

# TERMODINÂMICA COM CLAREZA EXPLICA E RESOLVE TUDO

## INTRODUÇÃO:

No dia a dia com a minha família e com meus amigos, costumo brincar usando expressões como: “Isso é Termodinâmica pura”. “Se não puser Calor não sairá Trabalho”. “Nada vai do frio para o quente”. Geralmente essas intervenções na conversa, cabem de forma perfeita, em se tratando de assuntos os mais diversos, como preço de um produto, custo/benefício em relação a um investimento, facilidade ou dificuldade de vencer certos obstáculos diários, ofertas “fantásticas” do mercado, falsa esperteza apregoada por alguém, etc.

Conhecendo o artigo: “Steam Generation Thermodynamics”, de autoria de Brad Buecker, publicado na revista Chemical Engineering de novembro de 2010, páginas 44-47, cujo objetivo é focalizar a eficiência de processo, fiquei muito sensibilizado pela forma como está apresentada uma revisão de conceitos básicos da Termodinâmica: muito didática e com uma abordagem bem AO MEU MODO DE ENCARAR A PRÁTICA DA TERMODINÂMICA.

A partir de então, resolvi produzir este “paper” com o intuito de tornar o aludido conhecimento mais útil a um número maior de pessoas, incluindo jovens engenheiros e estudantes de ciência e Engenharia.

Para a maioria do público, A Física e em especial a Termodinâmica, significa matemática complexa e mistérios indecifráveis, incluindo aí também, inúmeros com formação em Engenharia e/ou em outros campos da Tecnologia.

Essa realidade acaba sendo um entrave ao progresso científico e na linha de pensamento dos indivíduos, tornando as pessoas menos sábias.

Diante dessa situação, bem conhecida, o Professor americano Octave Levenspiel, do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual do Oregon, EUA, decidiu escrever um livro maravilhoso cujo título original é “Understanding Engineering Thermo”, e traduzido em português no Brasil pelos professores da Universidade de São Paulo (USP), José Luís Magnani e Wilson Miguel Salvagnini, ganhou o espirituoso título de “Termodinâmica Amistosa para Engenheiros”.

Clareza dos conceitos fundamentais da Termodinâmica, como o entendimento e a interpretação das suas leis ou princípios básicos, faz com que fórmulas simples possam ser usadas para explicar, avaliar, prever e projetar instalações de processamento industrial.

Interessante é constatar, que o entendimento e a interpretação desses mesmos conceitos, são capazes de fazer com que o gerenciamento do cotidiano da vida pessoal de cada um, possa ser feito com mais racionalidade e inteligência, evitando entusiasmos por situações falsas e criando resistência a apelos que vão de encontro às condições inexoráveis da natureza.

### **DEFINIÇÕES E AS LEIS DA TERMODINÂMICA:**

1 – Sistema é qualquer parte de matéria ou de um equipamento, escolhido arbitrariamente para que se possa analisar um problema.

2 – Sistema considerado FECHADO quando a massa não atravessa seus limites, embora a energia possa cruzá-lo.

3 – Sistema considerado ABERTO ou EM ESCOAMENTO quando a massa e/ou energia cruzam seus limites.

4 – As formas de energia que cruzam os limites do sistema são: Energia Térmica (Calor) e Trabalho (no sentido amplo). São apenas trocas de energia entre o sistema e a vizinhança.

5 – Calor é energia que é transferida de um corpo para outro devido à diferença na temperatura desses corpos.

6 – Trabalho é energia que é transferida de um corpo para outro devido a uma força que atua entre eles.

7 – A transformação de outras formas de energias em Calor representa DEGRADAÇÃO de energia.

A Primeira Lei pode ser enunciada assim:

“Você não pode conseguir alguma coisa a partir do nada” (“You can’t get something for nothing”), ou como se diz com frequência na linguagem dos economistas americanos : “Não existe almoço grátis”.

Na realidade a Primeira Lei é a Lei da Conservação da Energia e diz:

“A energia usada dentro de um sistema não é criada ou destruída, mas somente transferida”.

$$Q - W = \Delta K + \Delta P + \Delta U + \Delta(pv) + \frac{dE}{dt}$$

Q = quantidade de calor por unidade de tempo. Considera-se positiva quando é transferida para o sistema e negativa quando é transferida do sistema para a vizinhança.

W = Trabalho por unidade de tempo transferido do sistema (trabalho de eixo) para a vizinhança, quando é considerado positivo. Ao contrário é considerado negativo o trabalho por unidade de tempo transferido para o sistema.

$\Delta K$  = Diferença de Energia Cinética ocorrida por unidade de tempo.

$\Delta P$  = Diferença de Energia Potencial ocorrida por unidade de tempo.

$\Delta U$  = Diferença de Energia Interna ocorrida por unidade de tempo.

$\Delta(pv)$  = Diferença de energia do fluido ocorrida por unidade de tempo quando o fluido entra e quando sai do sistema.

$dE/dt$  = Mudança de energia por unidade de tempo ocorrida dentro do sistema.

De forma resumida, a Primeira Lei pode ser escrita:

$$\text{Variação de energia do sistema} + \text{Variação de energia da vizinhança} = 0$$

Cientistas combinaram a soma das energias: Interna + Trabalho de entrada ou saída de fluxo no sistema ( $U + pv$ ) numa propriedade muito útil conhecida como ENTALPIA (H).

$$H = U + pv$$

U = Energia interna

p = Pressão absoluta

v = Volume específico

ENTALPIA É A MEDIDA DA ENERGIA DISPONÍVEL DE UM FLUIDO, e tem sido calculada para uma ampla faixa de condições de diversos fluidos.

Do mesmo modo  $\Delta H$  = Diferença de Entalpia por unidade de tempo

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(pv)$$

Os valores para vapor d'água e água saturada, podem ser encontrados no standard ASME Steam Tables, onde a água saturada a 0°C tem sido considerada com Entalpia zero. Deve-se frisar que essas tabelas são encontradas em livros técnicos diversos.

A equação que representa a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser simplificada com poucas considerações que são aplicáveis a muitos sistemas industriais e não industriais, como:

- a) A Energia Potencial e a Energia Cinética em geral têm variações muito pequenas comparadas com variações de outras formas de energia, podendo, portanto, ser desprezadas.
- b) Nos processos contínuos em regime permanente, não há acúmulo de energia.
- c) Nos processos com reação química deve ser adicionado às variações de Entalpia, a Entalpia corresponde a cada uma das reações que ocorrerem.

Mas a Primeira Lei representa um cenário ideal, e aí é quando entra a Segunda Lei da Termodinâmica.

A Segunda Lei descreve a direção do processo e a degradação de energia.

Inicialmente observe estes fatos corriqueiros, como:

- > Uma xícara de café quente na mesa da cozinha não se torna mais quente enquanto a temperatura desse ambiente continuar mais fria que o café.
- > Os humanos se tornam mais velhos e assim por diante.
- > Uma pedra que cai de uma elevação, não retorna ao alto, perdeu sua energia potencial, transformando-a em calor que se dissipou no ambiente.

A Segunda Lei pode ser enunciada assim:

“Você não pode atingir o equilíbrio, ou seja, ter o ganho igual à perda” (“You can't break even”) Ou de outra forma:

“Em todos os processos conhecidos pela humanidade, alguma perda (degradação) de energia ocorre”. Pode ser devido a atrito, escapamento de calor do sistema, distúrbios de fluxo ou uma variedade de outros fatores.

Na realidade a Segunda Lei da Termodinâmica é muito clara no conceito do Ciclo de Carnot (Sadi Carnot, jovem engenheiro francês, 1824) que nos diz:

“A máquina mais eficiente que pode ser construída opera com uma entrada de calor (heat input) ( $Q_H$ ) a alta temperatura ( $T_H$ ) e uma descarga de calor (heat discharge) ( $Q_L$ ) a baixa temperatura ( $T_L$ ), no qual:

$$Q_H / T_H - Q_L / T_L = 0$$

Esta equação representa a máquina teoricamente ideal.

Cientistas definiram uma propriedade conhecida como ENTROPIA, que na sua mais simples forma é a MEDIDA DA DEGRADAÇÃO DA ENERGIA e é baseada na razão do Calor Transferido no processo para a Temperatura medida em Kelvin ( $Q/T$ ).

Em todo processo, a mudança global de Entropia de um sistema e sua vizinhança aumenta.

Então, no mundo real, “de verdade”, a equação torna-se:

$$Q_H / T_H - Q_L / T_L < 0$$

Mesmo a Entropia parecendo um termo abstrato, ela é muito importante na determinação da eficiência dos processos, porque energia degradada não é energia útil.

E o Ciclo de Carnot nos ensina dois pontos muito importantes sobre todos os processos do “mundo de verdade” (mundo real):

1 – O processo não pode ser feito para produzir Trabalho, sem alguma extração (saída) de Calor do processo ( $Q_L$ ), mostrado nas equações acima, referentes à Segunda Lei. No caso de um ciclo: caldeira, turbina, condensador e bomba de água de alimentação, a remoção de calor é no condensador do vapor exausto da turbina.

2 – A eficiência da máquina de Carnot ( $\eta$ ) é definida como:

$$\eta = 1 - T_L / T_H$$

Então a eficiência aumenta se a temperatura de entrada aumenta ou se a temperatura do exausto diminui.

## EFEITOS PRÁTICOS NA EFICIÊNCIA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS:

### TURBINA:

As turbinas ideais são isoentrópicas, e teriam rendimento de 100%, o que sabemos é que não será nunca a realidade prática. Contudo são máquinas de grande eficiência registrando-se valores entre 80% e 90%.

### CONDENSADOR:

Vejamos a influência do condensador (saída de calor do processo) na eficiência de um sistema, considerando por exemplo três situações de exausto, turbina ideal e as seguintes condições de entrada de vapor na turbina:

Vapor na entrada da turbina  $70\text{kgf/cm}^2\text{abs}$  ( 1.000 psia) e  $537,8^\circ\text{C}$  ( $1.000^\circ\text{F}$ )  
Vazão de vapor para a turbina 453,5 t/h (1.000.000 lb/h)  
Entalpia: 3.503,14 kJ/kg (1.505,9 Btu/lb)

#### Primeira situação: exausto para a atmosfera

Vapor na saída: 1 atm abs (14,7 psia) qualidade 93%  
Trabalho global obtido: 124,5 MW

#### Segunda situação: exausto no vácuo, 1 psia (aproximadamente 2 in Hg)

Vapor de saída:  $0,07\text{kgf/cm}^2\text{abs}$  ( 1psia) qualidade 82%  
Trabalho global obtido: 170,6 MW

Um aumento de 37% na produção de Trabalho, mostrando o grande efeito de  $T_H$  ser reduzida.

Observando que o volume específico do vapor nesse caso é 17,166 m<sup>3</sup>/kg (274,9 ft<sup>3</sup>/lb) e o volume específico da água também nessa mesma condição é de 0,001007 m<sup>3</sup>/kg (0,016136 ft<sup>3</sup>/lb), vemos que o processo de condensação reduz o volume do fluido 17.036 vezes.

A condensação do vapor, portanto, gera um forte vácuo no condensador, o que na realidade age como uma força para puxar o vapor através da turbina.

Terceira situação: exausto no vácuo, mas de 2 psia (condensador sujo, etc)

Vapor de saída: 0,14 kgf/cm<sup>2</sup> abs (2 psia)

Trabalho global obtido: 160 MW

Perda em relação à Segunda situação, de 10,6 MW

Fica então demonstrado porque o tratamento adequado da água de resfriamento, a erradicação de entradas de ar indesejáveis e o acompanhamento do desempenho do condensador é muito importante. Iniciativas de melhoria de performance de condensadores tem resultado em economias líquidas entre US\$ 500,000 e US\$1,500,000 por ano por planta.

## GERAÇÃO E SUPERAQUECIMENTO DO VAPOR DE ALTA PRESSÃO:

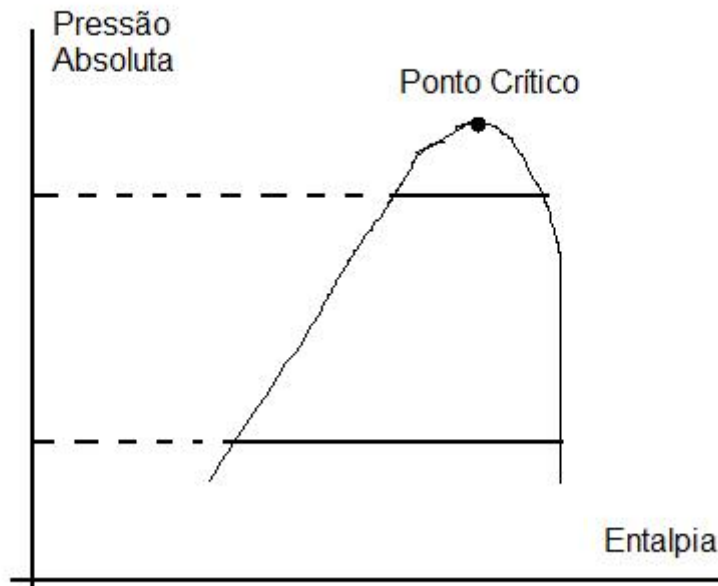
A diferença da temperatura do vapor superaquecido para a temperatura de saturação na mesma pressão é denominada GRAU DE SUPERAQUECIMENTO.

Quando lembramos que aproximadamente 2.326,275 kJ (1.000 Btu) são necessários para transformar um quilograma de água em um quilograma de vapor, observamos como nos exemplos acima (Entalpia do vapor de alta pressão igual a 3.503,13 kJ/kg (1.505,9 Btu/lb), que somente 1/3 da energia do vapor superaquecido está disponível para produzir Trabalho, numa turbina convencional.

Com modernos geradores de vapor supercríticos (pressão > 225,6 kgf/cm<sup>2</sup> abs (3.208 psia), a eficiência global chega muito perto de 45% e no caso de Ciclo Combinado pode atingir 60%, onde a produção de energia elétrica está dividida entre combustão e turbina a vapor.

A Termodinâmica mostra que Trabalho produzido e eficiência aumentam com o aumento da pressão de geração do vapor. Basta analisar o gráfico Pressão x Entalpia, onde se pode ver o alto valor do calor de

condensação/vaporização nas pressões mais baixas e o inverso, o baixo valor do calor de condensação/vaporização nas pressões elevadas e atingido zero no ponto crítico.



Finalmente duas informações técnicas de caráter prático sobre sistemas termodinâmicos para geração de energia:

1 – A umidade do vapor exausto das turbinas deve ser limitada ao máximo de 10%.

2 – Sistemas com turbina de extração e condensação, onde o vapor com uma só extração vai aquecer a água de alimentação das caldeiras, a extração do vapor deve ser projetada para elevar a temperatura da água de alimentação até o valor médio entre a temperatura do condensado e a temperatura do vapor saturado da caldeira.

Salvador, 21 de fevereiro de 2011.

Antonio José Ferreira Saraiva – BA 9208/D CREA  
Engenheiro Químico  
Engenheiro de Processamento de Petróleo  
Especialização em Açúcar e álcool.