

**INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES DE AMÔNIA**
*ENERGY EFFICIENCY INDICATORS IN AMMONIA FERTILIZERS INDUSTRY*Flávio Viana Tavares^a; Luciane Monteiro^a^a Universidade Federal Fluminense (UFF) - Niterói, RJ, Brasil - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química

Resumo

O objetivo deste trabalho é descrever monitoramento do consumo de recursos naturais utilizados em processos industriais através de indicadores chave de desempenho (KPI). O acompanhamento do consumo destes insumos na indústria pode levar a reduções nas emissões de gases do efeito estufa (GEE) atrelado a ganhos de eficiência energética nas operações industriais. O monitorando contínuo associado a indicadores de desempenho poderá auxiliar em uma intervenção direta e eficaz e ser um gerador de ações corretivas no processo produtivo. Ações de monitoramento contínuo focado em gestão por indicadores permite a compilação de dados de emissões. Os números resultantes de emissões, consumo de recursos naturais associados a indicadores de desempenho atrelados a relatórios de produção poderá sinalizar mudanças nos processos produtivos ou em condutas operacionais. Estas informações, quando disponibilizadas para as equipes de operação em conjunto com ações de gerenciamento, poderão facilitar a conscientização das operações ou até mesmo ações corretivas nos processos industriais sempre que necessário.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Amônia. Indicadores de Desempenho.

Abstract

The purpose of this work is monitoring the consumption of natural resources used in industrial processes in particular using key performance indicators (KPI). Monitoring the consumption of these inputs in the industry can generate emissions reductions of greenhouse gases (GHG) linked to energy efficiency gains in industrial operations. The continuous monitoring associated with KPIs can assist in an effective and direct intervention, and be a generator of corrective actions in the production process. An emission data could be provide with a continuous monitoring by KPIs and allows actions by management. The resulting figures of emissions, consumption of natural resources associated with performance indicators linked to production reports may provide changes in production processes or operating actions. Such information when made available to teams operating in conjunction with management actions may facilitate operations awareness or corrective actions in industrial processes where necessary.

Keywords: Energy Efficiency. Ammonia Key Performance Indicators.**1. Introdução**

O consumo de energia nos processos industriais pode ser determinado pelo nível de atividade, estrutura do setor e a eficiência energética. As mudanças no consumo de energia das indústrias não estão exclusivamente relacionadas à eficiência energética nos processos industriais, mas também a fatores políticos, econômicos e ambientais (Phylipsen *et al.*, 1997). Outros fatores devem ser considerados nesta análise

como, por exemplo, a capacidade de produção e o tempo de vida da unidade industrial.

A utilização de indicadores voltados para avaliação da eficiência energética de processos na indústria vem crescendo de importância no mundo e no país. Os resultados de uma análise de indicadores de eficiência energética poderão estar ligados a ações de planejamento estratégico, de gestão e tecnologia ambiental e de conservação de energia. Na prática, cabe destacar que a aplicação da análise destes indicadores e sua relevância em descrever a interrelação existente da eficiência energética e os



recursos consumidos associam-se principalmente a fatores econômicos e político-ambientais dentro da indústria.

O uso de indicadores pode gerar impactos nos processos. Na indústria, a análise dos indicadores de eficiência energética pode auxiliar na definição de diretrizes relevantes, como:

- direcionar mudanças no consumo energético;
- estabelecer políticas de eficiência energética;
- indicar limitações estruturais que impactam a melhora na eficiência energética;
- substituição de processos tecnológicos;
- alteração do uso e da escolha das matérias-primas que são utilizadas na produção ou nos processos de produção que reduzem a demanda de energia do processo;
- servir de ferramenta na avaliação de metas para políticas ambientais voltadas para reduções de emissões gasosas

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os indicadores comumente utilizados para análise de eficiência energética na indústria podem ser subdivididos em quatro grupos (Guerra *et al.*, 2010):

- Termodinâmico;
- Físico-termodinâmico;
- Econômico-termodinâmico;
- Econômico.

2.1 Indicadores termodinâmicos

A primeira lei da Termodinâmica, também conhecida como princípio de conservação de energia, é um princípio geral que não diz respeito ao funcionamento interno do próprio sistema. Sejam quais forem os detalhes do comportamento molecular do sistema, o calor adicionado poderá aumentar a energia interna do sistema ou possibilitará que o sistema realize trabalho externo, ou ambos. Para o caso de sistemas isolados, a energia total inicial é igual à energia total do sistema no final do processo, qualquer que seja o caminho seguido pelo sistema para passar do estado inicial ao final. A energia total do sistema é função de estado e não do caminho seguido pelo mesmo para chegar a esse estado.

Processos termodinâmicos podem ser reversíveis ou irreversíveis. Na realidade, a maioria dos processos

industriais tem como desafio superar irreversibilidades. Qualquer transformação energética não deve ser associada à “perda” ou a “gasto” de energia, mas sim a uma degradação energética que impede de realizar, de novo, a mesma transformação, conforme decorre da aplicação da 2ª Lei da Termodinâmica.

O Teorema de Carnot estabelece um valor de rendimento máximo da conversão de calor em trabalho. É função da temperatura da fonte quente, T_q , e da temperatura de fonte fria, T_f , dado pela seguinte equação:

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_q - T_f}{T_q} \quad (\text{eq. 1})$$

A equação de Carnot estabelece um limite superior de eficiência para todas as máquinas térmicas. Efetivamente, as várias formas de energia não são totalmente convertidas umas nas outras. As formas de energia podem ser convertidas integralmente em calor, mas não se pode converter integralmente calor em outras formas de energia.

A utilização da primeira lei termodinâmica não propicia uma ideia realista de melhorias que podem ser realizadas em um dado sistema para que se obtenha um melhor desempenho.

A segunda lei da termodinâmica parte do princípio de que as diferentes formas de energia têm qualidades que lhes são características. Essas formas de energia não podem ser indiferentemente convertidas umas nas outras e determina a direção em que essas transformações podem ocorrer em relação ao Universo (Abreu *et al.*, 2010).

Neste contexto, esta segunda lei tem como base a definição do limite para os processos, representando a definição de eficiência termodinâmica e, assim, permitindo que se tenha uma ideia das melhorias que podem ser realizadas, porém sua aplicação é restrita (Patterson, 1996). Correntes defendem o uso de indicadores termodinâmicos, tendo como base de cálculo a exergia. A exergia é definida como o máximo trabalho teórico útil obtido quando um sistema é trazido ao equilíbrio termodinâmico com o ambiente por meio de processos nos quais este sistema interage somente com seu ambiente (Toxopeus *et al.*, 2006).

Na engenharia mecânica, uma equação disseminada para cálculo da exergia pode ser representada pela equação 2:

$$ex = (h - h_o) - T_o * (s - s_o) \quad (\text{eq. 2})$$



Conforme mostrado na equação 2, exergia (ex) é dependente da entalpia (h) e entropia (s), e estas são função da temperatura (T), pressão, estado físico e composição. O índice subscrito representa as condições de entalpia e entropia nas vizinhanças do sistema.

O conceito de exergia pode ser útil para analisar aspectos relacionados aos ciclos de vida dos produtos, uma vez que o conteúdo exergético pode determinar o fluxo de energia perdido.

Partindo-se de um balanço exergético para um sistema hipotético, torna-se viável a construção direta de um indicador. A exergia (ex) é a diferença entre o somatório dos fluxos exergéticos que entram no sistema (Σex_e) através de fontes de combustível e matérias-primas, suas perdas (Σex_s) e o que é consumido no processo (Σex_c).

$$ex = \Sigma ex_e - \Sigma ex_s - \Sigma ex_c \quad (\text{eq. 3})$$

Esta análise pode ser útil para suportar decisões durante a fase de projeto de equipamentos e processos, do ponto de vista energético.

2.2 Indicadores físico-termodinâmicos

Esta categoria de indicadores utiliza medidas físicas e termodinâmicas para mensurar o consumo requerido em função do seu uso final. Devido à possibilidade de contabilizar o produto final em quantidades físicas, estes indicadores podem ser comparados e analisados em séries temporais. O uso de indicadores físico-termodinâmicos para avaliação de desempenhos específicos para o consumo de energia pode ser útil para identificar áreas de baixo desempenho.

Na indústria, para reduzir falhas na medição entre o consumo de energia e a medida física (produção), este indicador deve ser gerido para medir a eficiência energética geral do processo (Patterson, 1996).

2.3 Indicadores econômico-termodinâmicos

Estes indicadores relacionam medidas usuais na indústria (medidas termodinâmicas) e a valoração deste insumo e/ou produto final, pois a energia a ser mensurada no sistema pode ser feita em unidades termodinâmicas convencionais e sua saída em valores monetários.

Na prática, no sentido de se atingir uma economia efetiva de energia na instalação, três fatores adicionais devem ser considerados (Lozano *et al.*, 1993): (i) nem toda irreversibilidade pode ser evitada; (ii) as reduções locais na destruição de exergia não são equivalentes; (iii)

as oportunidades de economia só podem ser especificadas através de um estudo mais detalhado dos mecanismos fundamentais da geração de entropia.

A Teoria do Custo Exergético contabiliza as eficiências e perdas exergéticas em cada um dos volumes de controle do sistema (equipamento, conjunto de equipamentos, ou junções e bifurcações), tendo como resultado o custo exergético de produção de cada um dos fluxos (portadores de energia). Outro aspecto deste método é que a medida do custo de um fluxo do sistema está representada pela exergia contida nele. Em uma análise do custo exergético, um custo é associado com cada fluxo de exergia.

Considerando os fluxos de matéria entrando e saindo com taxas associadas de transferência de exergia (B_s e B_e), potência (W), taxa de transferência de exergia associada com a transferência de calor (B_Q), um componente que recebe uma transferência de calor e gera potência, como também as expressões de taxa de custo, tem-se:

$$[\sum (c_s B_s)k]_s + c_{w,k} W = c_{Q,k} B_{Q,k} + [\sum (c_e B_e)_k]_e + Z_k \quad (\text{eq. 4})$$

As taxas de exergia (B_s e B_e e B_Q) saindo e entrando no k -ésimo componente, bem como a potência (W), são calculadas em uma análise exergética. O termo Z_k é obtido, primeiramente, calculando o investimento de capital associado com o k -ésimo componente e , então, computando os valores particionados destes custos por unidade de tempo de operação do sistema.

2.4 Indicadores econômicos

Esses indicadores têm como característica principal a mensuração da energia de entrada e saída em valor monetário.

Por exemplo, o indicador econômico para uma indústria ou setor é determinado pelos preços dos produtos finais multiplicado pela quantidade total dos mesmos. Isso torna os valores finais encontrados através destes indicadores econômicos / energéticos vagos; se utilizados sozinhos sem outra análise complementar; podem não refletir a eficiência energética.

Segundo estudo realizado por World Energy Council (2004), para definir e caracterizar a eficiência energética, pode-se utilizar macroindicadores que reportam a economia como um todo (macroeconomia) ou os principais setores (industrial, agrícola, etc.) ou somente os principais usos finais.

Existem também os microindicadores que podem ser definidos como microeconômico. Estes englobam, nessa área de eficiência energética, os seguintes itens:



- Comportamento do consumidor em relação ao preço da energia e a utilização de aparelhos mais eficientes.
- Determinação dos custos marginais da energia, dos de capacidade e dos de expansão para uma estrutura desagregada (custo incremental unitário).
- As implicações das variáveis do modelo de equilíbrio geral, que determinam os preços sombras, para o consumidor final, como: preços eficientes, preços sociais e outras.
- Curvas de oferta e demanda para a energia.
- Previsão de demanda de energia.

3. METODOLOGIA

3.1 O processo de produção de amônia

Amônia é basicamente produzida a partir de hidrocarbonetos, do ar e energia. As fontes de energia

comumente utilizadas são carvão ou hidrocarbonetos que reagem com vapor d'água à alta temperatura. O gás natural é geralmente o hidrocarboneto mais utilizado: cerca de 80% da capacidade de produção de amônia no mundo está atualmente baseada em gás natural. Uma moderna fábrica de amônia tem uma capacidade típica de 1000-2000 t / dia (IFA, 2000).

Cerca de 90% da produção de amônia no mundo baseia-se nos conceitos de Reforma a Vapor. Nesta rota, serão tratadas as principais etapas do processo produtivo, passando desde o tratamento do gás natural, reforma a vapor do gás natural, geração de gás de síntese, remoção de contaminantes até a síntese de amônia propriamente dita.

A seguir, na figura 1, é apresentando um fluxograma ilustrativo do processo de produção de amônia.

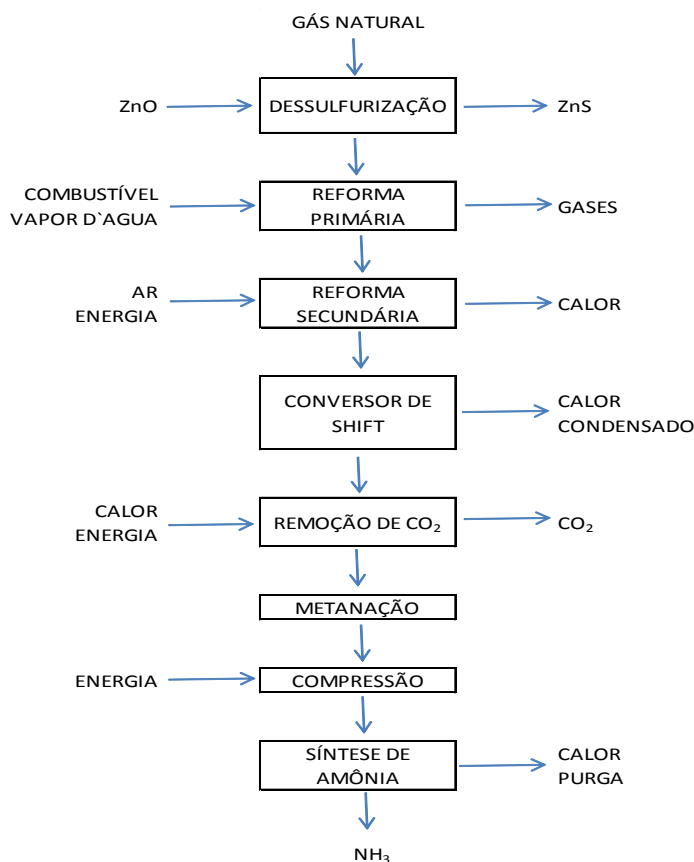


Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de produção de amônia.

Fonte: TAVARES, 2013



3.2 O indicador de eficiência energética

No cálculo da eficiência energética, foi considerado o cálculo dos termos referentes à produção anual de Amônia e a energia utilizada. Todas as alimentações e os combustíveis consumidos para uma planta de produção de Amônia foram considerados neste estudo.

A avaliação da eficiência energética em plantas de produção de Amônia considerou o desempenho anual em detrimento à eficiência dos projetos.

Para viabilizar a análise entre as diferentes plantas, foi necessário elaborar uma base comparativa. Esta normatização foi realizada em função das diferentes configurações das plantas analisadas, tais como:

- Eletricidade importada corresponde a 40% da eficiência de geração tomando como base o poder calorífico inferior;
- Importação e exportação de vapor corresponde a

$$\text{EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (GJ/t NH}_3\text{)} = \frac{\text{MP} + \text{C} + \text{OUTROS}}{\text{PROD NH}_3} \quad (\text{eq. 5})$$

As medidas foram feitas em uma mesma base. Os hidrocarbonetos utilizados como combustíveis (C) e, para alimentação (MP) do processo, foram convertidos em energia equivalente considerando poder calorífico inferior. Os hidrocarbonetos utilizados como alimentação são todos os hidrocarbonetos utilizados como matéria-prima para a produção de Amônia no período de um ano, assim como os combustíveis utilizados para a produção de Amônia. A denominação "OUTROS" foi utilizada para classificar outras formas de energia importada ou exportada para/ou da planta de Amônia.

4. RESULTADOS

Neste estudo, foram consideradas 50 plantas de Amônia ao redor do mundo distribuídas em 48 plantas com a seção de reforma a vapor (convencionais) e 2 plantas sem esta seção. Para a elaboração dos gráficos a seguir, foram consideradas contribuições citadas em estudos de *benchmarking* para plantas de Amônia. A média encontrada para eficiência energética, com base no poder calorífico inferior, das 50 plantas de Amônia foi de 36,6 GJ/t NH₃. Para as 48 plantas convencionais, a média foi 37,0 GJ/t NH₃. O menor valor do índice de eficiência encontrado foi de 23,8 GJ/t NH₃. Neste caso, a matéria-prima utilizada na produção de Amônia foi gás Hidrogênio (H₂), assim, menos energia é despendida durante o processo de produção de amônia.

Por outro lado, é relevante considerar nesta análise o tempo de operação das plantas em função da vida útil dos equipamentos. No gráfico 2, é apresentada uma relação entre eficiência energética e idade das plantas, ou melhor,

90% da eficiência de geração considerando o poder calorífico inferior;

- A produção de Amônia é considerada 100% líquida na condição na pressão atmosférica (1 atm);
- A energia para produzir e circular água de resfriamento foi considerada na parcela de cálculo do uso de energia;
- A parcela de energia relacionada à produção e bombeamento de água de alimentação para as caldeiras foi considerada no cálculo.

Não foram realizados ajustes em função das diferentes tecnologias, clima, condições de catalisador ou problemas operacionais.

A equação 5 abaixo descreve o índice de eficiência energética para as plantas de amônia, sendo este calculado da seguinte forma:

tempo de operação. A idade de cada planta varia entre 1,5 e 39 anos. As plantas foram divididas em três categorias. As classificadas como novas possuem idade inferior a 14 anos. As chamadas médias possuem idade entre 18 e 29 anos e as antigas acima de 30 anos.

Das 48 plantas de amônia convencionais analisadas, as plantas classificadas como novas apresentaram melhor média para o indicador de eficiência energética líquida, 36,0 GJ/t NH₃ para 16 plantas analisadas neste grupo. As plantas classificadas com tempo de operação intermediário (14 plantas) apresentaram índice médio de 37,7 GJ/t NH₃. E as plantas com maior tempo de operação apresentaram um resultado médio de 37,4 GJ/t NH₃.

A relação entre capacidade e eficiência energética para as 48 plantas de amônia convencionais é mostrada no gráfico 3.

As melhores plantas em cada grupo apresentam índices de eficiência energética que variam entre 29,5 GJ/t NH₃ e 30,6 GJ/t NH₃, indicando que plantas com capacidade inferior a 1.000 t/dia podem ser eficientes.

5. CONCLUSÕES

- Existe uma relação direta entre capacidade de produção e eficiência energética;
- Plantas com baixo índice de eficiência energética tendem a emitir maiores quantidades de poluentes;

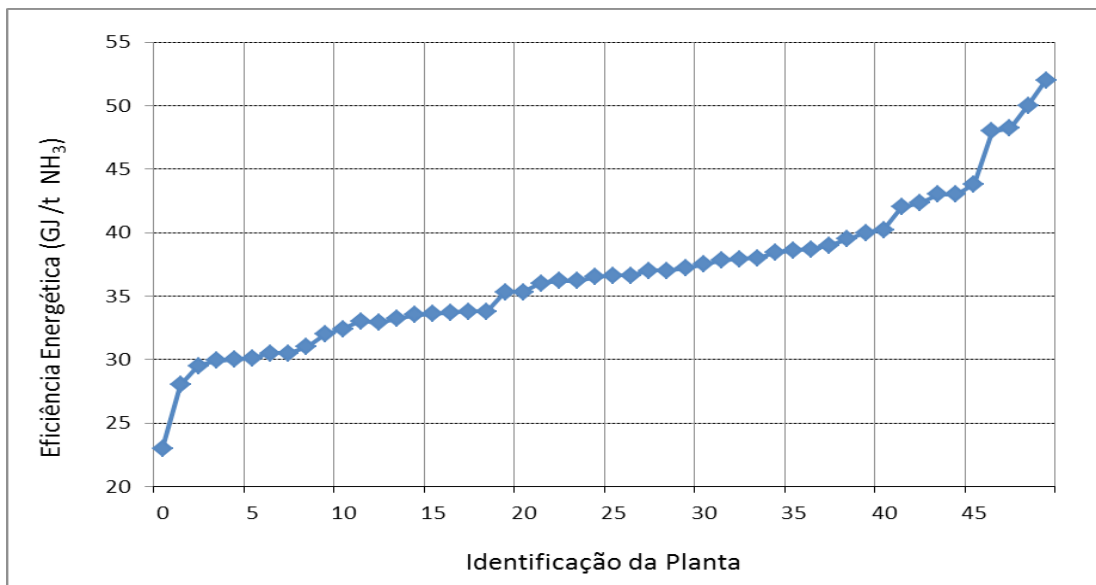


Gráfico 1: Índice de eficiência energética para plantas de amônia

Fonte:TAVARES, 2013

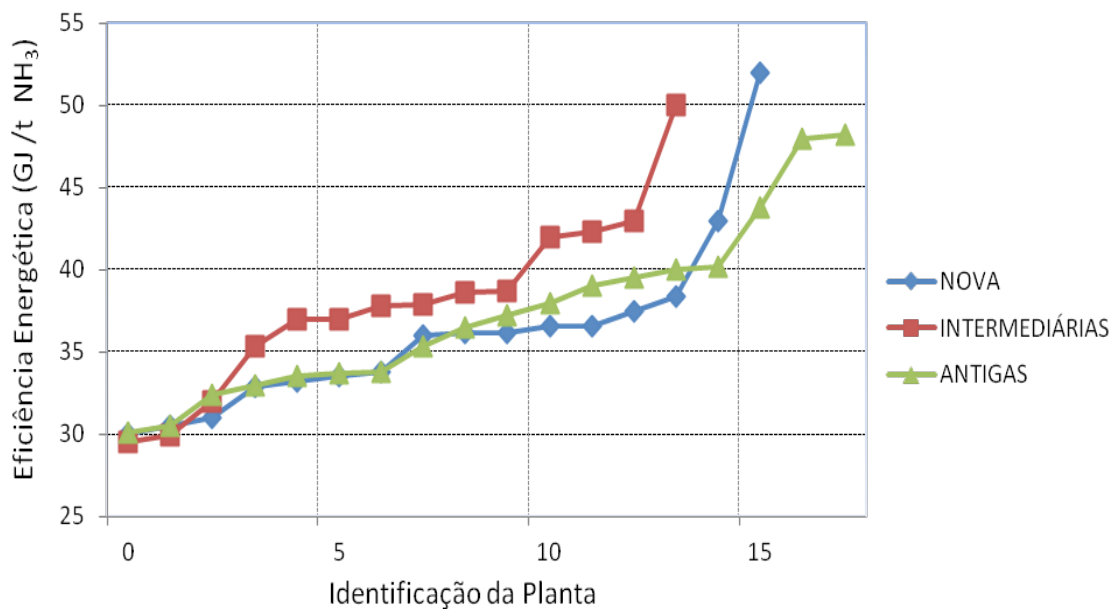


Gráfico 2: Eficiência energética de plantas de amônia em função do tempo de operação

Fonte: TAVARES, 2013

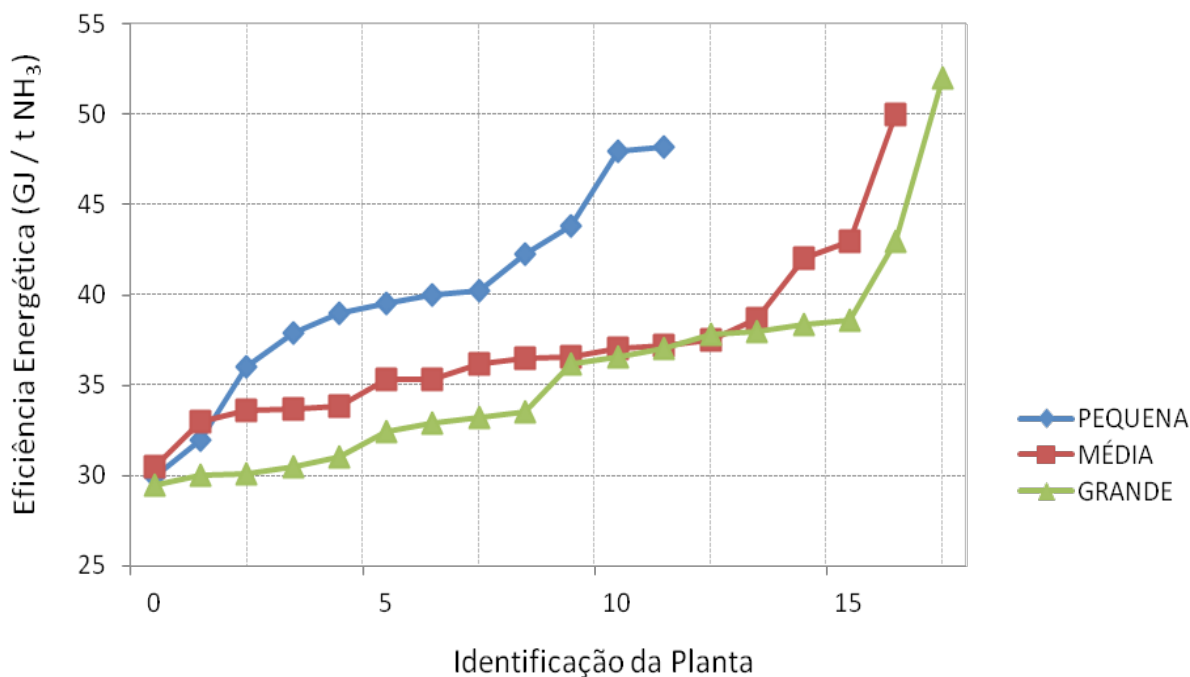


Gráfico 3: Eficiência energética de plantas de amônia em função da capacidade

Fonte: TAVARES, 2013

- Plantas com longo tempo de operação apresentam índices de eficiência energética comparáveis com plantas mais novas, indicando intervenções no sentido de melhoria em seus processos (equipamentos) e em suas rotinas de operação;
- Verifica-se que, de uma forma geral, plantas com maior capacidade apresentam maior eficiência energética e plantas de menor capacidade são menos eficientes;
- Do resultado da análise por indicadores, pode-se obter uma ferramenta útil na avaliação da melhoria contínua dos processos do ponto de vista da eficiência energética. Ações integradas voltadas para a eficiência dos processos e melhorias operacionais, juntamente com uma análise mercadológica, podem elevar a um aumento efetivo na rentabilidade das plantas, como também a uma consequente redução na geração de cargas poluidoras ao meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS

Abreu, Y. V.; Oliveira, M. A. G.; Guerra, S. M. G. (2010), Energia Sociedade e Meio Ambiente. eumed.net, Universidade de Málaga.

American Society Of Heating, Refrigerant And Air Conditioning Engineers. Ammonia as a refrigerant. Disponível em <<http://www.rmtech.net/chemicalplants.htm>>. Acesso em 23 de agosto de 2012.

Bussab, Wilton DE O.; Morettin, Pedro A. Estatística Básica. 5ª edição. São Paulo, 2002.

Cerqueira, A. G. Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas; Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1999.

Companhia Paranaense De Energia COPEL. Manual de Eficiência Energética. Diretoria de Distribuição, novembro 2005.

Crespo, A. A. Estatística Fácil. 4ª Edição. Editora Saraiva, 2006.

Glenda Rangel Rodrigues; José Rodrigues de Farias Filho. Eficiência Energética e Controle de Gases do Efeito Estufa em Refinarias de Petróleo – Indicador de Emissões Evitadas de GEE. Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2008.

Einstein, D., Worrell, E.; Khurshch, M. Steam Systems in Industry: energy use and energy efficiency improvement potentials. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

Eergy Policy. Industrial energy, industrial efficiency: indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry. Elsevier, vol 25, 1997.

Garcia, Fernando O., Daverde, Inés C. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimento de matéria-prima. In: Yamada, Tsuioshi, Stipp, Silvia Regina, Vitti, Abdalla Godofredo César. Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. cap.VIII, p.279. São Paulo, 2007.



- IFA – International Fertilizer Association (2000), Mineral fertilizer production and the environment. Part 1. The Fertilizer Industry's Manufacturing Process and Environmental Issues. Technical report no 26. Edição revisada. França.
- Jennings, J.R. Catalytic Ammonia Synthesis: fundamentals and practice; Plenum press, Nova York, 1991.
- Lozano, M.A.; Valero A. (1993), "Theory of exergetic cost: energy", vol.18.
- Lucinda, M. A. Qualidade – Fundamentos e Práticas. Brasport livros e multimídia LTDA. Rio de Janeiro, 2010.
- Martinelli, L. A. Os caminhos do Nitrogênio – do fertilizante ao poluente. International Plant Nutrition Institute, informações agronômicas, Brasil, v.118, junho 2007.
- Phylipsen, G.J.M.; Blok, K.; Worrell, E. (1997), International Comparisons Of Energy Efficiency- Methodologies for the manufacturing industry.
- Sánchez M.; Mosquera-Coral A.; Méndez R.; Lema J. M. Simple methods for the determination of the denitrifying activity of sludges. Bioresource technology, 75, p 1 – 6, 2000.
- Sciubba, E.; Wall, G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. International journal of thermodynamics, vol. 10, 2007.
- Sistema Firjan. Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil? – Estudos para o Desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro; exemplar nº 8, agosto de 2011.
- Szargut J.; Morris R.D.; Steward F.R. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Springer-verlag, 1998.
- Tavares, F.V. (2013), Uso de indicadores de eficiência energética em plantas de amônia. Dissertação defendida no curso de pós graduação em engenharia química na UFF.
- Toxopeus, M. E.; Lutters, E.; Houten, F. (2006), "Environmental Indicators & Engineering: an alternative for weighting factors", 13th international conference on life cycle engineering, vol. 75.
- Troeh, F. R.; Thompson, L. M. Solos e Fertilidade do Solo, 1ª Edição. Editora ANDREI, 2007.
- World Energy Council em colaboração com ADEME (2004), Energy efficiency: A Worldwide Review Indicators, Policies Evaluation.
- PSI - PLANT SURVEY INTERNATIONAL. Worldwide ammonia plant benchmarking study. Technical report. Petersburg, EUA, novembro, 2006.
- Van Ness, H. C.; Smith, J. M.; Abbott M. M. Introdução Termodinâmica à Engenharia Química. 7ª Edição. Editora LTC, 2011.
- Vasconcelos, N. Reforma a vapor do metano em catalisadores à base de níquel promovidos com Nióbia. 2006. 94 f.. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.