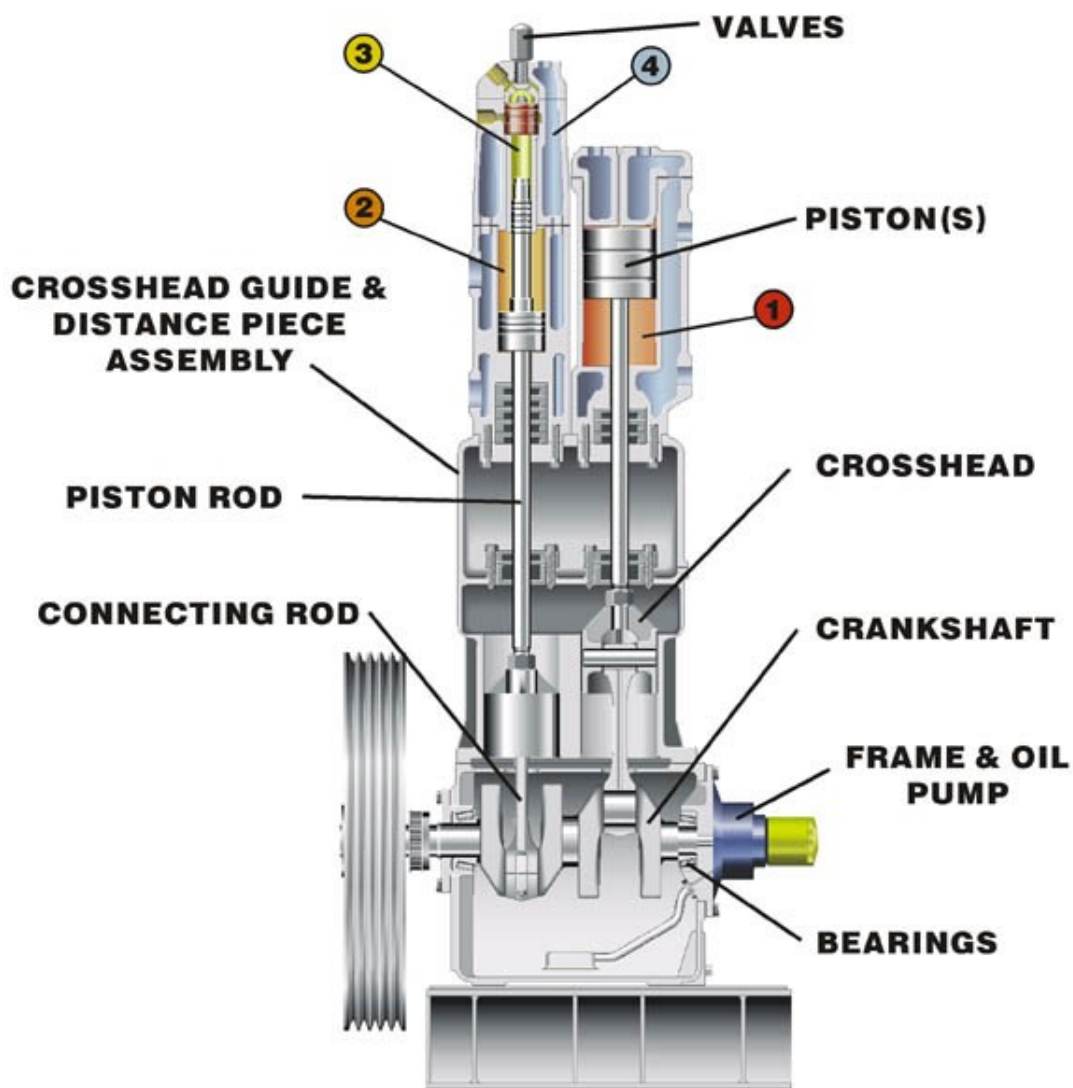


INTRODUÇÃO AOS COMPRESSORES



contém o texto

FRANKLIN - UM HOMEM DE CIÊNCIA

Professor Paul Fernand Milcent

Primeira Edição: 2º semestre de 2006

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

SUMÁRIO

Preâmbulo	1
Introdução e Classificação	2
Trabalho cedido ao sistema	4
Análise do trabalho para compressores de pistão	6
Trabalho numa compressão isotérmica	7
Trabalho numa compressão adiabática	7
Trabalho numa compressão geral	11
Comparação entre a transformação isotérmica e a politrópica	11
Potência do compressor	12
Rendimentos do compressor	13
Exemplo numérico A - Compressão isotérmica sem atrito	13
Exemplo numérico B - Compressão adiabática isentrópica	14
Exemplo numérico C - Compressão politrópica	15
Seleção do compressor	16
Proposta de trabalho	17
Sites de interesse	17
Bibliografia	17
Apêndice: Franklin - Um homem de ciência	18

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. Nasceu em Curitiba. O nome tem origem francesa.

¹Uma adulação nunca parece absurda. A lisonja sempre é levada a sério.

INTRODUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Os equipamentos que impulsionam líquidos são denominados bombas. Aqueles que impulsionam gases ou vapores recebem o nome geral de compressores.

Os compressores podem ser classificados:

Compressores { ventiladores
sopradores
compressores propriamente ditos

Os autores não são unânimes em definir faixas de pressão que delimitam uma classe de outra.

Podemos porém considerar que a faixa de trabalho de ventiladores seja de $\Delta P < 0,25 \cdot 10^2$ KPa

Já a faixa de trabalho de compressores propriamente ditos pode ser considerada, $\Delta P > 2 \cdot 10^2$ KPa

Os sopradores tem uma faixa de trabalho intermediária.

Os ventiladores trabalham com variações de pressão muito baixas, de modo que a densidade do fluido praticamente não varia. O fluido pode ser considerado incompressível e os cálculos são idênticos aos efetuados para bombas.

Os ventiladores são aplicados, dentre outras áreas: em geradores de vapor; no transporte pneumático; no transporte de gases combustíveis ou refrigerantes; e na aeração.

Os ventiladores podem ser classificados:

Ventiladores { centrífugos
hélico centrífugos
axiais

Nos ventiladores centrífugos, o fluido entra numa direção paralela ao eixo de rotação e sai numa direção ortogonal a esta. O funcionamento é semelhante ao de uma bomba centrífuga. São equipamentos apropriados para (em termos) altas diferenças de pressão ($0,08 \cdot 10^2$ KPa a $0,25 \cdot 10^2$ KPa) e baixas vazões

Os ventiladores centrífugos podem ainda ser classificados em de baixa, média e alta pressão. Os de baixa pressão podem ser usados por exemplo em serviços de ventilação. Os de alta pressão para a operação de queimadores em fornalhas.

Quando o fluido entra numa direção paralela ao eixo de rotação e sai numa direção diagonal a esta, o ventilador é hélico centrífugo.

Nos ventiladores axiais o fluido entra e sai paralelamente ao eixo de rotação. São empregados para tarefas de baixas pressões ($\Delta P < 0,02 \cdot 10^2$ KPa) e altas vazões.

Os compressores propriamente ditos podem ser classificados como:

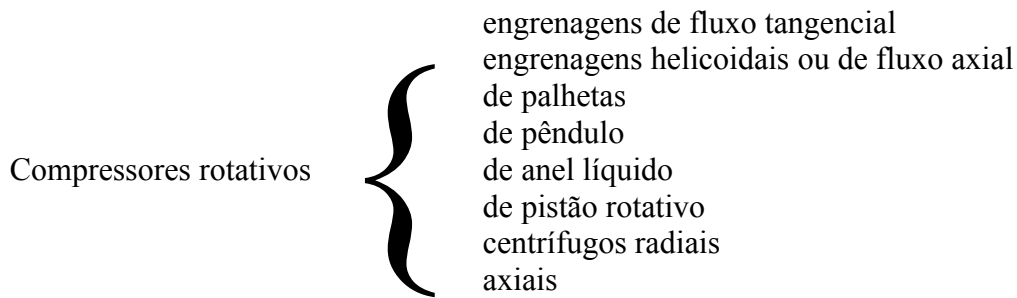
Compressores propriamente ditos { alternativos
rotativos

Os compressores alternativos se classificam em:

Compressores alternativos { de êmbolo (de pistão)
de membrana

²Quem faz o que não deve, sentirá o que não quer.

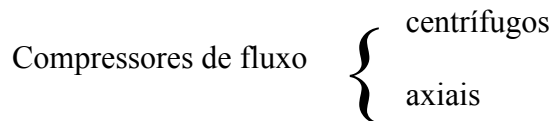
Os compressores rotativos são classificados em:



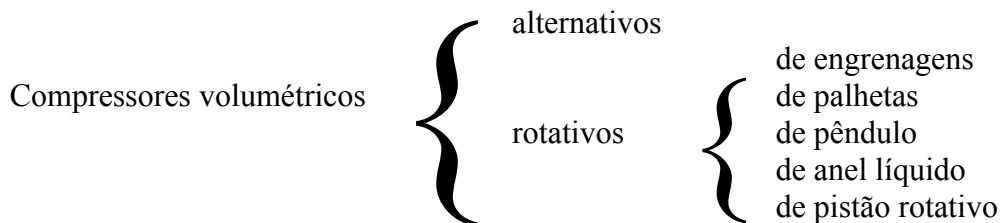
Um modo complementar de classificar os equipamentos de compressão é dada a seguir:



Já os compressores de fluxo se classificam em duas categorias já vistas:



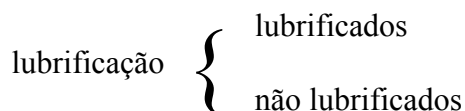
Os compressores volumétricos são classificados em:



Os compressores de fluxo são apropriados para altas vazões e baixas razões de compressão ($r = P_2 / P_1$), pelo menos quando empregados em único estágio. Podem operar com vazões de 200.000 m³/h sem dificuldade.

Os compressores volumétricos aumentam a pressão pela redução do volume de câmaras estanques. A princípio são apropriados para altas diferenças de pressão

Quanto a lubrificação, os compressores podem ser classificados em lubrificados e não lubrificados.



O compressor não é lubrificado, quando não se deseja nenhuma contaminação com óleo. Neste caso se emprega nas peças que se atrim, um material resiliente, tal como o teflon.

³O silêncio não é sempre sinal de sabedoria, mas falatório é sinal de tolice.

Os compressores de alta pressão, com pressões de descarga superiores a 35.000 KPa, exigem projeto especial e conhecimento completo das características do gás. Trabalham com vários estágios de compressão.

O ruído ocasionado pelos compressores de modo geral, aumenta com a diferença de pressão de trabalho e com a velocidade de fluxo.

A velocidade de entrada do fluido no compressor está compreendida em geral entre 25 a 30 m/s, com um limite de até 45 m/s. A velocidade de saída pode estar compreendida entre 80 a 120 m/s. Não deve exceder no entanto a 200 m/s, devido a limitações impostas pela resistência dos materiais. Como mencionaremos mais adiante, o compressor poderá trabalhar com mais de um estágio de compressão. Dependendo das necessidades, o número de estágios poderá chegar a cerca de doze.

A seguir, um rápido comentário quanto a cada tipo de compressor:

Compressor de pistão - Um pistão movimenta-se alternadamente no interior de um cilindro. Uma válvula admite o gás ou vapor a baixa pressão e outra libera o fluido pressurizado. Uma mesma haste de acionamento pode ser usada para dois pistões alinhados, de modo que o compressor pode ser classificado ainda em de simples efeito ou de duplo efeito.

Compressor de membrana - Uma membrana ao movimentar-se succiona o gás ou o vapor para uma câmara fixa e o libera a maior pressão.

Compressor de engrenagens de fluxo tangencial - Duas rodas dentadas giram no interior de uma câmara. O movimento das engrenagens aspira o fluido no lado que os dentes se afastam e o descarrega no outro.

Compressor de engrenagens helicoidais - Duas engrenagens helicoidais acopladas impulsionam o fluido de uma extremidade a outra.

Compressor de palhetas - Dentro de uma carcaça cilíndrica encontra-se um tambor ranhurado, arranjado excêntricamente. O tambor é provido de palhetas radiais que pela força centrífuga são jogadas contra as paredes da carcaça. O volume compreendido entre duas palhetas consecutivas é variável o que permite a compressão.

Compressor de pêndulo - Também chamado de compressor de êmbolo rotativo. Um êmbolo de seção transversal aproximadamente triangular, gira no interior de uma carcaça cilíndrica. Uma palheta retrátil está ligada a carcaça, dividindo-a nos setores de aspiração e compressão. Pela rotação do êmbolo, enquanto num setor ocorre a compressão, no outro se tem a aspiração.

Compressor de anel líquido - Constituído de um tambor excêntrico provido de palhetas fixas que gira no interior de uma carcaça fixa. Ao girar, forma junto das paredes da carcaça um anel de líquido para vedação. A espessura do anel líquido é praticamente constante. O volume compreendido entre as palhetas e o anel líquido é, por outro lado variável, permitindo assim a compressão.

TRABALHO CEDIDO AO SISTEMA

Tanto para compressores de fluxo, quanto para compressores volumétricos, é válida a expressão abaixo. Nela trabalhamos com o conceito de cargas, onde todos os termos tem dimensão de comprimento [L].

⁴O contentamento é a pedra filosofal que transforma tudo que toca em ouro.

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{dP}{\gamma} + \int_1^2 \frac{u \cdot du}{g} + \int_1^2 dz + \int_1^2 dh_L$$

Onde:

1, 2 = posições na entrada e na saída do compressor

[Ha] = carga adicionada

P = pressão

$$\gamma = \rho \cdot g$$

ρ = densidade

g = aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

u = velocidade

z = elevação

h_L = perda de carga no interior do compressor. Se deve ao atrito do fluido ao passar pelos canais, choques, etc...

Considerando a densidade como o inverso do volume específico, podemos ainda escrever:

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{v \cdot dP}{g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2 \cdot g} + (z_2 - z_1) + \Delta h_L$$

Onde

v = volume específico

Caso multiplicássemos todos os termos pela aceleração da gravidade, teríamos estes mesmos termos em unidades de trabalho por unidade de massa (ou energia / unidade de massa).

Considerando que:

- as energias cinéticas antes e depois do compressor são iguais;
- as energias potenciais antes e depois do compressor também são iguais;
- o processo é ideal, sem atrito e portanto isentrópico;

A equação se torna:

$$[Ha] \cdot g = \int_1^2 v dP$$

Na compressão real há atrito; há irreversibilidades. A compressão real não é isentrópica de modo que a entalpia de saída e a temperatura de saída serão superiores às teóricas. Isto é, as perdas de energia se convertem em calor.

Qualquer que seja a função $v = f(P)$, a energia absorvida pelo compressor real é sempre superior a de um compressor perfeito (sem perdas).

As perdas tem dois efeitos distintos. Ocasionam o crescimento direto da energia necessária para a compressão, igual ao valor destas perdas. Ocasionam ainda um crescimento indireto, pois um maior aquecimento do fluido leva a um aumento de seu volume específico.

Para os ventiladores:

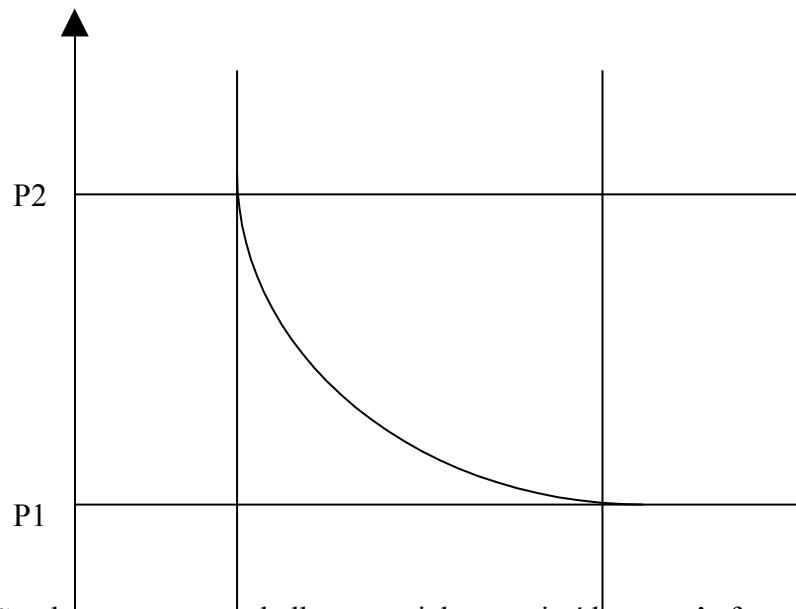
⁵Ame seus inimigos para que eles lhe contem suas faltas.

$$[Ha].g = \int_1^2 v dP = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{1-2}}$$

Onde a densidade é a densidade média ao longo do processo de compressão. Ou melhor, a densidade que é considerada constante ao longo do processo.

ANÁLISE DO TRABALHO PARA COMPRESSORES DE PISTÃO

Figura 1 - Representação de um ciclo de compressão



O compressor de pistão, dentre outros, trabalha num ciclo constituído por três fases. Inicialmente a válvula de admissão do fluido se abre, aumentando o volume da câmara de compressão de v_2 para v_1 , numa baixa pressão P_1 . Neste caso o fluido realiza trabalho contra o ambiente e podemos convencioná-lo como negativo. O trabalho de sucção é dado pela área $v_1 P_1$.

$$W_{sucção} = -P_1.(v_1 - v_2)$$

A seguir ocorre a compressão propriamente dita, seguindo a função $v = f(P)$. Este trabalho é realizado pelas redondezas contra o fluido e podemos convencioná-lo como positivo:

$$W_{compressão} = \int P.dv$$

Por fim a válvula de descarga se abre e a câmara que está com um volume reduzido v_2 , se despressuriza da pressão P_2 para a pressão baixa P_1 .

⁶Muitas refeições são perdidas por se querer carne.

$$W_{descarga} = +v_2 \cdot (P_2 - P_1)$$

Observando as áreas correspondentes na figura 1, chega-se a conclusão que o trabalho resultante é dado por:

$$W_{resultante} = W_{sucção} + W_{compressão} + W_{descarga} = \int v \cdot dP$$

Tendo em vista o comportamento real das válvulas, a presente análise deve ser considerada apenas uma aproximação teórica.

TRABALHO NUMA COMPRESSÃO ISOTÉRMICA

Já vimos a expressão:

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{v \cdot dP}{g}$$

Acrescendo às simplificações já efetuadas a consideração que lei dos gases ideais é válida, teremos:

$$P \cdot v = R \cdot T_1 = \text{constante}$$

ou:

$$v = \frac{R \cdot T_1}{P} \quad \text{e ainda:} \quad \frac{P}{\rho} = R \cdot T_1$$

Assim:

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{v \cdot dP}{g} = \int_1^2 \frac{R \cdot T_1}{g} \cdot \frac{dP}{P} = \frac{R \cdot T_1}{g} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{P_1}{\gamma_1} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{P_1}{\gamma_1} \cdot \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

TRABALHO NUMA COMPRESSÃO ADIABÁTICA

Se além das simplificações já efetuadas, o processo é adiabático e estamos considerando um escoamento em regime permanente, o trabalho realizado é igual a variação entálpica.

$$[Ha] \cdot g = \int_1^2 v \cdot dP = \Delta h$$

ou

$$v \cdot dP = dh$$

onde:

h = entalpia específica

⁷A diligência supera as dificuldades. A indolência as faz.

Mas podemos escrever:

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP$$

onde por definição:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = cp$$

Para baixas pressões e temperaturas moderadas:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T \cong 0$$

De modo que:

$$dh = cp.dT$$

E assim,

$$v.dP = cp.dT$$

Supondo a lei dos gases ideais válida

$$P.v = R.T$$

e

$$R = cp - cv$$

Supondo ainda cp e cv constantes ao longo da compressão, podemos escrever:

$$\frac{R.T}{P}.dP = (cp - cv).T.\frac{dP}{P} = cp.dT$$

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \frac{cp}{cp - cv} \int_1^2 \frac{dT}{T}$$

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{cp}{cp - cv} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

Mas podemos definir

$$k = \frac{cp}{cv}$$

⁸Negligencie a correção de uma pequena falta e em breve esta se tornará uma grande.

Assim:

$$\frac{cp/cv}{cp/cv - cv/cv} = \frac{k}{k-1}$$

e

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Esta última equação relaciona as pressões e as temperaturas numa compressão adiabática isentrópica reversível, levando-se em conta ainda as demais simplificações já efetuadas. A temperatura de descarga adiabática fica sendo então:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-k}{k}}$$

Para o ar e alguns outros gases, $1,39 < k < 1,41$

Para gases monoatômicos $k \cong 1,67$

Para gases triatômicos $k \cong 1,33$

Prosseguindo-se a dedução podemos encontrar uma expressão para a função $v = f(P)$, válida para a transformação adiabática considerada. Pela lei dos gases ideais podemos escrever:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{P_2 \cdot v_2}{P_1 \cdot v_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1 - \frac{k}{k-1}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{-cv}{cp-cv}} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\frac{cp}{cp-cv}}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-cv} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{cp}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{-\frac{cp}{cv}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

De modo que obtemos:

$$P_1 \cdot v_1^k = P_2 \cdot v_2^k = P \cdot v^k = \text{constante}$$

e

⁹Maus ganhos são perdas certas.

$$v = \frac{P_1^{1/k} \cdot v_1}{P^{1/k}}$$

A expressão do trabalho em termos de carga, ficará:

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{v \cdot dP}{g} = \frac{P_1^{1/k}}{\gamma_1} \int_1^2 \frac{dP}{P^{1/k}} = \frac{P_1^{1/k}}{\gamma_1} \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \int_1^2 \left(1 - \frac{1}{k}\right) \cdot P^{-1/k} \cdot dP = \frac{P_1^{1/k}}{\gamma_1} \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \left[P^{k-1/k} \right]_1^2$$

$$[Ha] = \frac{P_1^{1/k}}{\gamma_1} \cdot \frac{k}{k-1} \left(P_2^{k-1/k} - P_1^{k-1/k} \right) \cdot \frac{P_1^{k-1/k}}{P_1^{k-1/k}}$$

$$[Ha] = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]$$

Pode-se definir um fator X como:

$$X = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]$$

PERRY et all tabelam este fator para o ar, para uma razão de compressão ($r = P_2/P_1$) entre 1,000 e 12,09.

A maioria dos compressores industriais não são isolados, de modo que as trocas de calor com o exterior não são nulas. A quantidade de calor perdida, pode ser estimada por:

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

Onde :

- q = taxa de transferência de calor.
- h = coeficiente de transferência de calor.
- A = superfície externa (de troca) do compressor.

$$\Delta T = \left[\frac{T_2 + T_1}{2} - T_{ambiente} \right]$$

O coeficiente de transferência de calor pode ser estimado por procedimentos convencionais. Sugere-se o emprego de 14 W / m².K

TRABALHO NUMA COMPRESSÃO GERAL

Nos casos mais gerais, pode-se propor a expressão:

¹⁰É mais fácil prevenir maus hábitos do que brecá-los.

$$P.v^n = \text{constante}$$

Onde n , uma constante empiricamente determinada, representa os processos de compressão não idealizados. Esta equação recebe o nome de curva politrópica e o expoente n de expoente politrópico.

Por desenvolvimento análogo ao realizado para a compressão adiabática, o trabalho é dado por:

$$[Ha] = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Caso empreguemos uma lei dos gases mais geral,

$$P.v = Z.R.T$$

$$[Ha] = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{Z_1.R.T_1}{g} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

COMPARAÇÃO ENTRE A TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA E A POLITRÓPICA

A compressão isotérmica corresponde a um expoente politrópico igual a 1,0 de modo que o trabalho a ser executado para a compressão neste caso é mínimo.

Como a compressão gera calor, por exigências construtivas do equipamento ou se o objetivo é o de apenas pressurizar o gás, o resfriamento é benéfico. De qualquer modo a refrigeração oferece vantagens mecânicas

Se por outro lado o objetivo é ter um fluido pressurizado com alta entalpia, pode-se decidir por uma operação próxima da adiabática.

O resfriamento pode ser efetuado com o uso de camisa de fluido de resfriamento incorporada ao próprio compressor. No entanto construtivamente, ou por falta de área de troca, tal alternativa pode não ser de todo viável.

Daí o procedimento de compressão em múltiplos estágios com resfriamento intermediário. É empregado principalmente quando a razão de compressão (P_2 / P_1) é alta. Nestes casos o fluido na pressão P_1 entra no primeiro estágio do compressor ou no primeiro compressor e é removido para um trocador de calor de resfriamento. Neste a temperatura pode ser abaixada, eventualmente até a inicial T_1 . Na seqüência o fluido é conduzido a um segundo estágio e assim sucessivamente, até atingir-se a pressão final desejada.

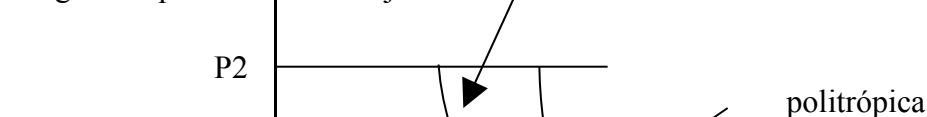


Figura 2 - Comparação entre a transformação isotérmica e a politrópica

¹¹A raposa adormecida não caça pássaros. Mova-se!

POTÊNCIA DO COMPRESSOR

A potência necessária em qualquer situação é dada por:

$$\text{Potência} = [Ha] \cdot \overset{o}{m} \cdot g$$

onde

$$\overset{o}{m} = \text{vazão}_m \text{ mássica}$$

Para o caso particular onde as variações das energias cinética e potencial são nulas; o processo é isentrópico adiabático; e a lei dos gases ideais é válida:

$$\text{Potência} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \frac{\overset{o}{m} \cdot g}{\eta}$$

Além da potência mecânica adequada, o motor deve apresentar um torque de partida suficiente para o arranque do compressor. Isto afeta a potência mínima necessária para o seu funcionamento.

RENDIMENTOS DO COMPRESSOR

As definições dos rendimentos associados a um compressor variam em certa medida, com o autor consultado. As conceituações a seguir, exceto melhor parecer me parecem convenientes.

A potência dita teórica de um compressor corresponde a uma transformação ideal isotérmica. Este estado de referência é interessante pois corresponde, como vimos, à potência mínima necessária.

¹²Nada é tão popular quanto bondade.

¹³A astúcia procede da falta de capacidade.

A potência dita indicada corresponde a transformação real. Depende das perdas e do calor gerado pelo atrito e da quantidade de calor removida do sistema. É uma informação, basicamente de propriedade do construtor do equipamento.

A potência efetiva é a potência indicada, acrescida das perdas mecânicas do sistema. É a potência absorvida pelo eixo do compressor.

Daí podemos definir rendimentos como segue:

Rendimento teórico:

$$\eta_{TEÓRICO} = \frac{\text{Potência_teórica}}{\text{Potência_indicada}}$$

Rendimento mecânico:

$$\eta_{MECÂNICO} = \frac{\text{Potência_indicada}}{\text{Potência_efetiva}}$$

Rendimento global:

$$\eta_{GLOBAL} = \frac{\text{Potência_teórica}}{\text{Potência_efetiva}} = \eta_{TEÓRICO} \eta_{MECÂNICO}$$

EXEMPLO NUMÉRICO A - COMPRESSÃO ISOTÉRMICA SEM ATRITO.

Suponhamos que é de nosso desejo comprimir ar, num compressor de pistão, inicialmente a 0 °C, da pressão de 100 KPa para a pressão de 1000 KPa. Estimar o trabalho teórico necessário e a quantidade de calor a ser removida. Considere o processo isotérmico sem atrito. As variações de energia cinética e potencial são nulas.

Para este caso, vimos que:

$$[Ha] = \int_1^2 \frac{v \cdot dP}{g} = \frac{P_1}{\gamma_1} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

A densidade do ar pode ser estimada:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\frac{V}{n} = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{KPa} / \text{Kmol} \cdot \text{K} \cdot 273 \text{ K}}{100 \text{ KPa}} = 22,7 \text{ m}^3 / \text{Kmol}$$

$$\frac{V}{n} \cdot \frac{\text{Kmol}}{29 \text{ Kg}} = 0,7827 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$\rho_1 = \frac{1}{v_1} \cong 1,28 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

Assim:

$$[Ha] = \frac{100 \text{ KPa}}{1,28 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \ln\left(\frac{1000}{100}\right) = 18337 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}{\text{Kg} \cdot \text{m}}$$

Como:

$$Pa = \frac{N}{\text{m}^2} = \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}^2} = \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$[Ha] = 18337 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}{\text{Kg} \cdot \text{m}} = 18337 \text{ m}$$

$$[Ha] \cdot g = 18337 \cdot 9,81 = 179890 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 179890 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

Na compressão isotérmica, o trabalho cedido ao sistema é igual a quantidade de calor que deve ser removida do sistema.

$$Q = [Ha] \cdot g$$

Desta forma, $Q = 179890 \text{ J/Kg}$

EXEMPLO NUMÉRICO B - COMPRESSÃO ADIABÁTICA ISENTRÓPICA

Suponhamos que iremos comprimir ar sob as mesmas condições, isto é, num compressor de pistão, inicialmente a 0 °C, da pressão de 100 KPa para a pressão de 1000 KPa. Estimar o trabalho teórico necessário e a temperatura final de descarga. Considere o processo adiabático sem atrito. As variações de energia cinética e potencial são nulas.

Já deduzimos que, para tal condição é válida a expressão, sendo o $k \cong 1,4$ para o ar:

$$[Ha] = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Assim:

$$[Ha] = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{1,28 \cdot 9,81} \left[\left(\frac{1000}{100} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 25942 \text{ m}$$

$$[Ha] \cdot g = 25942 \cdot 9,81 = 2,54 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$$

Como o processo é isentrópico adiabático, $Q = 0$

¹⁴Não vá ao médico por qualquer mal estar; nem ao advogado por qualquer querela; nem ao copo por qualquer impulso.

Vimos também a expressão:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-k}{k}}$$

Desta forma:

$$T_2 = 273 \left(\frac{100}{1000} \right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 527K = 254^\circ C$$

EXEMPLO NUMÉRICO C - COMPRESSÃO POLITRÓPICA

Suponhamos agora que iremos comprimir ar sob as mesmas condições, isto é, num compressor de pistão, inicialmente a 0 °C, da pressão de 100 KPa para a pressão de 1000 KPa. Estimar a quantidade de calor gerada no atrito se a temperatura de descarga for de 265°C = 538K. As variações de energia cinética e potencial são nulas.

Para a transformação politrópica, vale a expressão:

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\left(\frac{1000}{100} \right) = \left(\frac{538}{273} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Assim, $n \cong 1,418$

ENNIO COSTA fornece a seguinte expressão para o cálculo do calor gerado:

$$Q = \frac{k - n}{1 - n} \cdot cv \cdot (T_2 - T_1)$$

onde

cv = capacidade calorífica a volume constante, que para o ar vale 716,7 J / Kg.K

Assim,

$$Q = \frac{1,4 - 1,418}{1 - 1,418} \cdot 716,7 \cdot (538 - 273) = 8179 \text{ J/Kg}$$

que devem ser adicionalmente removidos para que o expoente politrópico “n” se iguale a “k”.

¹⁵A amizade aumenta pela visitação, mas por visitar-se raramente.

SELEÇÃO DO COMPRESSOR

Segundo PERRY et alli, os critérios de seleção de um compressor em ordem decrescente de importância são: vazão; pressão; limitações construtivas de temperatura; sistema de vedação; método de lubrificação; consumo de energia; facilidade de manutenção; custo.

Estes mesmos autores efetuam um alerta para engenheiros químicos: “Os que não tem essas especialidades, entre os quais estão os engenheiros químicos... O caminho mais apropriado a seguir é dar aos fabricantes, dados completos do trabalho a ser executado e deixá-los especificar os ventiladores que garantem ser os mais econômicos para o serviço. A melhor escolha será feita, comparando-se as indicações de diversos fabricantes.”

Salvo melhor entendimento, tal recomendação é adequada e se aplica a todos os equipamentos de compressão.

Por busca no google, para “gás compressors” podemos chegar, dentre outras, na página da globalspec.com. Lá encontramos um exemplo de especificação de equipamento, para aquisição de compressor por profissional não treinado. Caso não tenha certeza dos valores, me parece conveniente entrar em contato com o fornecedor.

Vazão de entrada: Ao menos ___ m³/s
Não mais que ___ m³/s

Temperatura de entrada: ___ °C

Pressão de sucção: De ___ KPa
Até ___ KPa

Pressão de descarga: De ___ KPa
Até ___ KPa

Potência do motor: Ao menos (não pré fixado) KW
Não mais que (não pré fixado) KW

Composição do gás:

Aplicação:

Tipo do compressor: (não pré fixado)

Tecnologia básica do compressor (diafragma, pistão, ...): (não pré fixado)

Sistema impulsor (motor elétrico, turbina, ...):

Número de estágios: (sem preferência)

Lubrificado ou não lubrificado:

Especificações adicionais (de montagem, de ruído, ...):

PROPOSTA DE TRABALHO

¹⁶Aquele que persegue duas lebres de uma só vez, não alcança a primeira e deixa a outra escapar.

¹⁷Amor, tosse e fumaça não podem ser bem ocultados.

Na ocasião oportuna seu professor orientador indicará:

- os compressores a serem estudados;
- as vazões e os fluidos a serem processados;
- as temperaturas de entrada;
- as pressões de sucção e de descarga.

Suas tarefas são pelo menos determinar:

- O trabalho mínimo necessário para a compressão;
- O trabalho necessário para uma compressão adiabática sem atrito;
- A temperatura de descarga adiabática.

SITES DE INTERESSE

www.aerzen.ca/products.htm (Aerzen Canadá Ventiladores e Compressores Inc.)

www.business.com/directory/industrial_goods_and_services_/industrial_supplies/compressors/gas/
(endereço que acessa várias empresas)

www.norwalkcompressor.com (Norwalk Compressor Company)

BIBLIOGRAFIA

BRASIL. N. I. Introdução à Engenharia Química. Editora Interciência. 1ª ed. 1999.

COSTA, E. C. Compressores. Editora Edgard Bluccher Ltda. 1ª ed. 1978.

GILES, R. V.; EVETT, J. B.; LIU, C. Mecânica dos fluidos e Hidráulica. Makron Books. 2ª ed. 1997.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. Manual de Engenharia Química. Guanabara Dois. 5ª ed. 1980.

SÉDILLE, M. Ventilateurs et Compresseurs Centrifuges et Axiaux. Tome I. Aérodynamique générale, calcul et fonctionnement. Eyrolles & Masson. 1^{er} ed. 1973.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. Guanabara Dois. 3ª ed. 1980.

TARDÁ, J. M. Ventiladores y Turbocompressores. Marcombo, S.A. 1ª ed. 1966.

WARK, K. Thermodynamics. Mc Graw-Hill Book Company. 4th ed. 1983.

FRANKLIN - UM HOMEM DE CIÊNCIA.

Introdução

Benjamin Franklin ao longo de sua vida, exibiu duas facetas marcantes. Por um lado, procurou tornar-se cada vez melhor, enriquecendo-se nos verdadeiros valores humanos. Por outro, perseguiu a meta de promover o bem comum, o que conseguiu alcançar em transbordante medida, em sua longa existência.

¹⁸A maldade é a fonte da insolência.

Oriundo de uma família humilde e numerosa, nasceu em Boston em 1706. Tornou-se aprendiz de impressor e aos 17 anos mudou-se para Filadélfia.

Aos 22 anos documentou uma estratégia de 13 pontos para o auto-aperfeiçoamento moral. Cerca de 30 anos mais tarde, num processo gradativo, atingiu poder, renome mundial e fortuna consideráveis. E ainda, de acordo com suas próprias palavras, um quinhão razoável de felicidade.

Aos 65 anos, escreveu sua autobiografia, durante uma semana, numa casa de campo da Inglaterra, cuja leitura recomendo. Aos 84 anos, sempre em atividade produtiva, veio a falecer, por ação de uma longa enfermidade.

Além dos benefícios sociais que suas publicações trouxeram, criou uma biblioteca (a mais antiga instituição cultural norte americana da atualidade); um corpo de bombeiros; uma academia que veio a se tornar a Universidade da Pensilvânia; um clube de leitura e debates, que deu origem à Sociedade Norte-Americana de Filosofia; e colaborou na fundação do Hospital da Pensilvânia.

Já após ter elaborado sua biografia, e tocado pelo tratamento discriminatório efetuado pelo império contra os americanos, trabalhou em diversas tarefas em prol da independência, inclusive colaborando com a elaboração da Declaração da Independência em 4 de julho de 1776, documento que subscreveu. Com 70 anos viajou para a França, para solicitar e obter apoio à causa. Nove anos depois regressou à Filadélfia e foi eleito o primeiro presidente do Estado da Pensilvânia. Em 1787, subscreveu a constituição norte americana.

Tal independência 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.

Esta rápida retrospectiva incluiria qualquer cidadão entre os notáveis da humanidade. Mas é a luta de Benjamin Franklin pelo bem comum, como homem de ciência, que nos importa transmitir ao leitor aqui.

Primeiras incursões

O impulso de Benjamin Franklin em desvendar e aplicar as leis que regem o universo se manifestaram desde cedo. Quando jovem, construiu remos e nadadeiras para impulsioná-lo em suas brincadeiras aquáticas no porto de Boston.

Aos 20 anos, já tendo decidido bem aproveitar o tempo disponível, realizou alguns estudos, quando de uma viagem de retorno da Inglaterra. Analisou o comportamento dos golfinhos e peixes voadores que acompanhavam a embarcação e estudou pequenos organismos aderidos a algas marinhas. Calculou ainda a distância do veleiro a Londres pela cronometragem de um eclipse lunar.

Mas talvez o mais importante tenha sido o início de sua inteligente, profunda e sábia observação do comportamento humano, além de, para nós, seu costume de registrar os acontecimentos.

Ao ouvir falar mal de um antigo dignatário considerado santo, Franklin expôs sua opinião que é impossível a uma pessoa desonesta, não importa quão esperta seja, esconder completamente sua personalidade. Considerava que a autenticidade e a sinceridade tinham um lustro característico; que eram como chama que não podia ser embaçada.

Observando seus colegas de bordo, concluiu que se duas pessoas iguais em julgamento disputam uma quantia considerável, aquele que mais ama o dinheiro perderá pois sua ansiedade pelo sucesso o confunde. Uma pessoa muito medrosa se comportará defensivamente e assim falhará em apoderar-se das vantagens ofensivas.

Na mesma viagem, um dos passageiros foi pego trapaceando no jogo e seus colegas lhe impuseram uma multa. Como este se recusava a pagá-la foi colocado em total ostracismo até reconsiderar a posição. Com o acontecimento, Franklin concluiu: “O homem é um ser sociável e é, até onde eu sei, uma das piores punições, ser excluído da sociedade. Eu tenho lido uma abundância de coisas boas sobre a solidão e eu sei que é uma bazófia comum nas bocas daqueles que desejam ser julgados sábios...os quais não estão nunca menos sós do que quando sós. Eu reconheço a solidão

como um agradável refrigério para uma mente ocupada; mas fossem estas pessoas pensantes obrigadas a ficar sempre sozinhas, eu estou apto a pensar que elas rapidamente achariam suas existências muito insuportáveis.”

Vários anos depois, passou a brincar com matemática, passando o tempo construindo quadrados mágicos complexos, onde as linhas, as colunas e as diagonais apresentavam todas a mesma soma.

Transferência de calor

Por volta dos 30 anos fez uma experiência com base nas pesquisas de Isaac Newton e Robert Boyle. Tomou retalhos de pano de diferentes cores e os colocou sobre a neve, expostos ao sol. A seguir mediu a quantidade de líquido gerado em cada caso. Observou assim que os tecidos escuros absorviam mais calor. Dentre suas conclusões práticas afirmou que “roupas pretas não se ajustam bem como vestuário em climas quentes ensolarados”.

Com cerca de 36 anos realizou um invento que o notorizou no âmbito das colônias norte americanas. Divulgou o projeto de um fogão a lenha associado a lareira, para maximizar o aproveitamento de calor enquanto minimizava a fumaça e resíduos e ainda efetuava o aquecimento do ambiente. Os gases de combustão elevavam-se até a chapa de ferro do fogão, aquecendo-a. Eram então forçados a um movimento descendente por efeito de tiragem, contornavam a parede da chaminé da lareira e finalmente se introduziam nesta, ascendendo por convecção.

Em 1744, organizou uma fábrica das “lareiras da Pensilvânia” e um sistema de comercialização pelo nordeste americano. No folheto de propaganda, explicava em detalhes como o ar aquecido se expandia, ocupando mais espaço que o ar frio e ficava mais leve. Ainda como o calor se transmitia, enquanto a fumaça era descartada, assim reduzindo a chance de febres e tosses. Mencionava ainda a economia em combustível.

Um admirador da época registrou: “Elas devem ser chamadas por justiça e gratidão, “lareiras do sr. Franklin”. Eu acredito que todos os que experimentaram o conforto e os benefícios proporcionados por elas, unir-se-ão a mim ao considerar que o autor desta feliz invenção merece uma estátua.”

Tais elogios não parecem exagerados, se lembrarmos que o fogão a lenha era talvez o aparelho mais sofisticado das cozinhas do século XVIII.

Como no início da operação não há efeito de tiragem pela chaminé, pois esta se encontra fria, os modelos originais foram aperfeiçoados e simplificados, pela remoção por exemplo, do canal descendente.

Saúde

Em certa época, um de seus irmãos, afetado por grave enfermidade, lhe escreveu solicitando um aparelho que lhe ajudasse a urinar.

A partir desta motivação, Franklin desenvolveu a primeira sonda urinária americana, uma modificação de um invento europeu, numa época muito anterior a era dos plásticos.

Supervisionou a elaboração, por um artífice em prata, de um tubo suficientemente fino para ser flexível. Este tubo foi desenvolvido com a intenção de ser introduzido no canal urinário, com o auxílio de um arame colocado em seu interior, para dar-lhe conveniente rigidez. O arame por sua vez, era removido gradualmente para permitir a curvatura do tubo na região em que esta passava a ser necessária. Um mecanismo desmontável adicional dava um movimento de rotação ao tubo, para facilitar a sua introdução.

Meteorologia

Na noite de 21 de outubro de 1743, Franklin se preparou para observar um eclipse lunar que ocorreria as 20;30 h. No entanto, uma tempestade violenta atingiu a Filadélfia neste horário,

¹⁹É mais nobre perdoar e mais viril desprezar, do que vingar-se de uma injúria.

impedindo a observação. Posteriormente leu descrições de como tal tempestade tinha causado danos na costa nordeste norte americana. Porém o que lhe surpreendeu foi uma narrativa que em Boston, a cerca de 500 Km ao norte, o eclipse tinha sido observado. Então Benjamin Franklin escreveu a um seu irmão que residia naquela cidade e obteve a confirmação de que a tempestade só tinha ocorrido uma hora depois do eclipse. Prosseguindo a pesquisa, levantou os tempos das ocorrências de outras tempestades acima e abaixo da costa.

Isto claramente mostrou que as tempestades haviam se deslocado do sudoeste para o nordeste. No entanto como já era bem conhecido, o vento, quando do surgimento destas grandes tempestades da costa leste americana, soprava do nordeste para o sudoeste.

A conclusão final foi de que o vento e a tempestade se moviam em direções opostas. Posteriormente presumiu corretamente que a elevação do ar aquecido no sul, criava uma região de baixa pressão que gerava o vento oriundo da região norte.

Este estudo foi considerado o início da ciência da predição do tempo.

Experimentos com eletricidade

Na época de Franklin, a eletricidade era basicamente uma brincadeira de salão.

Na Grécia antiga, discípulos de Tales de Mileto descobriram que atritando uma resina (âmbar) contra o pêlo de certos animais, ocorriam atrações e repulsões de pedaços de cortiça. O fenômeno foi batizado como “propriedade do âmbar”, em grego “electron” e daí “eletricidade”.

Prosseguindo-se as descobertas, em clima frio e seco, ao atritar-se bastões de vidro contra lã ou bastões de resina contra o pêlo de gato, tanto o vidro quanto a resina atraíam pequenos corpos e os bastões atritados atraíam-se entre si. No entanto dois bastões de vidro ou resina repeliam-se. Ainda, quando se tocava um corpo não atritado com um outro já atritado, o primeiro ficava com propriedades semelhantes, passando a repelir o segundo. Concluiu-se, num bom exemplo do uso do binômio experimentação e conclusão, que a eletricidade era devida a dois fluidos, um fluido vítreo e um fluido resinoso, que se atraíam. Concluiu-se também que estes fluidos passavam por determinados materiais e outros não.

No final do século XVI estudou-se algo a respeito do magnetismo. Finalmente na época de Franklin foi inventada a garrafa de Leyden; dispositivo que acumulava eletricidade e que podia produzir centelhas quando as liberava.

Também nesta época, um dos cientistas da corte de Luis XV divertiu o rei, fazendo pular ao mesmo tempo, cerca de 200 soldados, passando por eles uma descarga de eletricidade estática.

Quando da visita a Boston de um apresentador, Dr. Archibald Spencer, em 1743, Franklin tomou conhecimento destes surpreendentes fenômenos. Um de seus truques era obter centelhas elétricas dos pés de um garoto pendurado do teto por cordas de seda.

Em 1747 recebeu artigos descrevendo alguns experimentos e já então mencionava que nunca tinha estado antes tão envolvido em algum estudo que tão totalmente absorvesse a sua atenção. Nesta época, encarregou um vidreiro e um artífice em prata para construir aparelhos apropriados às suas experimentações.

É possível que a primeira pesquisa frutuosa de Franklin em eletricidade tenha ocorrido nesta fase. Coletando cargas elétricas de um tubo de vidro em rotação e estudando suas propriedades, concluiu que a eletricidade não era criada pela fricção, mas somente coletada por ela. Que uma carga podia ser passada de uma pessoa a outra e o fluido elétrico refluir se acaso se tocassem. Para explicar o fenômeno, inventou alguns novos termos: “Nós dizemos que B é eletrizado positivamente e A negativamente ou mais exatamente que B é eletrizado mais(+) e A menos(-) ... Estes termos podem ser usados até que seus filósofos nos dêem melhores.”

Como o leitor bem sabe, tais termos são os usuais na atualidade.

Franklin descobriu ainda que a geração de uma carga positiva era acompanhada da geração de uma mesma carga negativa. Tal fato ficou conhecido como princípio da conservação da carga e

²⁰Calamidade e Prosperidade são as pedras de toque da Integridade.

como teoria elétrica de único fluido. Tais leis geraram uma revolução científica que permitiu uma infinidade de aplicações práticas no mundo moderno.

Num de seus testes, ele eletrificou uma pequena esfera de ferro e balançou uma rolha de cortiça próximo a ela. A esfera foi repelida devido a força da sua carga elétrica. Quando porém ele aproximou da esfera uma haste pontuda de metal, observou que esta atraiu a carga. Mas uma peça rombuda de metal não atraía a centelha elétrica tão facilmente e se estivesse isolada ao invés de aterrada, não atraía a centelha de modo algum.

Franklin prosseguiu seus estudos, capturando e estocando eletricidade numa forma primitiva de capacitor, a garrafa de Leyden, já mencionada. Tais jarras eram recobertas exteriormente por uma folha metálica e no interior das paredes de vidro havia por exemplo água. Ele demonstrou que quando o interior do jarro era carregado, a folha metálica exterior passava a ter uma carga igual e oposta. A partir daí, construiu um equipamento constituído de fileiras de placas de vidro e de metal e lhe deu o nome inédito até então, de “bateria elétrica”.

Por diversão construiu uma aranha metálica que saltitava quando carregada. Eletrificou a cerca de ferro de sua casa para produzir centelhas, divertindo os visitantes, isto obviamente bem antes do surgimento da luz elétrica.

Sem perceber a importância do que já tinha realizado, se queixou: “...estou um pouco vexado que não tenha sido até agora capaz de descobrir algo de útil para a humanidade.” Após alguns dolorosos choques que o deixavam desmaiado, afirmou que “o único uso descoberto da eletricidade foi ajudar a fazer um homem fútil, desprezioso.”

De qualquer forma sonhava, quem sabe com um toque de humor negro: “Um peru será morto para nossos jantares por um choque elétrico, e assado pela eletricidade, antes de ser tostado por uma garrafa elétrica enquanto brindes de prosperidade para todos os famosos eletricitistas na Inglaterra, França e Alemanha serão bebidos em copos de vinho eletrificados, sob a descarga de salvas de uma bateria elétrica.” Com a construção de uma grande bateria e para a infelicidade dos perus, pode logo depois afirmar: “Os pássaros mortos deste modo tem uma carne incomumente macia”

A criação do pára-raios

O raio, como também outros fenômenos meteorológicos, historicamente foi considerado um fenômeno sobrenatural e a expressão da vontade de Deus.

São Tomás de Aquino, não muito felizmente afirmou que “os sons do metal consagrado repelem o demônio e afastam tempestade e relâmpago.” Isto gerou confusão que a princípio sempre se espera, quando a fé cega se interpõe no campo da razão.

Quando as tempestades se aproximavam, os sinos das igrejas eram tocados para repelir os raios, mas o mais incrédulo devia reconhecer que a técnica não era das mais eficientes. Somente num período de 35 anos e somente na Alemanha, cerca de 390 igrejas foram atingidas e mais de 100 sineiros morreram. A respeito disto, Franklin comentou que “os raios parecem preferir as torres das igrejas e ao mesmo tempo que os sinos estão tocando... Se poderia pensar que é agora ocasião de tentar alguma outra estratégia.”

Supôs que os vapores d'água nas nuvens pudessem ser eletricamente carregados; as cargas positivas se separassem das negativas e então quando tais nuvens eletrificadas passassem sobre árvores altas, torres elevadas, hastes, mastros de navios, ... atraíssem a carga elétrica total das mesmas. “Perigoso assim é procurar abrigo sob uma árvore durante uma tempestade.”

Nas anotações de seus experimentos Benjamin registrou, em novembro de 1749, doze semelhanças entre as centelhas elétricas e o até então misterioso e desconhecido raio: luminosidade; cor da luz; direções tortuosas; movimento repentino; conduzido por metais; estampido da explosão; destrói animais;... cheiro sulfuroso. E continuou: “O fluido elétrico é atraído pelas pontas.” Isto ele já havia descoberto. “Nós não sabemos se o raio tem esta propriedade . Mas uma vez que eles concordam

²¹A mocidade é atrevida e positiva. A velhice modesta e com dúvidas: Assim as espigas de trigo quando jovens e leves se elevam, mas inclinam suas cabeças quando pesadas, cheias e maduras.

em todas as particularidades quando os comparamos, não é provável que eles concordem também nisto? Deixemos o experimento ser feito.”

Antes que ele o realizasse ele mesmo, efetuou sua descrição em duas famosas cartas a um amigo na Inglaterra, em 1750. As mesmas foram submetidas a apreciação na Royal Society de Londres e então extensamente publicadas.

A idéia básica nos parece bastante simples hoje. Consistia em colocar uma haste pontuda de ferro de 6 a 9 metros no topo de uma torre. Ao lado, um voluntário, com um pegador encerado (e portanto isolado) aproximaria um arame, pretendendo com isto obter centelhas elétricas. O surgimento de tais centelhas, comprovaria a captura de cargas das nuvens. Comprovaria ainda a haste metálica, como um instrumento eficaz na proteção de edificações contra os raios. A carga elétrica poderia ser segundo ele, capturada das nuvens, segura e silenciosamente. “Isto pode parecer fantástico, mas deixemos que os experimentos sejam extensamente feitos.”

As anotações de Franklin foram publicadas em revista em Londres em 1750 e num livreto de 86 páginas em 1751. Foram traduzidas para o Francês no início de 1752 e se tornaram uma sensação. O rei Luis XV ordenou que os testes fossem repetidos, o que foi feito em fevereiro. Encorajou também o grupo de pesquisadores responsável a tentar o experimento do pára-raios.

Assim, no povoado de Marly, nas proximidades de Paris, foi erguida uma haste pontuda de ferro de 12 metros e um soldado aposentado foi requisitado como voluntário. Em 10 de maio de 1752, ao passar uma nuvem de tempestade, saltaram centelhas entre a haste e o soldado, confirmando a hipótese de Franklin. Um prior excitado, então, arrebatou o arame isolado e repetiu o experimento seis vezes, tomando choque uma vez, mas sobrevivendo para celebrar o sucesso. Em pouco tempo o experimento foi efetuado inúmeras vezes pela França, tornando Benjamin Franklin notório em toda a Europa.

No entanto, devido ao tempo necessário a uma viagem transatlântica, nosso famoso personagem só soube do sucesso dos experimentos quando do recebimento de carta no final de julho ou início de agosto de 1752. Seu jornal, o “Pennsylvania Gazette”, publicou a carta sobre os testes franceses em 27 de agosto de 1752.

Na verdade, Franklin nesta época já havia confirmado suas hipóteses. Ele aguardava a conclusão das obras do campanário da Igreja Cristã da Filadélfia, quando teve a idéia de usar uma pipa. No topo de um papagaio de seda, foi colocado um arame fino e uma chave foi amarrada no fim de um barbante úmido, de forma a possibilitar a captura de cargas. Benjamin, então com 46 anos, e seu filho William com 21, foram para o campo, este último encarregado de empinar a pipa. Guardaram segredo do que pretendiam, provavelmente receando que algo pudesse dar errado.

Ao passar uma nuvem sobre a pipa, os filamentos do barbante enrijeceram. Franklin bateu com os nós dos dedos na chave, recebeu a descarga e notavelmente sobreviveu. Prosseguiu coletando alguma carga em uma garrafa de Leyden, e comprovou em laboratório que esta tinha as mesmas propriedades da eletricidade produzida artificialmente por fricção. Escreveu assim que “desta forma a identidade da matéria elétrica com o raio foi completamente demonstrada”.

Pelo que se apurou, em julho de 1752, já havia pára-raios postos em operação na Filadélfia. A edição de outubro de seu “Poor Richard’s Almanack” trazia a descrição do artefato protetor de casas e outras construções contra os raios.

Na época, construiu um pára-raios para sua própria casa. O aterramento era feito com um arame, porém com uma abertura livre de cerca de 10 cm. Neste vão havia uma esfera e dois sinos que tilintavam quando da aproximação de uma tempestade. Além da diversão, ele usava a abertura para coletar cargas para seus experimentos. O espaço era suficientemente reduzido para proteger a casa em caso de raios.

Por algum tempo os fanáticos continuaram a julgar o pára-raios uma ofensa a Deus. Como se ele pretendesse, diziam, se resguardar dos desígnios dos Céus. Em uma carta, Franklin ponderou: “Seguramente os trovões do Céu, não são mais sobrenaturais que a chuva, o granizo ou o brilho do sol do Céu, sem a inconveniência de que sejamos protegidos deles por telhados, sem escrúpulos.”

²²Aquele que semeia espinheiros não deve andar de pés descalços.

Conclusão

Um dia destes, olhando para a torre de uma igreja, lá observei a ponta de um pára-raios.

Além de sua aplicação prática, esta disposição no ponto mais alto pode nos servir de lembrete a guardarmos uma postura de humildade, enquanto homens de ciência, pois até pouco tempo atrás se julgava, por meio da razão, que a eletricidade era devida a dois fluidos distintos; que o raio e a eletricidade eram coisas diferentes; e tantos outros exemplos de enganos.

Porém, lembra-nos também a conservarmos uma postura de humildade enquanto homens de fé, por termos chegado a crer que o mero ressoar de sinos consagrados afastariam relâmpagos.

Benjamin Franklin foi reconhecido como o mais famoso cientista vivo na sua época. Transformou a eletricidade de um truque de salão em uma ciência. Seu trabalho neste campo introduziu uma revolução científica comparável àquela elaborada por Isaac Newton no século anterior.

Se tornou um herói popular. Ao solucionar um dos grandes mistérios do Universo, conquistou um dos mais aterrorizadores perigos naturais.

Sua dedicação à ciência era desprendida, não sendo conduzida por interesses pecuniários. Se negou a patentear suas famosas invenções. Tinha prazer em partilhar gratuitamente de suas descobertas. “Como gozamos de grandes vantagens com a invenção de outros, devemos ficar contentes com a oportunidade de servir os outros por qualquer invenção nossa e isto devemos fazer generosa e gratuitamente”

As Universidades de Harvard e Yale conferiram a ele, que havia estudado formalmente apenas dos 8 aos 10 anos de idade, graus honorários.

Pelas palavras do estadista francês Turgot,

“Ele arrebatou o relâmpago do céu e o cetro dos tiranos.”

Bibliografia

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

Enciclopédia Barsa. Enciclopédia Britânica Editores Ltda. 1967.

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

Observação final:

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

²³O sábio e bravo ousa reconhecer que estava errado.

²⁴Muitos homens pensam que estão construindo Prazer, quando na verdade estão se vendendo como escravos para ele.

(Elaborado em setembro de 2006. Revisado por Paul A. A. Milcent.)

Se beber não dirija. Se dirigir, não beba.