

# EXERGIA E APROVEITAMENTO DE BAIXOS POTENCIAIS NA INDÚSTRIA

EXERGIA É UMA PROPRIEDADE TERMODINÂMICA QUE FOI INTRODUZIDA NO MEADO DA DÉCADA DE 1950, COMO UMA MEDIDA DA CAPACIDADE DE UMA CORRENTE QUENTE PRODUIR TRABALHO ÚTIL.

EXERGIA ESTÁ RELACIONADA A DUAS OUTRAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS, ENTALPIA E ENTROPIA, ATRAVÉS DA SEGUINTE EQUAÇÃO:

$$E_x = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

H = ENTALPIA ESPECÍFICA DA CORRENTE

S = ENTROPIA ESPECÍFICA DA CORRENTE

T = TEMPERATURA DA CORRENTE EM KELVIN

O SUBSCRITO “0” INDICA A CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA, QUE PARA AS PLANTAS QUÍMICAS DEVE SER A TEMPERATURA E PRESSÃO PRESENTES NO AMBIENTE.

DAÍ PODEMOS TIRAR ALGUMAS CONCLUSÕES IMPORTANTES:

A EXERGIA CONTIDA NUMA CORRENTE É UMA FRAÇÃO DA ENTALPIA CONTIDA NESSA CORRENTE.

A ENTALPIA CONTIDA NA CORRENTE, POR SI SÓ, NÃO É CAPAZ DE INDICAR O POTENCIAL DE TRABALHO ÚTIL QUE PODE SER EXTRAÍDO DESSA FONTE DE CALOR.

SE UMA CORRENTE ESTÁ EM EQUILÍBRIO (TÉRMICO, MECÂNICO OU QUÍMICO) COM A VIZINHANÇA, PODE NÃO PRODUIR TRABALHO.

ISTO SE CONSTITUE NA PRINCIPAL DIFERENÇA ENTRE EXERGIA E ENERGIA LIVRE DE GIBBS, QUE É UMA PROPRIEDADE DE UMA CORRENTE QUE INDEPENDE DO AMBIENTE VIZINHO.

EM MUITAS INDÚSTRIAS QUE SÃO GRANDES CONSUMIDORAS DE ENERGIA, UMA GRANDE QUANTIDADE DESSA ENERGIA É DESCARTADA, QUASE QUE SEMPRE SOBRE A FORMA DE CALOR, PARA O MEIO AMBIENTE ATRAVÉS DE EFLUENTES LÍQUIDOS E/OU GASOSOS.

SÃO CORRENTES ONDE O NÍVEL DE TEMPERATURA NÃO PERMITE SEU USO NOS PROCESSOS E MUITAS VEZES SEU APROVEITAMENTO NÃO É ECONOMICAMENTE VIÁVEL.

**PRINCIPAIS INDÚSTRIAS QUE DESCARTAM ENERGIA E SUAS TEMPERATURAS TÍPICAS DE EXAUSTOS:**

INDÚSTRIA	EFLUENTE (°C)	EFLUENTE
PETROQUÍMICA E REFINO DE PETRÓLEO	150 A 300	LÍQUIDO, GÁS
LIQUEFAÇÃO GAS NATURAL	150 A 260	GÁS
METALURGIA	100 A 350	LÍQUIDO, GÁS
PAPEL E CELULOSE	80 A 100	LÍQUIDO, GÁS
CERÂMICA	150 A 450	GAS
SISTEMAS DE SECAGEM	90 A 370	LÍQUIDO,GAS
INCINERAÇÃO	150 A 430	GÁS

NESTE PONTO DE VISTA, A ENERGIA TÉRMICA (CALOR) É CONSIDERADA A MAIS DEGRADADA FORMA DE ENERGIA.

ENTÃO: UM GÁS QUENTE DE CHAMINÉ, UM VAPOR DE BAIXA PRESSÃO OU MESMO UMA CORRENTE DE EFLUENTE LÍQUIDO QUENTE, TODOS TEM POTENCIAL PARA PRODUZIR TRABALHO ÚTIL.

A RAZÃO EXERGIA/ENTALPIA AUMENTA COM A TEMPERATURA DA FONTE QUENTE. ESTES POTENCIAIS PODEM SER CALCULADOS PARA QUALQUER TIPO DE CORRENTE.

ESSA ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO EXERGÉTICA NO SETOR INDUSTRIAL, CONTRIBUI TANTO PARA MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COMO PARA A PROTEÇÃO AMBIENTAL.

PODE-SE DEFINIR UMA EFICIÊNCIA PARA A RECUPERAÇÃO DE EXERGIA, COMO SENDO:

$$\frac{\text{TRABALHO LÍQUIDO PRODUZIDO}}{\text{VARIÇÃO DE EXERGIA}}$$

SÃO CONCEBÍVEIS, EFICIÊNCIAS EXERGÉTICAS TÃO ALTAS QUANTO 70%.

CÁLCULO DA VARIÇÃO DE EXERGIA ENTRE UM ESTADO INICIAL (SUBSCRITO i) E UM ESTADO FINAL (SUSCRITO f):

$$\text{DIFERENÇA } E_x = (H_f - H_i) - T_o \cdot (S_f - S_i)$$

AS ENTALPIAS PARA MISTURAS IDEAIS DE DIFERENTES COMPONENTES PODEM SER CALCULADAS COMO A SOMA DAS ENTALPIAS DOS COMPONENTES, CADA UMA MULTIPLICADA PELA FRAÇÃO MOLAR DO RESPECTIVO COMPONENTE.

NO CASO DAS ENTROPIAS, ESTE PROCEDIMENTO NÃO PODE SER CONSIDERADO. NESSE CASO USA-SE A EQUAÇÃO ABAIXO, PARA MISTURAS IDEAIS:

$$S = \sum_j (x_j \times S_j) - R \times \sum_j (x_j \times \ln(x_j))$$

PARA OS CASOS PRÁTICOS EM GERAL COMO: GASES REAIS, PRODUTOS QUÍMICOS E MISTURAS COMPLEXAS, PODEM SER USADOS OS SIMULADORES DE PROCESSO COMO ASPEN PLUS, CHEMCAD E PROSIM PLUS, QUE SÃO BEM ELABORADOS PARA O

CÁLCULO DE PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS TANTO DE SUBSTÂNCIAS PURAS, COMO MISTURAS E SOLUÇÕES (IDEAIS E NÃO IDEAIS).

PRIMEIRO EXEMPLO: (GÁS IDEAL)

CORRENTE DE NITROGÊNIO A 100°C SENDO A REFERÊNCIA 25°C E PRESSÃO ATMOSFÉRICA PADRÃO. NESSE CASO A RELAÇÃO EXERGIA/ENTALPIA = 0,11.

SIGNIFICA QUE DA FONTE DE CALOR (NITROGÊNIO A 100°C), NO MÁXIMO 11% DA ENENTALPIA TOTAL É RECUPERÁVEL COMO TRABALHO NO EIXO DE UMA MÁQUINA.

SEGUNDO EXEMPLO: (VAPOR SATURADO E CONDENSADO SATURADO)

CORRENTE DE VAPOR SATURADO A 100°C TENDO COMO REFERÊNCIA A ÁGUA LÍQUIDA SATURADA A 25°C. NESSE CASO AS RELAÇÕES EXERGIA/ENTALPIA, SÃO NO MÁXIMO 0,17 PARA O VAPOR E 0,11 PARA O CONDENSADO.

### TECNOLOGIAS PARA APLICAÇÃO

ALGUMAS TECNOLOGIAS ESTÃO DISPONÍVEIS OU SENDO DESENVOLVIDAS PARA CONVERSÃO DE FONTES DE CALOR DE BAIXO POTENCIAL TÉRMICO EM ELETRICIDADE.

O CICLO DE RANKINE COM VAPOR D'ÁGUA, NÃO É APROPRIADO PARA CASOS EM QUE A TEMPERATURA DA FONTE DE CALOR É MENOR QUE 240°C.

COMO ALTERNATIVAS TEM SIDO PROPOSTO O CHAMADO “CICLO RANKINE ORGÂNICO” OU ORC (“ORGANIC RANKINE CYCLE”) E O CICLO KALINA.

O ORC USA COMO FLUIDOS DE TRABALHO QUE TEM PRESSÃO DE VAPOR MAIOR QUE A DA ÁGUA. PARA ISSO TEM SIDO PROPOSTO REFRIGERANTES TAIS COMO R11, R113 E R114. PARA ORC, ALGUNS HIDROCARBONETOS TAIS COMO ISOBUTENO,

ISOPENTANO E CICLOPENTANO ESTÃO SENDO ALTERNATIVAS PROMISSORAS.

O USO DA AMÔNIA (R717), ESTÁ MUITO PERTO DE SE TORNAR UMA SOLUÇÃO COMERCIAL, POIS APESAR DE SER MUITO TÓXICA, TEM PRESSÃO DE VAPOR MUITO MAIOR QUE A DA ÁGUA, PARA UMA DADA TEMPERATURA.

ALÉM DISSO, TEM A MASSA MOLECULAR MUITO PRÓXIMA DA ÁGUA E TURBINAS A VAPOR CONVENCIONAIS, PODEM SER EMPREGADAS.

UM OUTRO CICLO TERMODINÂMICO, FORTEMENTE CONSIDERADO É O CICLO KALINA. ESTE CICLO USA COMO FLUIDO DE TRABALHO UMA MISTURA DE AMÔNIA E ÁGUA.

Prof. Antonio José Ferreira Saraiva  
Eng. Químico  
Eng. Proc. Petróleo  
Ba, 04/05/2007

#### REFERÊNCIAS:

“Get the Most Out of Waste Heat” – Chemical Engineering – october 2006 – pag 40 a 43.

Termodinâmica Amistosa para Engenheiros – Octave Levenspiel

Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação – Vol I – Electo Lora e Marco Nascimento.