOTAL}} = q_c + q_r = 2475,5 \text{ W}$ que é uma boa aproximação.

Finalmente lembremos que a quantidade de calor perdida pela superfície por radiação e convecção é igual a quantidade de calor que atravessou o isolamento.

A taxa de transferência de calor por condução (para uma parede plana) é dada por:

$$\frac{q}{A} = \frac{k \Delta T}{x}$$

onde

x = espessura da parede.

Assim:

$$\frac{2495,2}{1,8} = 0,037 \cdot (132,9 - 96,3) / x$$

e

$$x = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm},$$

que seria a espessura mínima necessária. Tal dimensão por certo seria mais expressiva para maiores temperaturas da parede.

ISOLAMENTO TÉRMICO DE LINHAS A BAIXA TEMPERATURA

Apesar de menos freqüente, setores da indústria poderão operar em temperaturas inferiores a ambiente. Seriam alguns exemplos:

- Fracionamento por compressão por liquefação em temperatura inferior a temperatura crítica de oxigênio e nitrogênio a cerca de - 190°C.
- Purificação de hidrogênio a cerca de 20 atm e - 180°C por absorção com metano líquido para a remoção do nitrogênio e do monóxido de carbono e com propano líquido para a remoção do metano.
- Obtenção de hélio líquido a cerca de - 270°C.
- Fabricação de sorvetes a cerca de - 5°C com o auxílio de fluidos refrigerantes a menor temperatura.
- Estocagem de carnes a cerca de - 20°C em câmaras frigoríficas.
- Congelamento rápido de carnes por imersão em fluidos refrigerantes a cerca de - 40°C.

O ciclo de refrigeração envolve compressão que por sua vez consome energia. Isto é, há um custo envolvido com a geração de frio. Assim, de modo análogo ao já visto, pode-se converter a absorção de calor do meio num dispêndio de recursos financeiros. Também da mesma forma como já mencionado, do ponto de vista técnico, a elevação da temperatura do sistema pode prejudicar ou inviabilizar o processo.

A condutividade térmica do material isolante selecionado continua sendo dada pelo seu fabricante.

²²Um bom exemplo é o melhor sermão.

O coeficiente de transferência de calor por convecção do ar ambiente pode ser estimado por várias equações constantes na bibliografia especializada, inclusive pela equação de Churchill e Chu já vista. Isto é, tal equação é válida para estimativas tanto no aquecimento quanto no resfriamento de cilindros.

Salvo melhor entendimento, uma observação especial deve ser efetuada na temperatura da superfície do isolamento para evitar a formação de gelo.

EXEMPLO NUMÉRICO DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE LINHAS A BAIXA TEMPERATURA

Consideremos um tubo de diâmetro de 7 in, na temperatura de - 130 °C imerso em ar a 20 °C. Calculemos, a título de exemplificação, a espessura de isolamento necessária para reduzir a 10%, a perda de calor, em relação aquela que se teria com a tubulação não isolada.

A taxa de transferência de calor para o interior do tubo sem isolamento é:

$$q = A_3 \cdot h_{3-5} \cdot (T_5 - T_3) \quad \text{ou} \quad \frac{q}{L} = \left(\frac{A_3}{L} \right) \cdot h_{3-5} \cdot (T_5 - T_3)$$

A área de transferência de calor é dada por:

$$A_3 = 2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot L \quad \text{ou} \quad \frac{A_3}{L} = 2 \pi \cdot (7 \times 0,0254 / 2) \quad \text{e} \quad A_3/L = 0,559 \text{ m}^2/\text{m}$$

A diferença de temperatura é dada por: $\Delta T = (T_5 - T_3) = (20 + 130) = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

Para a determinação do coeficiente de convecção, precisamos das propriedades do ar. As suas propriedades na temperatura média de $[(-130) + 20]/2 \cong -55^\circ\text{C}$, podem ser consideradas como:

$$c_p = 1005 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$$

$$\rho = 1,534 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 147 \cdot 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\beta = 1/T \text{ (em K)} = 1/(273,15 - 55) = 4,58 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$k = 20,6 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\nu = 9,58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Gr = g \cdot \beta \cdot (T_5 - T_3) \cdot d^3 / \nu^2 = 9,81 \cdot 4,58 \times 10^{-3} \cdot (20 + 130) \cdot 0,1778^3 / (9,58 \times 10^{-6})^2 = 4,13 \times 10^8$$

$$Pr = c_p \cdot \mu / k = 1005 \cdot 1,47 \times 10^{-5} / 0,0206 = 0,717$$

$$10^{-5} < Gr \cdot Pr \cong 3 \times 10^8 < 10^{12}$$

Desta forma podemos empregar a equação:

$$Nu^{1/2} = 0,60 + 0,387 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6}$$

²³Não esconda seus talentos. Eles foram feitos para o uso. O que é um relógio de sol na sombra?

$$\text{Nu}^{1/2} = 8,92 \quad \therefore \quad \text{Nu} = 79,5$$

$$h = \text{Nu} \cdot k / d = 79,5 \cdot 0,0206 / (7 \times 0,0254) = 9,2 \text{ W / m}^2\text{K}$$

$$\text{Assim} \quad q/L = 0,559 \cdot 9,2 \cdot 150 = 771 \text{ W/m}$$

Como foi fixado pelo enunciado, desejamos aplicar uma espessura de isolamento que limite a absorção de energia em 10%. Assim,

$$q/L \text{ tolerada} = 771 \text{ W/m} \times 0,1 = 77 \text{ W/m}$$

(A) Início do procedimento iterativo.

(A.1) Supondo a temperatura da face externa do isolamento, $T_4 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

A temperatura média do filme de ar fica sendo então, $(5+20)/2 \cong 13^\circ\text{C}$

Nesta temperatura, suporemos válidas as seguintes propriedades:

$$c_p = 1005 \text{ J/Kg.K}$$

$$\rho = 1,293 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 172 \cdot 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\beta = 1/T \text{ (em K)} = 1 / (273,15 + 13) = 3,49 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$k = 24,2 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$$

$$\nu = 13,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

(A.2) Supondo suficientemente precisa a expressão, calcula-se o coeficiente de transferência:

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{20 - 5}{7 \times 0,0254} \right)^{1/4} = 4,0 \quad \therefore \quad h = 4,0 \text{ W/m}^2\text{.K}$$

ou então:

$$Gr = g \cdot \beta (T_5 - T_3) d^3 / \nu^2 = 9,81 \cdot 3,49 \times 10^{-3} \cdot (20 - 5) \cdot (7 \times 0,0254)^3 / (13,30 \times 10^{-6})^2 = 1,63 \times 10^7$$

$$Pr = c_p \cdot \mu / k = 0,714$$

$$10^{-5} < Gr \cdot Pr \cong 1,16 \times 10^7 < 10^{12}$$

Desta forma podemos empregar a equação:

$$\text{Nu}^{1/2} = 0,60 + 0,387 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6}$$

$$\text{Nu}^{1/2} = 5,436 \quad \therefore \quad \text{Nu} = 29,5$$

$$h = \text{Nu} \cdot k / d = 29,5 \cdot 0,0242 / (7 \times 0,0254) = 4,0 \text{ W / m}^2\text{K}$$

²⁴A riqueza e a felicidade não são sempre companheiras.

Observe que na avaliação do diâmetro externo, a título de aproximação, estamos ignorando a espessura necessária de isolamento.

(A.3) Mas sabemos que a quantidade de calor transferida é a mesma em cada região pois os processos de transferência se dão em série e não há acúmulo. Assim podemos estimar o raio externo para o coeficiente de transferência e a temperatura da face externa do isolamento consideradas.

$$\frac{k_{3-4} \cdot (T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} = h_{4-5} \cdot r_4 \cdot (T_4 - T_5)$$

Supondo que o fabricante nos forneceu a condutividade térmica do isolamento, igual a 0,035 W/mK, temos:

$$\frac{0,035 \cdot (5 + 130)}{\ln\left(\frac{r_4}{7 \times 0,0254 / 2}\right)} = 4,0 \cdot r_4 \cdot (20 - 5)$$

Resolvendo por exemplo por tentativas, $r_4 \cong 0,150 \text{ m}$ e $r_4 - r_3 = 0,150 - 0,0889 = 0,061 \text{ m}$

(A.4) Neste ponto podemos retornar à etapa (A.2) e reestimar o coeficiente de transferência.

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} = 1,32 \left(\frac{20 - 5}{2 \times 0,150} \right)^{1/4} = 3,5 \quad \therefore h = 3,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Prosseguimos os cálculos e reestimamos o raio:

$$\frac{0,035 \cdot (5 + 130)}{\ln\left(\frac{r_4}{7 \times 0,0254 / 2}\right)} = 3,5 \cdot r_4 \cdot (20 - 5)$$

Resolvendo, $r_4 \cong 0,158 \text{ m}$ e $r_4 - r_3 = 0,158 - 0,0889 = 0,069 \text{ m}$

Prosseguindo os cálculos até convergência do raio, chegamos eventualmente a:

$$h \cong 3,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$r_4 \cong 0,158 \text{ m}$$

Este é o raio externo do isolamento para que a temperatura da face externa seja de 5°C.

(A.5) No entanto se limitou a absorção de calor em 77 W/m

O calor absorvido é o mesmo que atravessa o filme de ar. Assim:

²⁵Vanglória com flores, porém árvore sem frutos.

$$\frac{q}{L} = 2\pi \cdot r_4 \cdot h \cdot (T_5 - T_4)$$

De modo que podemos confirmar ou não a temperatura proposta na etapa (A.1) da face externa do isolamento.

$$77 = 2\pi \cdot 0,158 \cdot 3,5 \cdot (20 - T_4) \quad \therefore \quad T_4 = - 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ou por outro lado, se a temperatura T_4 for de $5 \text{ } ^\circ\text{C}$, a velocidade de transferência de calor por unidade de comprimento será:

$$\frac{q}{L} = 2\pi \cdot 0,158 \cdot 3,5 \cdot (20 - 5) \quad \text{ou} \quad q/L = 52 \text{ W/m}$$

Que corresponde a cerca de 7% da máxima.

Assim para uma absorção admissível maior, a espessura do isolamento poderá ser um pouco menor e a temperatura da face externa igualmente um pouco menor.

(A.6) Retornamos assim iterativamente ao passo (A.1) com uma nova estimativa de temperatura $T_4 = - 2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Supondo válidos os mesmos valores das propriedades do ar e num procedimento manual:

Partindo de $r_4 \cong 0,158 \text{ m}$

$$(A.2) \quad h = 3,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$(A.3) \quad r_4 = 0,133 \text{ m}$$

$$(A.4) \quad h = 4,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$r_4 = 0,131 \text{ m}$$

$$h = 4,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$r_4 = 0,131 \text{ m}$$

$$(A.5) \quad T_4 = - 3,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{q}{L} = 2\pi \cdot 0,131 \cdot 4,0 \cdot (20 + 2) \quad \text{ou} \quad q/L = 72 \text{ W/m}$$

Que corresponde a cerca de 9% da máxima.

Neste ponto é conveniente analisarmos os resultados já obtidos:

Para a primeira iteração supomos $T_4 = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\text{Para esta temperatura:} \quad h_{4-5} \cong 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$r_4 \cong 0,158 \text{ m}$$

$$q/L \cong 52 \text{ W/m}$$

($\cong 7\%$ da máxima)

Para a segunda iteração supomos $T_4 = - 2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\text{Para esta temperatura:} \quad h_{4-5} \cong 4,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

²⁶Seja respeitoso com todos; sociável com muitos; familiar com poucos; amigo para um; inimigo de nenhum.

$$r_4 \cong 0,131 \text{ m}$$

$$q/L \cong 72 \text{ W/m} \quad (\cong 9\% \text{ da máxima})$$

Prosseguindo o procedimento iterativo provavelmente atingiremos a condição de 10% da absorção máxima de energia, com uma espessura de isolamento um pouco menor que:

$$r_4 - r_3 = 0,131 - 0,0889 = 0,042 \text{ m} \quad \text{ou} \quad \text{espessura} \cong 42 \text{ mm}$$

Observe que nesta condição teremos a formação de gelo na face externa, devido a umidade do ar.

PROPOSTA DE TRABALHO

Na ocasião oportuna, seu professor orientador fixará, a seu critério, as seguintes informações:

Número de horas trabalhadas por ano e o período para amortização do investimento.

Comprimentos e disposições das linhas.

A fonte de energia a ser empregada na instalação industrial.

O diâmetro do tubo e a temperatura da parede externa do tubo para duas linhas distintas, com o auxílio das Tabelas 4 e 5 abaixo.

Tabela 4 - Linha com temperatura entre 650 °C e 410 °C e tubulação entre 1 in a 7 in.

	650 °C	610 °C	570 °C	530 °C	490 °C	450 °C	410 °C
7 in							
6 in							
5 in							
4 in							
3 in							
2 in							
1 in							

Tabela 5 - Linha com temperatura entre 370 °C e 130 °C e tubulação entre 1 in a 7 in.

	370 °C	330 °C	290 °C	250 °C	210 °C	170 °C	130 °C
7 in							
6 in							
5 in							

²⁷A coroa real não cura dor de cabeça.

4 in							
3 in							
2 in							
1 in							

Suas tarefas são:

Selecionar o material isolante e pesquisar suas propriedades e custos junto aos fabricantes e fornecedores.

Selecionar um acabamento para o isolamento e determinar o seu custo.

Determinar quanto de energia será perdida pelas linhas consideradas, caso não se tenha qualquer tipo de isolamento. Determinar o desperdício de recursos financeiros correspondente a esta perda.

Determinar a espessura econômica do isolamento para cada linha considerada.

Determinar o raio crítico do isolamento para cada linha estudada.

Suas tarefas incluem também a análise de uma linha a baixa temperatura, onde a temperatura da parede externa e o diâmetro serão fixados pelo seu professor orientador, com o auxílio da Tabela 6 :

Tabela 6 - Linha com temperatura entre - 150 °C e - 30 °C e tubulação entre 1 in a 7 in.

	-150°C	- 130°C	- 110°C	- 90 °C	- 70 °C	- 50 °C	- 30 °C
7 in		X					
6 in							
5 in							
4 in							

²⁸Os homens sábios aprendem pelos sofrimentos dos outros; os tolos pelos seus próprios.

3 in							
2 in							
1 in							

Neste caso suas tarefas serão, a princípio:

Calcular a taxa de transferência de calor para o interior do tubo sem isolamento.

Determinar a espessura de isolamento adequada, para limitar a absorção de energia em um dado percentual.

Estimar neste caso a temperatura da face externa do isolamento.

Anexe ao trabalho, catálogos e outras comprovações dos dados.

Apresente memorial de cálculo detalhado.

SITES DE INTERESSE

www.acital.com.br

www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=98

www.anp.gov.br/doc/gas/LivroHistoricoTarifaPDF

www.isar.com.br

www.isover.com.br

www.kompatscher.com.br

www.morganitethermal.com.br

www.rockfibras.com.br

Para contato com o autor , acesse paul@pfmilcent.eng.br

BIBLIOGRAFIA

ARAUJO,C. Transmissão de Calor. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro.1ª ed. 1978. pg 70.

BEJAN,A. Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1st ed.1993.

BENNETT,C.O.; MYERS, J.E. Fenômenos de Transporte. McGraw-Hill Ltda. São Paulo. 1978. pg 793-795.

BRASIL,N.I. Introdução à Engenharia Química. Editora Interciência. Rio de Janeiro.1ª ed. 1999.

Catálogo técnico da Isover Saint Gobain. 2004. (www.isover.com.br)

Catálogo técnico da Rockfibras do Brasil Ind. Com. Ltda (www.rockfibras.com.br)

GOODALL,P.M. The Efficient use of Steam. Westbury House. England. 1st ed. 1981.

GRANET, J. Termodinâmica e Energia Térmica. Prentice-Hall do Brasil. Rio de Janeiro. 4ª ed. 1990. pg 449 a 451.

HOLMAN, J.P. International Student Edition Mc Graw-Hill Kogakusha, Ltd. 4ª ed, 1976

INCROPERA, F.P. ; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. 5ª ed. 2003

KAKAÇ,S.; LIU,H. Heat Exchangers. CRC Press. 2nd ed. 2002. pg 469 e 473.

Kompatscher & Cia Ltda (Fornecedor) (www.kompatscher.com.br)

PERRY,R.H.;CHILTON,C.H. Manual de Engenharia Química. Guanabara Dois. Rio de Janeiro. 5ª ed. 1980. 11-46 a 11-52.

PERRY,R.H.; GREEN,D.W.; MALONEY,J.O. Perry's Chemical Engineer's Handbook. Mc Graw-Hill. 7th ed. 1997. 11-68 a 11-74.

²⁹Bem feito é feito duas vezes.

GOMIDE,R. Estequiometria Industrial. Edição do autor.São Paulo. 2ª ed. 1979.

SALMONI,R. Transmissão de Calor. Editora Mestre Jou. São Paulo 1ª ed. 1966

SHREVE,R.N. ; BRINK,J.A.J.Indústrias de Processos Químicos. Guanabara Dois. Rio de Janeiro. 4ª ed. 1980.

APÊNDICE A – Propriedades do ar seco na pressão atmosférica

temperatura (°C)	ρ (Kg/m ³)	c_p (KJ/Kg.K)	K (W/m.K)	$\mu \times 10^5$ (Kg/m.s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
-150	2,793	1,026	0,0120	0,870	3,11
-100	1,980	1,009	0,0165	1,18	5,96
-50	1,534	1,005	0,0206	1,47	9,55
0	1,2930	1,005	0,0242	1,72	13,30
20	1,2045	1,005	0,0257	1,82	15,11
40	1,1267	1,009	0,0271	1,91	16,97
60	1,0595	1,009	0,0285	2,00	18,90
80	0,9908	1,009	0,0299	2,10	20,94
100	0,9458	1,013	0,0314	2,18	23,6
120	0,8980	1,013		2,27	25,23
140	0,8535	1,013		2,35	27,55
160	0,8150	1,017	0,0358	2,43	29,85
180	0,7785	1,022	0,0372	2,51	32,29
200	0,7475	1,026	0,0386	2,58	34,63
250	0,6745	1,034	0,0421	2,78	41,17
300	0,6157	1,047	0,0390	2,95	47,85
350	0,5662	1,055	0,0485	3,12	55,05
400	0,5242	1,068	0,0516	3,28	62,53
450	0,4875	1,080	0,0543	3,44	
500	0,4564	1,092	0,0570		
600	0,4041	1,114	0,0621		95,57
700	0,3625	1,135	0,0667	4,12	113,7
800	0,3287	1,156	0,0706	4,37	132,8
900	0,3210	1,172	0,0741	4,59	152,5
1000	0,2770	1,185	0,0770	4,80	175

APÊNDICE B - BENJAMIN FRANKLIN

Benjamin Franklin conheceu todos os níveis sociais e todas as condições de fortuna. Iniciando como aprendiz de tipógrafo, chegou a ser um dos cinco redatores da Declaração de Independência dos Estados Unidos da América. Viveu mais de dezesseis anos em Londres e nove em Paris, mantendo relações com os homens mais eminentes de seu tempo.

É considerado símbolo vivo da liberdade. Atuou como escritor, cientista, inventor e diplomata. Suas atividades abrangeram ainda a educação, o serviço público, a saúde pública, as artes gráficas e a música, dentre outras.

Pregava virtudes tais como a honestidade, sobriedade, perseverança no trabalho, consistência nas ações, moderação e frugalidade.

³⁰Não sejas sovina com o que não te custa nada, como cortesia, conselho e apoio.

³¹As paixões de Nick crescem gordas e bem dispostas. Seu entendimento está tuberculoso.

Benjamin nasceu em 17 de janeiro de 1706 em Boston, sendo o décimo quinto filho dentre 17 irmãos.

Aprendeu a ler sozinho. Teve instrução formal em escola por apenas 2 anos, dos oito aos dez anos.

Foi aprendiz de tipógrafo na firma de um dos irmãos. Naquela época os aprendizes de profissões não tinham uma infância e juventude das mais confortáveis, tal como é hoje. Gastava seu tempo livre lendo os livros que lhe caíam nas mãos.

Aos 17 anos fugiu para Nova York e terminou por encontrar trabalho na Filadélfia. Era tão bom impressor que o governador da Pensilvânia ofereceu-se para ajudá-lo a instalar uma oficina própria. Benjamin então viajou para a Inglaterra com vistas a comprar o maquinário necessário. A carta de crédito prometida por aquele governador nunca chegou a se efetivar. Por conseqüência empregou-se numa tipografia inglesa, permanecendo naquele país por algum tempo.

Ao regressar à Filadélfia, graças a muito trabalho, tornou-se proprietário de uma tipografia e de um periódico que veio a se tornar o Saturday Evening Post.

Escreveu e imprimiu os “Almanaques do Pobre Ricardo” que continham dentre outras informações, anedotas e provérbios. A boa vendagem do jornal e dos almanaques permitiram que Franklin montasse tipografias em outras colônias.

Criou a primeira biblioteca cooperativa da América, constituída em 1731 como “Library Company” da Filadélfia. É hoje a mais antiga instituição cultural dos EUA, possuindo 500 mil livros e 160 mil manuscritos.

Por volta dos 46 anos, participou da Assembléia Geral que ajudava a governar a Pensilvânia.

Verificou que o raio é eletricidade e inventou o pára-raios para a proteção das edificações. O conjunto de suas pesquisas na área, talvez o faça o maior precursor de tudo o que se faz no campo da energia elétrica na atualidade. Como cientista obteve reconhecimento mundial ainda em vida. Ainda por volta desta época, assumiu a direção dos correios de todas as colônias.

Aos 47 anos fez tanta fortuna que pode se retirar dos negócios.

Na Filadélfia criou um corpo de bombeiros.

Fundou também uma Academia que veio a se tornar a Universidade da Pensilvânia.

Organizou um clube de leitura e debates, que deu origem à Sociedade Norte-Americana de Filosofia.

Colaborou na fundação do Hospital da Pensilvânia.

Estudava constantemente. Conhecia vários idiomas e tocava diversos instrumentos. Tornou-se, a partir da segunda metade do século, um dos homens mais admirados do seu tempo.

Em 1757 foi enviado novamente à Inglaterra para solucionar a disputa entre a Assembléia da Pensilvânia e a Coroa Britânica. Pouco a pouco compreendeu que seria impraticável uma reconciliação entre a Colônia e a Metrópole.

Em 1774 foi sumariamente demitido do Departamento dos Correios devido a defesa constante dos habitantes das colônias. Em março de 1775, dezesseis anos após a sua chegada, convencido que a eclosão da guerra pela independência era eminente, partiu da Inglaterra.

Retornando à Filadélfia, tocado pelo tratamento discriminatório efetuado aos americanos e inspirado nos iluministas, dentre os quais Rousseau, Voltaire e Montesquieu, trabalhou em diversas tarefas em prol daquela causa, inclusive a elaboração da Declaração da Independência em 4 de julho de 1776, documento que subscreveu.

Com 70 anos viajou para a França, para solicitar soldados, dinheiro e mantimentos. Teve seu pedido aceito e assinou o Tratado de Aliança com a França.

Nove anos depois regressou à Filadélfia e foi eleito o primeiro presidente do Estado da Pensilvânia.

Participou da convenção constitucional dos E. U. A., subscrevendo a Constituição norte americana em 1787.

Empreendeu, antes de se afastar da vida pública um grande esforço pela abolição da escravatura. Após longa enfermidade, morreu em 17 de abril de 1790, com 84 anos.

A independência norte-americana comprovou as idéias dos enciclopedistas, como uma alternativa viável à oligarquia hereditária vitalícia então vigente.

Em 14 de julho de 1789 ocorre a Queda da Bastilha e em 26 de agosto do mesmo ano se elabora a Declaração Universal dos Direitos do Homem e do Cidadão.

Tais fatos inspiraram a independência das colônias espanholas de toda a América latina e do Brasil.

Extratos da autobiografia

Sua autobiografia foi escrita ao longo de uma semana de férias, quando tinha a idade de 65 anos. Justifica a elaboração da obra nos seguintes termos:

“Tendo emergido da pobreza e da obscuridade em que nasci e fui criado, atingindo uma elevada posição e um certo grau de prestígio no mundo, e tendo conquistado tão longínquos objetivos através da vida, sem falar de um considerável quinhão de felicidade, podem os meus pósteros gostar de conhecer as diretrizes que me orientaram e de que fiz uso, as quais com a graça de Deus, tão grande êxito obtiveram, podendo ainda considerar algumas delas úteis para as suas próprias situações e, conseqüentemente, dignas de serem aproveitadas.”

A parte que se segue é uma transcrição desta autobiografia que mostra o esforço de Franklin, desde tenra idade com vistas a atingir a perfeição moral.

“Foi mais ou menos por este tempo” (1728 - isto é, aos 22 anos -) “que concebi o arrojado e árduo projeto de atingir a perfeição moral. Era meu desejo viver sem cometer qualquer falta em qualquer momento; queria dominar tudo o que fosse, por tendência natural, fosse por hábito, ou por influência das companhias, pudesse desviar-me do meu objetivo. Como sabia ou julgava saber o que estava certo e o que estava errado, não via por que motivo não podia fazer sempre o que estava certo e deixar de fazer o que estava errado. Depressa reconheci que empreendera uma tarefa mais difícil do que tinha imaginado; porque, enquanto a minha atenção se empenhava em me proteger contra um determinado erro, era muitas vezes surpreendido pelo cometimento de outro; o hábito agia, aproveitando a vantagem da minha falta de atenção; a inclinação natural era freqüentemente demasiado forte para vencer a razão. Concluí afinal que a convicção simplesmente especulativa de que era de nosso interesse ser inteiramente virtuoso, não bastava para nos vigiar durante o sono; e que hábitos contrários à virtude necessitam de ser eliminados, tratando-se de adquirir hábitos bons, e estabelecendo-os, antes que possamos considerar-nos capazes de uma conduta firme uniforme, dentro da retidão. Para alcançar este objetivo imaginei, portanto, o método seguinte:

Nas variadas enumerações das virtudes morais que se me tinham deparado durante as minhas leituras, encontrara uma lista mais ou menos numerosa, visto que os diferentes autores incluem maior ou menor número de idéias sob a mesma designação.

A temperança, por exemplo, confinava-se, para alguns, nos limites do comer e do beber, enquanto para outros, abrangia a questão de moderar qualquer outro prazer, apetite, inclinação ou paixão, quer de caráter físico, quer de caráter mental, podendo concernir mesmo à nossa ganância ou a nossa ambição. Propus-me no intuito de ser claro, a usar um maior número de designações, contendo menos idéias cada uma, de preferência a um menor número de designações ligadas a maior número de idéias, e incluí sob treze nomes de virtudes, tudo aquilo que na ocasião me ocorreu como necessário e desejável, anexando a cada uma, uma espécie de preceito, que plenamente expressava a extensão por mim atribuída ao seu significado.

Eram os seguintes, os treze nomes de virtudes, com seus preceitos:

³²Cesar não mereceu o carro triunfante mais do que aquele que conquistou a si mesmo.

³³Se é a paixão que impulsiona, faça a razão ter o controle.

1 - TEMPERANÇA: Não comer até ao embrutecimento, nem beber até a embriaguez.

2 - SILÊNCIO: Não falar senão do que pode ser benéfico para os outros ou para nós mesmos e evitar as conversações frívolas.

3 - ORDEM: Um lugar para cada coisa e cada coisa em seu lugar; destinar uma hora para cada uma de nossas tarefas.

4 - RESOLUÇÃO: resolver cumprir o que é dever; e cumprir, sem falhar, o que se resolve.

5 - FRUGALIDADE: Não fazer despesas senão em benefício próprio ou em benefício de outrem, isto é, não desperdiçar.

6 - APLICAÇÃO: Não perder tempo; ter sempre entre mãos qualquer trabalho útil; suprimir todas as ações desnecessárias.

7 - SINCERIDADE: Não recorrer a ludíbrios prejudiciais; pensar sem idéia preconcebida e com justiça; e ao falar, fazê-lo de conformidade com este princípio.

8 - JUSTIÇA: Não prejudicar ninguém fazendo o mal, ou omitindo benefícios que constituem o nosso dever.

9 - MODERAÇÃO: Evitar os extremos; abster-se de guardar ressentimento pelas injúrias, na medida em que as consideramos merecidas.

10 - LIMPEZA: Não tolerar a falta de limpeza no corpo, no vestuário ou na habitação.

11 - TRANQUILIDADE: Não se perturbar com insignificâncias, nem com acidentes correntes e inevitáveis.

12 - CASTIDADE: Usar raramente do prazer da carne e apenas para benefício do organismo e tendo em vista a descendência; jamais até o embrutecimento, ou ao debilitamento, ou em prejuízo da própria paz e reputação, ou da paz e reputação de outrem.

13 - HUMILDADE: Imitar Sócrates e Jesus.

A minha intenção era adquirir o hábito de todas estas virtudes, e para isso julguei que seria preferível não dispersar a minha atenção tentando abarcá-las todas de uma só vez; quando tivesse conseguido dominar uma delas, passaria a seguinte, e assim sucessivamente, até ter conseguido dominá-la todas; e, dado que a prévia aquisição de algumas poderia facilitar a aquisição de outras, coloquei-as na minha lista pela ordem acima indicada, tendo em vista este objetivo. Inscrevi a temperança em primeiro lugar, visto que a temperança tende a facultar-nos essa frieza e clareza de discernimento que tão necessárias se tornam quando necessitamos manter uma vigília constante contra os atrativos persistentes de antigos hábitos e contra a força das tentações perpétuas.

Adquirido e estabelecido o hábito da temperança, seria mais fácil alcançar o silêncio; e, como eu desejava alcançar a sabedoria ao mesmo tempo que me aperfeiçoasse no caminho da virtude, e considerando que a sabedoria se adquire pela conversação, em maior escala quando se usam os ouvidos do que quando se usam os lábios, e, conseqüentemente, desejando perder o hábito que

adquirira de tagarelar, fazer trocadilhos e gracejar, que apenas tornava aceitável a minha presença entre pessoas frívolas, coloquei o silêncio em segundo lugar.

Esperava eu que esta virtude e a seguinte, a ordem, me permitissem dispor de mais tempo para consagrar ao meu projeto e aos meus estudos.

A resolução uma vez transformada em hábito, manteria minha firmeza no propósito de obter as virtudes subseqüentes; a frugalidade e a aplicação ao trabalho, libertando-me das dívidas que eu tinha ainda e dando lugar à abastança, e a independência, tornar-me-iam mais fácil a prática da sinceridade, da justiça, etc., etc.

Entendendo, pois, que, de acordo com o ponto de vista de Pitágoras nos seus Versos de Ouro, um exame diário seria necessário, examinei o método seguinte para proceder a este exame. . . .”

Aqui termina a compilação. Na continuação da biografia, Franklin dá mais detalhes a respeito do plano acima delineado.

O brasileiro provavelmente sabe que Benjamin Franklin é um personagem histórico, vendo sua efígie gravada na nota de cem dólares. Ou soube dele através do célebre experimento onde este comprovou que o raio era eletricidade.

Estes dois fatos são verdadeiros mas há muito mais a dizer.

Benjamin Franklin é um dos construtores dos Estados Unidos da América; talvez não o atual com sua pujança, mas também com suas mazelas na política externa. É o construtor daquele país que se fez democrático, libertando-se da coroa britânica. Que se constituiu como exemplo, inspirado na onda iluminista iniciada na França, treze anos antes da Queda da Bastilha e da Declaração Universal dos Direitos do Homem e do Cidadão.

Partindo da pobreza e atingindo grande prosperidade, pregava o comedimento dos apetites, dedicando-se a incentivar em seus leitores a construção deles mesmos; a tornarem-se moral e eticamente melhores.

Quem quer que se familiarize com sua vida verá, que Benjamin não é apenas um personagem histórico norte-americano, mas um espírito superior de toda a humanidade.

Bibliografia:

Autobiografia. Benjamin Franklin. (Edição em português esgotada) Ediouro, Editora Tecnoprint.

Enciclopédia Barsa. Enciclopédia Britânica Editores Ltda.1967.

História Geral. Joaquim Silva e J.B. Damasco Penna. Companhia Editora Nacional.1969.

Benjamin Franklin, an American life. Walter Isaacson. Simon&Schuster Paperbacks. New York. 2004

Observação final:

Existem pelo menos duas traduções da autobiografia de Benjamin Franklin disponíveis, a preços acessíveis. Consulte, por exemplo, www.submarino.com.br

³⁴Visite sua tia, mas não todos os dias e converse com seu irmão, mas não todas as noites.

³⁵O que vós dais a impressão de ser, sejais realmente.

Se beber não dirija. Se dirigir, não beba.