



CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA PROPRIEDADE TERMODINÂMICA EXERGIA E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PARA ANÁLISE DE PROCESSOS REAIS

Sara Cristina Silva¹, Esly Ferreira da Costa Junior², Andréa Oliveira Souza da Costa²

1. Discente do Curso de Engenharia Química
(saracristina.s@gmail.com)

2. Docente do Curso de Engenharia Química
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo (CCA), Campus de Alegre, Alto
Universitário, s/n, Caixa Postal 16, Guararema, Alegre, ES, BRASIL.
CEP: 29500.000

Recebido em: 06/10/2012 – Aprovado em: 15/11/2012 – Publicado em: 30/11/2012

RESUMO

A exergia é definida como sendo o maior trabalho teórico possível de ser obtido conforme o ambiente de referência interaja até o equilíbrio com o sistema de interesse. A exergia pode ser dividida em quatro partes: cinética, potencial, física e química. O método da análise exérgica é particularmente apropriado na busca de condições operacionais mais eficientes. Tal técnica permite a determinação de rejeitos e perdas energéticas em termos de sua localização, tipo e valores reais. Para processos abertos, usualmente encontrados em indústrias, aplica-se o cálculo de exergia total em cada corrente de entrada e saída do volume de controle adotado. Desta forma, é possível encontrar valores de eficiência exérgica para cada sistema abordado. A eficiência exérgica pode ser avaliada como a razão do trabalho real desenvolvido pelo trabalho máximo teórico. Este conceito é útil para estabelecer uma diferença entre meios para utilização de recursos energéticos que são termodinamicamente eficazes e aqueles que não o são. O objetivo deste trabalho consiste em apresentar os principais fundamentos que norteiam esta técnica. A motivação para o desenvolvimento deste estudo reside na significativa eficiência do uso da técnica de análise exérgica na busca por condições energéticas eficientes.

PALAVRAS-CHAVE: Exergia, eficiência exérgica, exergia física, exergia química.

FUNDAMENTAL CONCEPTS OF THERMODYNAMICS PROPERTY EXERGY AND EXAMPLES OF APLICATIONS FOR ANALISES IN REAL PROCESS

ABSTRACT

The exergy is the highest theoretical work can be obtained according the reference environment interacts until equilibrium with the system of interest. The exergy can be divided into four parts: kinetic, potential, physics and chemistry. The method of exergy analysis is particularly appropriate in the search for more efficient operating conditions. This technique allows the determination of waste and energy losses in terms of its location, type and real values. To open processes, commonly found in industries, applies the exergy calculation total in each stream entry and exit of control volume adopted. Thus, it is possible to find exergetic efficiency values for each

system picked. The exergetic efficiency can be measured by rate of real work carried and the maximum theoretical work. This concept is useful for establish a difference between means for use energy sources which are thermodynamically efficient and those that are not. The objective of this work is to present the main fundamentals that guide this technique. The motivation for the development of this study resides in use efficiency of analysis exergetic in the search for energy efficient conditions

KEYWORDS: Exergy, exergetic efficiency, physical exergy, chemical exergy

INTRODUÇÃO

A busca por um melhor aproveitamento dos recursos energéticos é uma necessidade constante no setor industrial, motivada por restrições ambientais e gerenciamento de custos. A energia em suas diversas formas e usos representa um insumo indispensável aos mais variados setores da indústria (SANTOS, 2007). É possível afirmar que a rentabilidade de uma indústria está diretamente relacionada à forma com que seus recursos energéticos são empregados. Sendo assim, destacam-se plantas que possuem menores gastos e maior reaproveitamento energético. Desta forma, a indústria necessita aperfeiçoar cada vez mais o (re)aproveitamento de energia, uma vez que isto pode diminuir o custo do processo (SILVA *et al.*, 2012). Em literatura aberta são comuns os trabalhos que analisam a eficiência energética de processos industriais. Neste ponto ressaltam-se dois estudos: o trabalho de CARREIRO (2009) e o de MACEDO *et al.*, (2011) que serão estudados neste trabalho posteriormente.

Um dos objetivos da termodinâmica é estabelecer critérios gerais a fim de valorizar o funcionamento e desenho de sistemas industriais no qual a energia tem um papel importante. Como por exemplo, é evidente a importância de se desenvolverem sistemas térmicos que utilizem eficientemente recursos energéticos não renováveis, como petróleo, gás natural e carvão. Portanto, ao analisar estes processos, é importante delinear a forma de determinar sua eficiência (SOTOMONTE, 2009; MORAN & SHAPIRO, 2006; YUCER & HEPBASLI, 2011).

O método da análise exergetica é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais (MORAN & SHAPIRO, 2006). Isto é possível uma vez que este conceito está intimamente ligado aos fundamentos da 2ª Lei da Termodinâmica.

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia muda de uma forma a outra (calor; trabalho; energias cinéticas, potencial e interna), mas sempre a soma de todas estas permanece constante durante todo o processo, ou seja, a energia não é destruída. No entanto, a segunda lei da termodinâmica impõe limitações a todos os processos de transformação energética (SOTOMONTE, 2009). Segundo VALERO (1998), é este o princípio responsável pela degradação da energia nestes sistemas térmicos, pois uma parte do fluxo energético acaba por converter-se em calor à temperatura ambiente e deixa de ser aproveitável. Por esta razão, a análise de primeira lei (análise energética) não é suficiente para identificar perdas energéticas e eficiências destes sistemas. Desta forma, a análise exergetica, segundo VELÁZQUEZ (2006), supera as limitações de Primeira Lei (análise energética).

MORAN & SHAPIRO (2006) definem exergia como sendo o maior trabalho

teórico possível de ser obtido conforme o ambiente de referência interaja até o equilíbrio com o sistema de interesse. Consequentemente, segundo TORÍO *et al.*, (2009), a exergia é uma medida do potencial de um fluxo de energia para ser transformada em energia de alta qualidade. A análise exérgica tem sido aplicada desde os anos 1970, com o objetivo de encontrar mais utilização racional da energia, o que significa que, ao mesmo tempo reduzindo consumo de combustíveis fósseis e transformando a aplicação de eficiência energética.

O ambiente de referência para exergia é definido pela parte maior das vizinhanças, que não sofre variação em suas propriedades intensivas causada por qualquer processo que ocorra no sistema de interesse. MORAN & SHAPIRO (2006) convencionam que o ambiente é tomado como um sistema simples compressível, que é grande em extensão e cujas temperatura (T_0) e pressão (p_0) são uniformes. É necessário considerar também um meio livre de irreversibilidades.

Bem como o ambiente de referência, o estado morto é também um conceito relevante no estudo de exergia. Ele é definido como aquele em que uma quantidade fixa de matéria em consideração pode ser imaginada como selada em um invólucro impermeável, portanto sem possibilidade de escoamento de massa, em repouso em relação ao ambiente, e internamente na temperatura e pressão do ambiente. No estado morto, tanto o sistema quanto o ambiente possuem energia, mas não possuem exergia, pois não há possibilidade de uma variação espontânea no interior do ambiente ou do sistema, nem pode haver uma interação entre eles (SANTOS, 2005).

DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DE EXERGIA

A definição matemática de exergia é apresentada na Equação (1). A partir da aplicação de balanços de energia e de entropia a um sistema interagindo com o meio ambiente, tem-se a equação (1), que permite calcular a exergia de um sistema em certo estado, relativa ao ambiente de referência especificado.

$$Ex \equiv \left[\left(U + \frac{Vel^2}{2} + gZ \right) - U_0 \right] + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

Onde $E(=U + EC + EP)$, E é a energia do sistema decomposta em U energia interna, EC energia potencial, EP energia potencial, V e S denotam o volume e a entropia do sistema, respectivamente, enquanto U_0 , V_0 e S_0 são os valores das mesmas propriedades se o sistema estivesse no estado morto. A equação (1) demonstra que as unidades de exergia são as mesmas da energia.

Embora a exergia seja uma propriedade extensiva, em algumas situações pode ser interessante trabalhar com a exergia específica em termos de unidade de massa, como representado pela equação (2).

$$ex = [u - u_0] + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{Vel^2}{2} + gZ \quad (2)$$

Segundo KOTAS (1995), a exergia pode ser dividida em quatro partes: cinética, potencial, física e química (Eq. (3)).

$$Ex = Ex^f + Ex^q + Ex^c + Ex^p \quad (3)$$

Onde: Ex^c = exergia cinética; Ex^p = exergia potencial; Ex^f = exergia física; Ex^q = exergia química.

As exergias cinética e potencial podem ser completamente convertidas em trabalho, quando avaliadas em relação à condição ambiente. Assim, a exergia cinética e potencial são iguais à energia cinética e potencial. Estas podem ser calculadas pelas equações (4) e (5) (LUIZ, 2007).

$$\dot{Ex}^c = \dot{m} \frac{Vel^2}{2} \quad (4)$$

$$\dot{Ex}^p = \dot{m} \cdot g \cdot z_0 \quad (5)$$

Onde Vel denota a velocidade relativa com que o volume de controle se desloca em relação a terra; o g denota a aceleração da gravidade e o z_0 é a altura do volume de controle em relação ao nível de referência.

Segundo SANTOS (2005), pode-se considerar que a velocidade do sistema e a altura sejam nulas em relação ao ambiente, e desta forma tem-se que $Ex^c = Ex^p = 0$. Portanto, a exergia total passa a ser a combinação da exergia física e exergia química.

De acordo com FRANÇA & SOARES (2005), SANTANA (2004), MORAN & SHAPIRO (2006), CARREIRO (2009) E MACEDO *et al.* (2011), para um volume de controle com fluxo de massa, a exergia física para o escoamento único é dada por (8). Esta relação é também conhecida por exergia de fluxo, utilizada para o cálculo de exergia física para sistemas abertos.

$$Ex^f = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (6)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica, T_0 é a temperatura do estado de referência, h e s são a entalpia específica e a entropia específica do fluido, respectivamente. O índice “0” corresponde ao estado de referência.

Quando a exergia física do sistema é zero pode-se dizer que o mesmo está em equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente, ou ainda que a contribuição térmica e mecânica é nula.

Percebe-se que há certa concordância entre os autores acerca da definição e modelagem matemática do conceito de exergia termomecânica. O mesmo não ocorre para a definição e formulação do conceito de exergia química, como poderá ser visto a seguir.

SOTOMONTE (2009) reporta que quando o sistema atinge um equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente de referência, ainda é possível obter trabalho adicional até alcançar o equilíbrio químico com o ambiente.

Segundo KOTAS (1995), a exergia química se define como o máximo trabalho obtido quando a substância em consideração é trazida desde o estado ambiental ao equilíbrio termodinâmico completo com o estado de referência, mediante processos que envolvem transferência de calor como sistemas reativos e intercâmbio de substâncias com o entorno (sistemas não reativos).

Dos sistemas reativos, pode-se obter trabalho da energia liberada das reações químicas. Enquanto, dos sistemas não reativos é possível obter trabalho mecânico

mediante a difusão de seus constituintes da composição inicial até o equilíbrio com o seu entorno. Assim, a exergia química se calcula com a diferença do potencial químico entre os dois estados como representado pela equação (7).

$$Ex^q = \sum_i n_i [\mu_i - \mu_{i,o}] \quad (7)$$

Para SANTOS (2005), a exergia química, deve ser analisada diferentemente para fluidos que fazem parte da composição do ar e para fluidos combustíveis.

O primeiro caso se refere aos gases N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O e outros que estão presentes no ar ambiente com a temperatura T_0 e pressão parcial (p_i) fornecida pela equação (8).

$$p_i = y_i^e \cdot p_o \quad (8)$$

Onde é y_i^e a fração molar do gás i no ambiente.

Considerando a mistura de n gases, cada um deles está presente no ar ambiente, a exergia química da mistura é calculada através da equação (9).

$$Ex^q = \frac{m}{M} \cdot \sum_i y_i \cdot \bar{ex}_i^q + R \cdot T_o \cdot \sum_i y_i^e \cdot \ln(y_i^e) \quad (9)$$

Onde M é a massa molar da mistura, R é a constante universal dos gases, y_i é a fração molar da espécie i na mistura e \bar{ex}_i^q é a exergia química padrão que é definida por (10).

$$\bar{ex}_i^q = -R \cdot T_o \cdot \ln\left(\frac{y_i^e \cdot p_o}{p_o}\right) \quad (10)$$

Tão logo, MORAN & SHAPIRO (2006), trabalham inicialmente com a definição de exergia química em um processo de combustão de compostos hidrocarbonetos. Os autores definem a exergia química nesta situação como sendo o trabalho teórico máximo que pode ser desenvolvido por um sistema que é formado por um ambiente a uma quantidade de combustível hidrocarbonado a T_0 e p_0 reagindo com o O_2 do ambiente de acordo com a fórmula (11).



Para um sistema que possui como correntes de entrada um combustível hidrocarboneto e uma corrente de O_2 puro, e possui como correntes de saída o CO_2 e H_2O , onde todas as correntes estão a T_0 e p_0 , aplica-se um balanço de energia e entropia. Para isto, considera-se regime permanente, não há contribuições de energia potencial e cinética, só há uma temperatura em todo o contorno do sistema que é T_0 de forma que o sistema só possui uma taxa de transferência de calor.

Ao considerar que este é um processo totalmente reversível, obtém-se a definição de exergia demonstrado por (12).

$$\bar{ex}^q = \left[\bar{h}_c + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{h}_{o_2} - a \bar{h}_{co_2} - \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} \right] - T_0 \left[\bar{s}_c + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{s}_{o_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{s}_{H_2O} \right]$$

(12)

Onde $\bar{e}x^q$ denota a exergia química específica, \bar{h} é a entalpia específica de cada composto e \bar{s} é a entropia específica.

A equação (12) pode ser expressa em termos da função de Gibbs (13).

$$\bar{e}x^q = \left[\bar{g}_c + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{CO_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O} \right] + \bar{R} T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^{\bar{g}})^{a+b/4}}{(y_{CO_2}^{\bar{g}})^a (y_{H_2O}^{\bar{g}})^{b/2}} \right] \quad (13)$$

SILVA (2010) utiliza a equação (14) descrita por MORAN & SHAPIRO (2006) para o cálculo da exergia química para uma mistura de gases ideais a T_0 e p_0 , que consiste nas substâncias presentes como gases no ambiente.

$$\bar{e}x^{qui} = \sum_i y_i \cdot \bar{e}x_i^{qui} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_i y_i \cdot \ln y_i \quad (14)$$

BALANÇO DE EXERGIA PARA SISTEMAS ABERTOS

Para sistemas onde a exergia química é igual a zero, ou seja, para sistemas onde não existe nenhuma oportunidade para realização de trabalho a partir de um desequilíbrio químico entre as espécies envolvidas, o cálculo da eficiência exergética é realizado a partir de manipulações na equação do balanço de exergia. Desta forma, o estudo desta equação é de fundamental importância para delineamento de eficiências de equipamentos como a turbina a vapor geradora de energia elétrica, válvulas de expansão, trocador de calor, entre outros.

Assim, MORAN & SHAPIRO (2006) fornece o balanço de exergia sob a forma de taxa para volume de controle, ele está representado pela equação (15).

$$\frac{dEx_{vc}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{vc} - p_0 \cdot \frac{dV_{vc}}{dt} \right) + \sum_s \dot{m}_s ex_{fs} - \sum_e \dot{m}_e ex_{fe} - \dot{E}x_d \quad (15)$$

Onde: $\frac{dEx_{vc}}{dt}$ representa a taxa de variação de exergia do volume de controle, \dot{Q}_j representa a taxa de transferência de calor na região do contorno onde a temperatura é T_j . \dot{W}_{vc} representa a taxa de transferência de trabalho excluindo-se o trabalho de fluxo. A taxa de transferência de exergia correspondente é dada por $\left(\dot{W}_{vc} - p_0 \cdot \frac{dV_{vc}}{dt} \right)$, em que $\frac{dV_{vc}}{dt}$ é a taxa de variação de volume. Os termos $\dot{m}_e ex_{fe}$ e $\dot{m}_s ex_{fs}$ levam em conta a taxa de transferência de exergia associada ao escoamento de massa e ao trabalho de fluxo na entrada "e" e na saída "s". O termo $\dot{E}x_d$ leva em conta a taxa de destruição de exergia devida às irreversibilidades no interior do volume de controle. A taxa de transferência de exergia correspondente é dada por $\left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j$ que possui relação direta com a 2ª lei da termodinâmica, especialmente quando se considera a equação de Carnot (Eq. 16).

$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_Q|} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (16)$$

Na Equação (16) η denota a eficiência térmica, W denota o trabalho produzido por uma máquina de Carnot, Q_Q é o calor absorvido, T_F e T_Q representam a temperatura da fonte fria e da fonte quente respectivamente.

Em relação à Equação (15), pode-se dizer ainda que termo \dot{W}_{vc} é o trabalho de eixo e o termo $\left(p_0 \cdot \frac{dV_{vc}}{dt}\right)$ é a contabilização do trabalho de compressão e expansão. Os trabalhos de fluxo são representados na equação pelos termos $\dot{m}_e ex_{fe}$ e $\dot{m}_s ex_{fs}$.

Neste ponto, vale ressaltar que o balanço exergetico apresenta uma ampla aplicação para encontrar valores de propriedades do sistema adotado e valores das variáveis envolvidas na equação em geral. Isto só é possível, fazendo-se as devidas considerações para o volume de controle. Como por exemplo, é possível encontrar, a partir do balanço, a taxa de destruição de exergia em um trocador de calor, ou mesmo o custo dessa perda.

EFICIÊNCIA EXERGÉTICA PARA PROCESSOS ABERTOS E REATIVOS

Dispositivos projetados para realizar trabalho utilizando um processo de combustão invariavelmente possuem irreversibilidades e perdas associadas a suas operações. Conseqüentemente, dispositivos reais produzem um trabalho que é apenas uma fração do valor máximo teórico que poderia ser obtido em circunstâncias idealizadas.

A eficiência dos sistemas pode ser avaliada utilizando o conceito de eficiência exergetica, a partir de uma análise dos fluxos de exergia dos sólidos, gases e líquidos do sistema.

As eficiências (mecânica, térmica, etc), não se baseiam na Segunda Lei da Termodinâmica. Estas, geralmente, dão mais ênfase ao ponto de vista da 1ª Lei da Termodinâmica. Desenvolvimentos na análise exergetica permitem a definição de novos critérios de desempenho, que ofereçam vantagens sobre os critérios tradicionais (SILVA, 2002).

O desempenho de dispositivos, cujo propósito é a realização de trabalho, pode ser avaliado como a razão do trabalho real desenvolvido pelo trabalho máximo teórico. Esta razão é um tipo de eficiência exergetica (Segunda Lei) (MORAN & SHAPIRO, 2006).

A análise exergetica mostra que quanto mais a temperatura de equilíbrio for próxima entre os fluxos que alimentam o sistema e a temperatura de conversão, melhor será a eficiência exergetica e menor será o gasto relativo de energia no processo (SILVA, 2010).

As eficiências exergeticas são úteis para estabelecer uma diferença entre meios para utilização de recursos energéticos que são termodinamicamente eficazes e aqueles que são menos eficazes. As eficiências exergeticas também podem ser usadas para a avaliação da eficácia das medidas de engenharia tomadas para a melhoria do desempenho de um sistema térmico. Isso é feito comprando os valores de eficiência antes de após as modificações, de modo a mostrar o quão melhor o processo se tornou (MORAN & SHAPIRO, 2006).

ASPECTOS DA EXERGIA

Os aspectos exergéticos podem ser obtidos através do estudo das equações apresentadas e através de deduções feitas a partir de observações do tema. Neste sentido, MORAN & SHAPIRO (2006), assim como ROCHA (2010), reportam algumas interpretações realizadas. Estas interpretações colaboram no entendimento dos conceitos de exergia e estão dispostas a seguir.

A exergia é uma medida do desvio do estado de um sistema quando comparado ao do ambiente. Consequentemente, é um atributo conjunto do sistema e do ambiente. No entanto, uma vez que se especifique o ambiente pode-se atribuir um valor para a exergia em termos de valores de propriedades do sistema, apenas, e então a exergia pode ser considerada uma propriedade (ROCHA, 2010; MORAN & SHAPIRO, 2006).

O valor da exergia não pode ser negativo. Se o sistema estivesse em qualquer estado que não o estado morto, o sistema poderia modificar sua condição espontaneamente na direção do estado morto. Consequentemente, qualquer variação no estado de um sistema em direção ao estado morto deve ser realizada com pelo menos zero trabalho sendo realizado, e assim o trabalho máximo (exergia) não pode ser negativo (MORAN & SHAPIRO, 2006).

A exergia não é conservada, ela pode ser destruída pelas irreversibilidades. Um caso-limite ocorre quando a exergia é completamente destruída, o que aconteceria se um sistema sofresse uma variação espontânea até o estado morto sem possibilidade de obtenção de trabalho. O potencial para o desenvolvimento de trabalhos que originalmente existia seria totalmente desperdiçado em tal processo espontâneo (MORAN & SHAPIRO, 2006).

A exergia, como dito anteriormente, pode ser definida como sendo o trabalho teórico máximo possível de ser obtido da interação de um sistema de interesse com o ambiente de referencia até o equilíbrio. Alternativamente, a exergia pode ser entendida como o módulo do valor teórico mínimo de fornecimento de trabalho necessário para levar o sistema do estado morto para um determinado estado (MORAN & SHAPIRO, 2006).

ESTUDO DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE EXERGÉTICA PARA PROCESSOS REAIS

Como mencionado anteriormente, é interessante, posteriormente a apresentação dos conceitos de análise exergética, fazer o estudo de artigos onde os autores aplicam esta técnica em processos industriais reais. Este é o caso de MACEDO *et al.* (2011), que realizou uma análise exergética de uma planta de evaporação de múltiplos efeitos do processo de extração de celulose pelo processo Kraft.

Estudo do trabalho de MACEDO et al., (2011).

Sistemas de evaporadores de múltiplo efeito (SEME) são amplamente utilizados em indústrias de celulose, em indústrias alimentícias e em indústrias de mineração. A vantagem de utilização de um sistema de evaporadores de múltiplo

efeito reside basicamente, na economia de energia verificada quando se utiliza o evaporado de um equipamento como fonte de energia de outro equipamento (PERRY *ET AL.*, 2008). Um SEME é um processo que exige uma significativa disponibilidade de energia. De acordo com KHANAM & MOHANTY (2010), uma análise sobre a energia de uma indústria de celulose e papel mostrou que um único evaporador consome cerca de 24 a 30% da energia total da indústria.

O objetivo do trabalho de MACEDO *et al.*, (2011) foi realizar uma análise exergética de uma planta de evaporação de licor preto de uma empresa de extração de celulose do Estado de São Paulo a fim de identificar as eficiências exergéticas de cada etapa do processo.

MACEDO *et al.*, (2010) realizou uma análise a partir da composição elementar do licor preto estudado, fazendo balanço de massa e energia, bem como o balanço de entropia para os fluxos decorrentes de cada evaporador envolvido.

Neste trabalho, o autor desconsidera as contribuições de exergia potencial e cinética assim como SANTOS (2005) sugere. O autor também faz uso da equação (6) para o cálculo de exergia química. Entretanto, ele utiliza uma equação reportada por SZARGUT *et al.*, (1988) representada por (17). Esta equação demonstra o cálculo de exergia química para líquidos de composição química complexa e relaciona o poder calorífico inferior do material que está representado por (18).

$$Ex^q = \beta \cdot LHV \quad (17)$$

$$LHV = (25,04\% + 0,1769\%S - 2,582\%Na + 48,92\%H + 4,231) - 2.443 \left(1 - 0.175 \frac{\%H}{\%C} \right) \quad (18)$$

Onde %C, %S, %Na, %H, %X são as concentrações percentuais no combustível de carbono, enxofre, hidrogênio e sólidos, respectivamente.

Segundo SMITH *et al.*, (2007), o cálculo para a variação de entalpia e entropia é mostrado nas equações (19) e (20).

$$\Delta h = \int_{T_0}^T c_p dT \quad (19)$$

$$\Delta s = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT \quad (20)$$

O calor específico do licor preto é fornecido relacionando-se a temperatura (T), expressa em °C com a concentração de sólidos (X), e m %, é representado pela equação (21).

$$c_p = 4,216(1 - X) + \left(1,675 + \frac{3.317}{1000} \right) X + \left(4,87 - \frac{207}{1000} \right) (1 - X)X^3 \quad (21)$$

MACEDO (2011) calculou a eficiência exergética de seus sistemas como sendo a relação entre a variação da exergia desejada e a exergia necessária ao processo, como pode ser visto na equação (22) proposta por KOTAS (1995).

$$\psi = \frac{\text{exergia desejada}}{\text{exergia necessária}} \quad (22)$$

Esta equação tem o mesmo sentido da relação apresentada no tópico “Eficiência exergética para sistemas abertos e reativos”. Relações também utilizadas por MORAN & SHAPIRO (2006) e CARREIRO (2009).

Os resultados de eficiência obtidos para este trabalho foram relativos a cada efeito de concentração do SEME. Foram calculadas as exergias dos fluxos de entrada e saída, bem como considerado a própria potência dos motores como exergia de entrada, após análise de cada equipamento obteve-se a eficiência global.

Pode-se concluir a partir dos resultados apresentados pelo autor que o 6º efeito apresentou a melhor eficiência exergética de 42,37%, em contraste com os 23,99% do 1º efeito do SEME. A eficiência exergética calculada para o sistema completo de evaporação de licor preto na planta estudada alcançou 74,88%.

Estudo do trabalho de CARREIRO (2009)

O objetivo do trabalho de CARREIRO (2009) foi realizar uma análise exergética do processamento do licor preto gerado em fábricas de celulose para identificar as eficiências exergéticas de cada etapa do processamento do licor preto. O processamento do licor preto estudado nesse trabalho é composto de duas caldeiras de recuperação química e dois sistemas de evaporadores de múltiplos efeitos com placas.

O licor preto é um subproduto do processo alcalino Kraft de obtenção de celulose. Em indústrias de celulose, o licor é usado como combustível, depois de concentrado em evaporadores de múltiplo efeito é queimado em caldeiras de recuperação, de onde o vapor gerado é convertido em energia elétrica para a fábrica (GHATAK *et al.*, 2008).

O licor preto contém em sua composição uma alta concentração de elementos químicos não processados e uma alta concentração de lignina. Esta solução se apresenta como uma mistura complexa, contendo compostos orgânicos, provenientes do cozimento da madeira, e inorgânicos provenientes do licor branco, rico em hidróxido de sódio.

O autor inicialmente apresenta uma vasta revisão bibliográfica acerca da produção de celulose e a sua interação com o mercado nacional e internacional. Apresenta também dados do processo e dados dos equipamentos estudados.

Para o cálculo da exergia termomecânica é utilizada a equação anteriormente apresentada (6), considerando as contribuições de exergia potencial e cinética iguais a zero. CARREIRO (2009) utiliza a equação (24) para calcular a exergia total dos gases.

$$Ex^g = Nmg \cdot b^0 Mg + (T_g - T_0) \cdot \sum_k Ngk \cdot C_p^b gk \quad (24)$$

Onde: Ex^g é a exergia dos gases, Nmg é o número de moles da mistura dos gases, $b^0 Mg$ é a exergia química da mistura, T_g é a temperatura dos gases, T_0 é a temperatura do estado de referência e $C_p^b gk$ leva em conta a variação da entalpia e entropia num dado intervalo de temperatura. O primeiro termo da equação corresponde à parcela de exergia química e o segundo termo a exergia física.

O cálculo da exergia química pode ser realizado de acordo com a equação (25).

$$b^0 M g = \sum_k (y_{gk} \cdot b^0 gk) + RT_0 \sum_k (y_{gk} \cdot \ln y_{gk}) \quad (25)$$

Valores de exergia química padrão podem ser encontrados em literatura aberta. São valores tabelados, calculados obedecendo normalmente às convenções de 25°C e 1 atm.

CARREIRO (2009) utilizou a mesma equação que MACEDO (2011) para o cálculo de eficiência exergética.

As eficiências obtidas para cada equipamento estão relacionadas na Tabela 1.

TABELA 1: Eficiências exergéticas obtidas para cada equipamento.

Equipamento	Caldeira de Recuperação CBCIII	Caldeira de Recuperação Gotaverken	Sistema de Evaporadores de Múltiplo efeito 900	Sistema de Evaporadores de Múltiplo efeito 700
Eficiência exergética (%)	21,3	19	42,4	43,6

O autor conclui que o resultado das eficiências das caldeiras de recuperação não foi satisfatório. Foi observado que grande parte do fluxo exergético das caldeiras, é destruído na reação de combustão do licor preto por conter um alto teor de umidade, e também pela característica construtiva da caldeira ter como principal função, recuperar os produtos químicos do processo transformando os sais de sódio do licor preto, em carbonato de sódio, sulfeto de sódio e sulfato de sódio.

Todavia, os resultados das evaporações se apresentaram satisfatórios, sendo que seu processo é baseado no reaproveitamento do vapor do evaporado para o trabalho nos efeitos subsequentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, pode-se perceber um significativo aumento no número de estudos relacionados à análise da eficiência exergética na literatura aberta. Isto já era esperado, pois o aumento na competitividade de mercado, força as indústrias a procurarem formas cada vez mais aprimoradas de otimizar o racionamento de recursos para que seu produto chegue a um preço mais baixo ao consumidor.

Desta forma, pode-se concluir que esta técnica se concretizou ao longo dos anos pela sua capacidade de apontar onde estão os maiores gastos e as maiores ineficiências dentro de um processo produtivo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARREIRO, M. R. M. **Análise exergética e ambiental do processamento do licor negro gerado em fábricas de celulose e papel.** 2009. P. 141. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG.

FRANÇA, G. A.C; SOARES, L. N. Análise exergética de válvulas redutoras de pressão visando cogeração. **Science & Engineering Journal**, Uberlândia, v. 15, 2005, p. 1 - 6.

GHATAK, H. R.; KUMAR, S.; KUNDU, P. P. Electrode processes in black liquor electrolysis and their significance for hydrogen production. **Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, 2008, p. 2904 – 2911.

KHANAM, S.; MOHANTY, B. Energy reduction schemes for multiple effect evaporator systems. **Applied Energy**, v. 87, 2010, p. 1102–1111.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plants analysis**. Krieger, Melbourne, 1995.

LUIZ, M. R. **Bomba de calor para desumidificação e aquecimento de ar**. 2007, P. 83. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

MACEDO, J. C. F.; REIS, H. M.; SILVA, R. J. Análise exérgica de uma planta de evaporação de múltiplos efeitos do processo de extração de celulose pelo processo Kraft. In: 44º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP 2011, São Paulo. V. 1, 2011, P. 1-10.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2006, p. 681.

PERRY, H. R., CHILTON, C. H., GREEN, D. W. Perry's **Chemical Engineering Handbook**. New York: McGrawHill, 2008.

ROCHA, G. **Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira com processo de extração por difusão**. 2010, P.150. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, São Paulo – SP.

SANTANA, E. I. S. **Análise termodinâmica de uma coluna de fracionamento de petróleo**. 2004, P. 120. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

SANTOS, J. C. A. **Análise energética e exérgica de plantas de co-geração**. 2005, P. 152. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

SANTOS, M. T. **Análise exérgica dos sistemas térmicos em um processo de produção de celulose e papel**. 2007, P. 190. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

SILVA, J. **Análise termoeconômica do processo de geração de vapor e potência do segmento de celulose e papel**. 2002, P. 222. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG.

SILVA, S. C.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. S. Proposta de análise exérgica de um sistema industrial real presente na rota kraft de obtenção de

celulose. In: II Seminário de Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo, 2012, Alegre – ES. V 2, 2012, P. 6.

SILVA, U. G. O. **Análise energética em refino de petróleo.** 2010, p. 118. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo – SP.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da Engenharia Química.** Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SOTOMONTE, C. A. R. **Análise exergética, termoeconômica e ambiental de uma usina termoelétrica supercrítica a carvão mineral.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG.

SZARGUT, J. **Exergy analyses of thermal, chemical and metallurgical process.** USA: Hemisphere Publishing Corporation. 1988.

TORÍO, H.; ANGELOTTI, A.; SCHMIDT, D. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. **Energy and Buildings.** V. 41, 2009, p. 248-271.

VALERO, A. **Termodinámica, Ecología y Teoría de Sistemas.** Universidade de Zaragoza Espanha, 1998.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/ turbina a gás.** 2006, P. 261. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

YUCER, C. T.; HEPBASLI, A. Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method. **Energy and Buildings.** V. 43, 2011, p. 536-542.