

IDENTIFICAÇÃO DE POTENCIAIS DE GANHO ENERGÉTICO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA ANÁLISE EXERGÉTICA¹

Lis Nunes Soares²
Ricardo Junqueira Silva³
Lucas Lanza Bernardes⁴
Pedro Freire Filgueiras⁴

Resumo

A V&M do Brasil é uma siderúrgica integrada com produção de tubos de aço sem costura. O processo de fabricação é energo-intensivo e inclui diversos processos e equipamentos térmicos, como fornos industriais, caldeiras, e outros. Devido a sua importância, é essencial que estes equipamentos operem com a melhor eficiência possível. Sendo assim, se torna essencial a utilização de ferramentas e métodos de análise para identificar e quantificar o uso da energia. Uma das metodologias que tem sido amplamente utilizada é a análise exergética. Ela se baseia na Segunda Lei da Termodinâmica, e por isso leva em consideração a geração de entropia, indicando a máxima quantidade de energia útil (trabalho) que se pode extrair de um fluxo, tendo como referencia parâmetros do ambiente. O presente trabalho objetiva a aplicação da metodologia exergética em processos térmicos industriais que ocorrem na V&M do Brasil, como uma ferramenta de identificação de perdas e potenciais de melhoria de desempenho dos sistemas energéticos, visando economia de combustíveis bem como a redução de impactos ambientais e emissões de gases estufa.

Palavras-chave: Exergia; Eficiência; Ganhos; Sistemas térmicos.

IDENTIFICATION OF ENERGY GAIN POTENTIAL IN INDUSTRIAL PROCESSES, THROUGH EXERGETIC ANALISYS

Abstract

V&M Brasil is an integrated steel mill for the production of steel tubes. The manufacturing process includes various processes and thermal equipment, such as industrial furnaces, boilers, and others. Due to its importance, it is essential that these devices operate with the best possible efficiency. Thus, it becomes necessary to use tools and methods for performance analysis of energy processes that occurs on these devices. One tool that has been widely used in industrial environment is the exergy analysis. It is based on the Second Law of Thermodynamics, and therefore takes into account the entropy generation, indicating the maximum amount of useful energy (work) that can be drawn from a stream, with reference to environmental parameters. This paper aims to apply the exergetic methodology in industrial thermal processes that occurs at V&M Brasil, as a tool for identification of losses and potential performance improvement of energy systems to save on fuel and the reduction of environmental impacts and emissions of greenhouse gases.

Keywords: Energy; Exergy, Improvement; Thermal systems.

¹ Contribuição técnica ao 32º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 26º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 16 a 19 de agosto de 2011, Salvador, BA.

² Mestre, Gerência de Utilidades e Eficiência Energética, V & M do Brasil S.A.

³ Doutor, Superintendência de Utilidades e Co-produtos, V & M do Brasil S.A.

⁴ Estudante de graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, V & M do Brasil S.A.

1 INTRODUÇÃO

A produção de tubos de aço sem costura demanda o consumo em larga escala de diversos insumos como água, energia elétrica, vapor, ar comprimido, gás natural, gás de alto forno e gases inertes. A fim de se produzir, manusear e conduzir esses fluidos aos consumidores finais existe na Usina Barreiro sistemas de geração e distribuição constituídos por equipamentos termo técnicos, tubulações e válvulas que visam garantir o correto procedimento de operação.

Devido à enorme importância desses sistemas para o processo produtivo é imprescindível que haja uma operação com o melhor desempenho possível, que garanta qualidade ao produto final a um consumo mínimo de energia, visando sempre redução nas emissões de gases poluentes.

Dessa forma, se torna necessário o estabelecimento de ferramentas e métodos de análise de desempenho dos processos térmicos que ocorrem nesses equipamentos. A análise energética baseada apenas na Primeira Lei da Termodinâmica é insuficiente para a caracterização de um processo térmico, já que ela trata apenas da quantificação energética dos fluxos e das perdas brutas do sistema, e não lida com a geração de entropia e perda na qualidade da energia envolvida. Já a análise exérgica se baseia na Segunda Lei da Termodinâmica, e por isso leva em consideração a geração de entropia, indicando a máxima quantidade de energia útil (trabalho) que se pode extrair de um fluxo, tendo como referência parâmetros do ambiente. Sendo assim a análise exérgica pode ser considerada quantitativa e principalmente qualitativa, podendo ser classificada como a confluência entre energia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável.

Esse trabalho objetiva mostrar a aplicação da metodologia de análise exérgica em processos térmicos industriais, exemplificados por dois processos que ocorrem na V&M do Brasil, como uma ferramenta de identificação de perdas de energia e potenciais de melhoria de desempenho dos sistemas energéticos, visando economia de combustíveis bem como a redução de impactos ambientais e emissões de gases estufa.

Os processos abordados no presente trabalho são geração de ar comprimido e redução de pressão de vapor.

2 DEFINIÇÕES

De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, todo processo real, devido à sua natureza irreversível, provoca um aumento de entropia no sistema global, indicando que uma mudança ocorreu de uma forma de energia mais organizada para uma menos organizada e, portanto, uma diminuição no potencial do sistema para realizar trabalho. As irreversibilidades dos processos reais são associadas principalmente ao fenômeno de dissipação de trabalho em energia interna do sistema e gradientes finitos de pressão, temperatura e potencial químico.

Segundo Dincer e Rosen,⁽¹⁾ com base na Segunda Lei da Termodinâmica, a exergia é definida como o trabalho máximo que pode ser extraído de uma determinada forma de energia, considerando os parâmetros ambientais como um estado de referência. É também uma medida da qualidade da energia.

A exergia de uma substância é composta por exergia física, que é medido pela sua diferença de temperatura e pressão no ambiente de referência, e pela exergia química, que é medido pela diferença de concentração de seus componentes químicos em relação à sua forma encontrada no ambiente de referência.

A Tabela 1 detalha as equações utilizadas para a elaboração do balanço de exergia considerando os pressupostos:

- o volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- o estado da substância em cada ponto do volume de controle não varia com o tempo;
- os fluxos de massa em cada área distinta da superfície de controle não variam com o tempo. Tanto a taxa de calor e do trabalho que passa pela superfície de controle permanecem constantes; e
- as variações da energia cinética e potencial foram negligenciadas.

Tabela 1. Equações

Descrição	Equação
Balanço de Massa	$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} , \quad (1)$
Balanço de Energia	$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} , \quad (2)$
Balanço de Exergia	$\dot{E}_{in} + \dot{E}^Q = \dot{E}_{out} + \dot{W}_x + \dot{I} , \quad (3)$
Fluxo de exergia relacionada à transferência de massa	$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_o , \quad (4)$
Exergia física específica de sólidos e líquidos	$\varepsilon_{ph} = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) , \quad (5)$
Exergia física específica dos gases ideais	$\varepsilon_{ph} = c(T - T_0) - T_0 \left(c \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) , \quad (6)$
Exergia física específica de misturas de gases ideais	$(\varepsilon_{ph})_M = (T - T_0) \sum_{i=1}^n x_i \tilde{c}_i^\varepsilon + \tilde{R} T_0 \ln \frac{P}{P_0} , \quad (7)$
Eficiência energética ou exergetica	$\varepsilon_f = \frac{\sum \dot{E}_{usefulout}}{\sum \dot{E}_{in}} , \quad (8)$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cada sistema foram definidos volumes de controle sobre pontos estratégicos de cada processo, a fim de se realizar o balanço energético e exergetico dos mesmos. Os dados de processo (pressão, temperatura e massa) foram adquiridos com instrumentos de medição instalados em pontos relevantes dos processos. A composição dos fluxos foi obtida por meio de análise pontual.

A Tabela 1 detalha as equações usadas para o desenvolvimento dos balanços de exergia. O software *Engineering Equation Solver* (EES) foi usado para o desenvolvimento dos balanços. A biblioteca interna do EES e os dados disponíveis em Szargut, Morris e Steward,⁽²⁾ Kotas⁽³⁾ e Moran e Shapiro⁽⁴⁾ foram usados para a determinação das propriedades termodinâmicas dos fluxos.

É importante ressaltar que as irreversibilidades encontradas foram divididas em irreversibilidades de fluxo e irreversibilidades intrínsecas ao processo. A primeira esta relacionada com as exergias química e física de fluxos que deixam o sistema e não são utilizados, e a segunda são perdas inerentes ao sistema, presentes principalmente nas reações químicas, em especial o processo de combustão, compressão de fluidos e troca de calor.

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DE CADA SISTEMA

4.1 Ar Comprimido

O ar comprimido é produzido com compressores pela captação do ar atmosférico e elevação de sua pressão. Os atuais sistemas de geração desse bem são compostos de vários subsistemas e subcomponentes. Os principais subsistemas incluem compressores, motores e acionamentos, controles, equipamentos de tratamento de ar, reservatórios e acessórios. O compressor capta o ar ambiente e eleva sua pressão, e conseqüentemente sua temperatura. Um sistema de resfriamento é necessário para diminuir a temperatura do ar para consumo final. É necessário também um secador para diminuir a umidade do ar e um filtro para retirar partículas de poeira e outras impurezas. Os motores elétricos consomem eletricidade e fornecem energia para o compressor. Os controles regulam a quantidade de ar comprimido gerada.

A Figura 1 apresenta uma unidade básica de produção de ar comprimido:

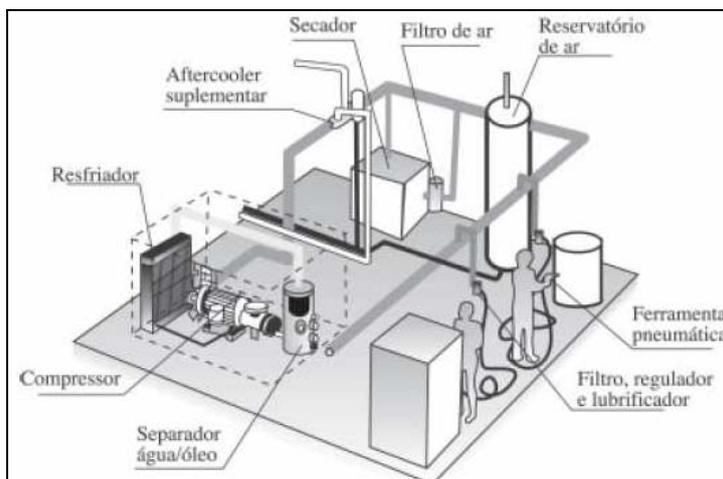


Figura 1. Sistema de geração de ar comprimido.

Pode-se dizer que o balanço de energia não é uma ferramenta adequada para a análise da unidade geradora de ar comprimido. No processo de produção dessa utilidade, se consome grande quantidade de energia elétrica para acionar o motor do compressor e outros sistemas auxiliares, para na verdade gerar um ar comprimido final com uma energia ligeiramente maior (entalpia) que a do ar atmosférico, devido ao ligeiro acréscimo de temperatura. Se considerarmos que essa energia é indesejável no ar comprimido, além de ser dissipada ao longo do sistema de distribuição, a utilidade final contém praticamente o mesmo conteúdo energético do ar atmosférico, e teríamos uma eficiência que se aproxima do zero. É comum utilizar para esses tipos de sistema parâmetros específicos, como por exemplo, custo específico (relaciona a quantidade de energia elétrica e seu respectivo preço com a quantidade de ar comprimido gerado).

A exergia é a ferramenta de análise mais adequada nesse caso, pois ela consegue mostrar o ganho na qualidade do ar que se tem com o aumento de pressão. A desordem do fluxo (entropia) diminui, e por isso sua capacidade de realizar trabalho aumenta.

A Figura 2 mostra a definição do volume de controle e dos fluxos de entrada e saída do sistema presente na usina, bem como os valores reais de vazão média em determinado período, temperatura e pressão.



Figura 2. Volume de controle.

Utilizando em conjunto as equações 4, 5, 6 e 7 foi possível quantificar a exergia dos fluxos envolvidos. A partir dos valores obtidos, aplicou-se a equação 3 para o balanço de exergia, e 8 para o cálculo de eficiência exergética do processo.

O procedimento acima foi repetido, agora considerando a substituição dos atuais compressores presentes no sistema por compressores de parafusos rotativos isentos de óleo. Esses compressores são mais modernos e consomem menos energia, e para uma mesma produção de ar comprimido nas mesmas condições descritas acima, espera-se alcançar uma redução de cerca de 265 kW no consumo de energia elétrica.

Os resultados encontrados para os dois sistemas são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Dados dos fluxos do sistema

FLUXOS	T [C]	P [bar]	Exergia [kW]	Energia [kW]
Energia Elétrica	X	X	1151.00	1151.00
Energia Elétrica – compressor isento de óleo	X	X	886.00	886.00
Ar atmosférico	37.00	1.00	0.35	453.00
Ar comprimido	47.00	5.28	207.40	466.20
Condensado	47.00	5.28	0.07	1.70

Tabela 3. Resultados

	Compressores atuais	Compressores isentos de óleo
Eficiência exergética	$\epsilon_f = 18 \%$	$\epsilon_f = 23 \%$
Perdas energéticas	944 kW	679 kW

Como se pode verificar nos resultados acima, o sistema atual de produção de ar comprimido dissipa em forma de calor cerca de 82% (944 kW) da energia útil disponível em forma de calor para o ambiente. Isso mostra o quão ineficiente é um processo de geração de ar comprimido, já que este consome grandes quantidades da energia de melhor qualidade (elétrica), ou seja, maior capacidade de realizar trabalho para produzir uma de baixa qualidade (ar comprimido), ou seja, menor capacidade de realizar trabalho. Isso indica que do ponto de vista de eficiência energética, deve-se dar preferência à acionamentos elétricos em detrimentos de pneumáticos, para assim reduzir as perdas de energia durante o processo de geração de ar comprimido.

A análise exergética é muito útil na comparação de desempenho entre sistemas térmicos. Os compressores isentos de óleo podem apresentar um custo de investimento elevado, mas como foi mostrado, sua utilização reduz cerca de 28% nas irreversibilidades, proporcionando uma economia de 265 kW (em base monetária, considerando custo de energia elétrica 0,17 R\$/kWh, isso corresponde uma economia de 45,00 R\$/h). Ou seja, é mais econômico e mais correto em termos ambientais.

4.2 Válvulas Redutoras de Pressão

As válvulas redutoras de pressão são amplamente utilizadas nos circuitos fluidodinâmicos industriais. Seu objetivo, como o próprio nome diz, é de reduzir a pressão do fluido, a fim de adequá-lo para os processos subsequentes.

Em sua forma mais simples, como pode ser vista no desenho esquemático da Figura 3, ela é constituída basicamente de quatro componentes: uma mola, uma estrição, um diafragma e um conjunto regulador de fluxo. A mola, de constante elástica e tensão inicial conhecida, pressiona o conjunto regulador de pressão para afastar-se da estrição, forçando sua abertura. O diafragma, ligado diretamente à saída da válvula, atua contra a mola, tentando reter o fluxo do fluido.

Caso a pressão na saída válvula abaixe, a força exercida pelo diafragma será inferior à força exercida pela mola, forçando o conjunto regulador a liberar o fluxo e, conseqüentemente, aumentando a pressão na saída. Caso contrário, a força exercida pelo diafragma será superior à força exercida pela mola, restringindo o fluxo e diminuindo a pressão na saída.

A pressão de saída é, então, regulada pela tensão inicial da mola.

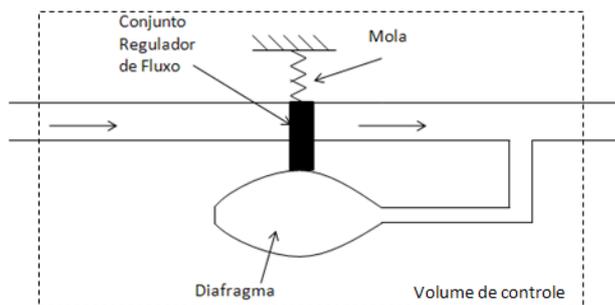


Figura 3: Desenho esquemático de uma válvula redutora de pressão.

Como a passagem de fluxo pela estrição é muito rápida, considera-se que não há tempo para troca de calor com o ambiente. Considerando, também, que não há trabalho sendo realizado sobre o fluido, a equação 2 do balanço de energia para o volume de controle considerado pode ser reduzido à equação 9.

$$\dot{m}_{in} h_{in} = \dot{m}_{out} h_{out} \quad (9)$$

Considerando regime estacionário, define-se a equação 10.

$$h_{in} = h_{out} \quad (10)$$

Chega-se, então, à relação final de equivalência da entalpia do fluido na entrada e na saída. Assim, utilizando a equação 8, conclui-se que o rendimento teórico da válvula é de 100%.

No entanto, há, claramente, uma degradação da qualidade da energia implicando em perdas energéticas, uma vez que a redução de pressão proporciona um maior desordenamento nas moléculas de fluido.⁽⁵⁾ O balanço tradicional de energia não possibilita enxergar essa possibilidade de ganhos, exigindo que, com esse objetivo, seja apresentado um balanço exergético da válvula.

Para cálculo do balanço exergético, é necessário utilizar-se das equações 3 e 5.

Para exemplificar o problema, será considerado um fluxo de vapor d'água superaquecido, sob as condições especificadas na Tabela 4.

Tabela 4: Condições de operação da válvula

Vazão mássica	6 ton/h
Temperatura de entrada	250°C
Pressão absoluta de entrada	16,1 bar
Pressão absoluta de saída	2,3 bar

Como afirmado anteriormente, o rendimento energético da válvula é de 100%, porém, fazendo o balanço exergético, encontra-se uma grande taxa de geração de irreversibilidades e um rendimento exergético inferior ao energético, como visto na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados do balanço exergético.

Taxa de geração de irreversibilidades	434 kW
Rendimento exergético	72 %

Como a geração de irreversibilidades quantifica os ganhos possíveis em cima do sistema, foi proposta a implantação de um turbo-gerador no local da válvula redutora

de pressão, como indicado pelo U.S. Department of Energy.⁽⁶⁾ O turbo-gerador, de uma turbina de ação e contrapressão, funcionando sob as mesmas condições exigidas pelo circuito, apresentadas na Tabela 4, terá um rendimento de 45%, gerando energia elétrica a uma potência de 260 kW, de acordo com simulações feitas pelo próprio fabricante.

Para realizar o novo balanço exergético, é necessário lembrar que a energia elétrica possui valor unitário da relação energia/exergia. Assim, a exergia na saída da turbina pode ser calculada pela soma da exergia do fluido somada à exergia relacionada à energia elétrica. O volume de controle, considerando entrada e saída de exergia pelo fluido, geração de irreversibilidades e a geração de energia elétrica, pode ser visto na Figura 4.

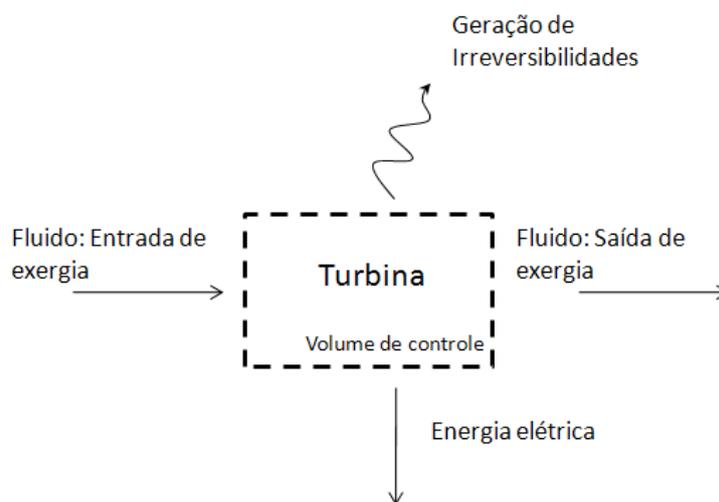


Figura 4: Volume de controle considerado para a turbina.

Com os dados apresentados até aqui, é possível calcular o novo rendimento exergético e a taxa de geração de irreversibilidades, utilizando-se das equações 3 e 5. Esses dados estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados do balanço exergético com a implantação da turbina

<i>Taxa de geração de irreversibilidades</i>	330 kW
<i>Rendimento exergético</i>	79 %
<i>Potência elétrica gerada</i>	260 kW

Considerando o custo de energia elétrica de 0,17 R\$/kWh, a energia elétrica gerada com a instalação da turbina, representaria uma economia de aproximadamente 44,00 R\$/h.

A análise exergética possibilitou a identificação de uma possibilidade de ganho que era impossível quando utilizando apenas o balanço energético, que indicava uma válvula redutora de pressão como sendo um equipamento sem perdas de energia.⁽⁷⁾ O exemplo da instalação da turbina em seu lugar representa uma possibilidade de possíveis ganhos que o método do balanço exergético proporciona identificar e quantificar no ambiente industrial.

5 CONCLUSÃO

A metodologia exérgica é uma importante ferramenta na análise de sistemas termodinâmicos. Sua utilidade não se restringe á análises teórica, mas também em aplicações industriais, como foi demonstrado no presente trabalho. Ela permite uma avaliação mais profunda acerca das verdadeiras ineficiências do processo, não se limitando à quantificação de perdas energéticas brutas, mas também na perda da qualidade de energia. Dessa forma ela refuta o paradigma de que o consumo energético específico é o único fator, ou fator mais relevante, a ser considerado na caracterização de um processo térmico.

REFERÊNCIAS

- 1 Dincer, Ibrahim and Marc A. Rosen. Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development. Google Book Search. Massachusetts: Elsevier 2007
- 2 Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., 1988, Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process, 1st Ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- 3 KOTAS T. J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger, Melbourne, FL, 1995.
- 4 Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2000, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 5 Gong, M. and Wall, G. On Exergy and Sustainable Development – Part 1: Conditions and concepts. Exergy, an International Journal, 2001, 1(4), 217-233.
- 6 U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Tips – Steam – Replace Pressure-Reducing Valves with Backpressure Turbogenerators, 2p, 2006.
- 7 Gong, M. and Wall, G. On Exergy and Sustainable Development – Part 2: Indicators and methods. Exergy, an International Journal, 2001, 1(4), 217-233.