

REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PLANTAS DE SEPARAÇÃO DE AR COM FOCO NA ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA*

Ronaldo Santana Santos¹

Resumo

Tendo em vista que a indústria siderúrgica é grande consumidora de gases industriais e que todas as grandes empresas do setor possuem plantas produtoras de gases do ar instaladas dentro do seu parque produtivo, e que as plantas de oxigênio, nitrogênio e argônio são grandes consumidoras de energia elétrica, pouco se discute no ambiente da siderurgia a respeito de ações concretas para comprometer as empresas produtoras de gases do ar com iniciativas para reduzir o consumo de energia elétrica. Por outro lado, as empresas produtoras de gases utilizam-se da premissa de que são indústrias de energia-intensiva, aproveitando-se do consumo elevado e do alto custo da energia, para justificar para seus clientes siderúrgicos o alto preço de suas *commodities*. Assim, para as fornecedoras de gases, manter o consumo elevado de energia elétrica pode ser até desejável, pois a redução do consumo de energia poderia suscitar uma pressão indesejada de seus clientes siderúrgicos para a redução de preços dos gases. Este trabalho tem como objetivo apresentar as principais fontes de desperdício de energia elétrica em uma planta de gases do ar que produz oxigênio, nitrogênio e argônio, além de oferecer soluções técnicas para promover a redução no consumo de energia. Concluiu-se que, dependendo da característica do processo e dos equipamentos da planta, é possível reduzir consumo de energia elétrica no compressor de ar, com a adoção de *front end*, em substituição aos trocadores reversíveis, e com peneiras moleculares mais eficientes, com a adoção do processo de três colunas de destilação, com a compressão interna, com a adoção de refervedores tipo *downflow* em substituição dos de termosifão, e também com a adoção de novas gerações de PLC, DCS e do MPC. Ressaltou-se ainda que, com uma série de precauções e ações preventivas durante a elaboração do contrato de fornecimento dos gases é possível alcançar uma redução mais expressiva no consumo de energia (pelo menos 10%) sem a necessidade de investimento adicional de capital.

Palavras-chave: Gases do ar; Gases industriais; Economia de energia; Produção de oxigênio.

REDUCTION OF POWER CONSUMPTION IN AIR SEPARATION PLANTS WITH A FOCUS ON TECHNOLOGICAL UPDATE

Abstract

Considering that the steel industry is a huge consumer of industrial gases and that all the big companies of the sector have plants producing air gases installed in its industrial area and that the ASU plants are great consumers of electric power, there are few discussions in the environment of the steel industry with concrete actions to commit the companies supplying air gases with initiatives to reduce the consumption of electric power. On the other hand, gas suppliers use the premise that they are power-intensive industries taking advantage of high consumption and high cost of power to justify to their steel customer the high price of oxygen, nitrogen and argon. For these companies, therefore, maintaining high

* Contribuição técnica ao 39º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 33º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

power consumption is desirable, since reducing power consumption could lead to undesired pressure from steel companies to reduce gas prices.

This article aims to present the main sources of waste of electric power in an ASU plant that produces oxygen, nitrogen and argon, as well as offering technical solutions to promote the reduction of power consumption. It was concluded that depending on the characteristics of the process and the equipment of the plant, it is possible to reduce the power consumption in their compressor, with the adoption of front end, replacing the reversible exchangers, and with molecular sieves more efficient, with the adoption of the three-column distillation process, with the internal compression, with the adoption of downflow boilers instead of thermosiphon ones, and also with the adoption of new generations of PLC, DCS and MPC. It was also pointed out that, with a series of precautions and preventive actions during the drafting of the gases supply contract, it is possible to achieve a more significant reduction in the power consumption (at least 10%) without the need for additional capital investment.

Keywords: *Air separation plant; Industrial gases; Power saving; Oxygen production;*

¹ *Administrador de empresas (PUC-RS, Mestre em Eng. de Produção (UFRGS), Doutor em Eng. Mecânica (UNICAMP), Fundador e Consultor da R. S. Santos – Consultoria Empresarial, Jundiaí, SP-Brasil e parceiro estratégico da J. Lopes Advogados, São Paulo, SP-Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Há alguns anos tem se intensificado nas siderúrgicas a busca pela redução do desperdício de energia elétrica. Seja por restrições econômicas, que obrigam as organizações a economizar recursos, seja por pressão da sociedade que cobra a racionalização no uso dos recursos naturais ou até mesmo por pressão ambiental, em períodos de baixa pluviosidade que reduz os níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas afetando diretamente a geração de energia, resultando em racionamento obrigatório de energia elétrica. Essa busca pela redução do consumo de energia tem demandado projetos de redução do consumo, que muitas vezes nascem como projetos de redução de custos, direcionando toda a organização a buscar alternativas que possam resultar na redução de perdas e otimização de todos os seus processos.

Tendo em vista que a indústria siderúrgica é grande consumidora de gases industriais e que todas as grandes empresas do setor possuem plantas produtoras de gases do ar instaladas dentro do seu parque produtivo, e que as plantas de oxigênio, nitrogênio e argônio são grandes consumidoras de energia elétrica, pouco se discute no ambiente da siderurgia ações concretas para comprometer as empresas produtoras de gases com iniciativas para reduzir o consumo de energia elétrica. Por outro lado, as empresas produtoras de gases utilizam-se da premissa de que são indústrias de energia-intensiva, aproveitando-se dos altos custos de energia para repassá-los às siderúrgicas através do reajuste de suas *commodities*. Assim, para estas empresas, a redução do consumo de energia não será prioridade se conseguirem repassar o custo para seus clientes da siderurgia.

A tecnologia para separar o ar em seus componentes primários (oxigênio, nitrogênio e argônio) por destilação criogênica tem sido praticada há mais de 100 anos (SCHMIDT, 2001; SCHMIDT ET AL, 2014; LOCKWOOD, 2014). O ar

atmosférico é a matéria-prima utilizada em plantas de separação de ar. Para separar os componentes do ar em processo criogênico é necessário resfriá-lo em temperaturas extremamente baixa denominada criogênica. O ar consiste de diversos elementos gasosos. O nitrogênio (78%), o oxigênio (21%) e o argônio (0,95%) constituem a maior porção. Traços de Neônio, Hélio, Criptônio e Xenônio estão presentes em pequenas quantidades (SMITH e KLOSEK, 2001). Para a produção de oxigênio, nitrogênio e argônio, faz-se necessário a remoção de “impurezas”, entre elas o dióxido de carbono, hidrocarbonetos, traços de gases nobres e uma quantidade significativa de vapor de água, sólidos em suspensão, etc. A primeira etapa de um processo de separação de ar é a remoção de partículas sólidas em suspensão através de filtros utilizados na captação do ar atmosférico pelo compressor. No compressor, o calor resultante da compressão é removido pela água do resfriamento nos trocadores de calor entre os estágios de compressão. O ar resfriado, misturado com o vapor de água condensado nos trocadores *intercoolers* segue para um vaso coalescedor que acondiciona o condensado que é enviado para fora do processo. O ar é então direcionado para uma etapa do processo conhecida como unidade de pré-purificação onde o vapor de água residual, o dióxido de carbono e hidrocarbonetos são removidos. É importante que toda a umidade e o dióxido de carbono sejam removidos na unidade de pré-purificação, também chamada de *front end*, evitando que cheguem às etapas criogênicas da planta onde poderiam ser congelados e causar obstrução nas linhas de processo e nos equipamentos, especialmente nos trocadores de aletas (*plate-fin heat exchanger*).

A corrente de ar é resfriada no trocador criogênico principal e é direcionado para a coluna alta pressão e posteriormente para a coluna de baixa pressão que faz a separação do nitrogênio do oxigênio (KIRCHNER, LOCHNER e DOWY, 2012). Nas plantas mais antigas o trocador criogênico principal com ação reversa (*reverse heat exchanger* - RHX) faz o trabalho da unidade de pré-purificação. O argônio é obtido em um ponto intermediário na coluna de baixa pressão (LP), entre o nitrogênio (topo) e o oxigênio (base), e pode ser recuperado como um produto puro pela adição de uma terceira coluna de destilação (SCHMIDT, 2001; SCHMIDT ET AL, 2014). As plantas mais antigas utilizam a unidade de deoxo para produzir argônio. Obtêm-se assim os produtos, na forma gasosa e/ou líquida (Figura 1).

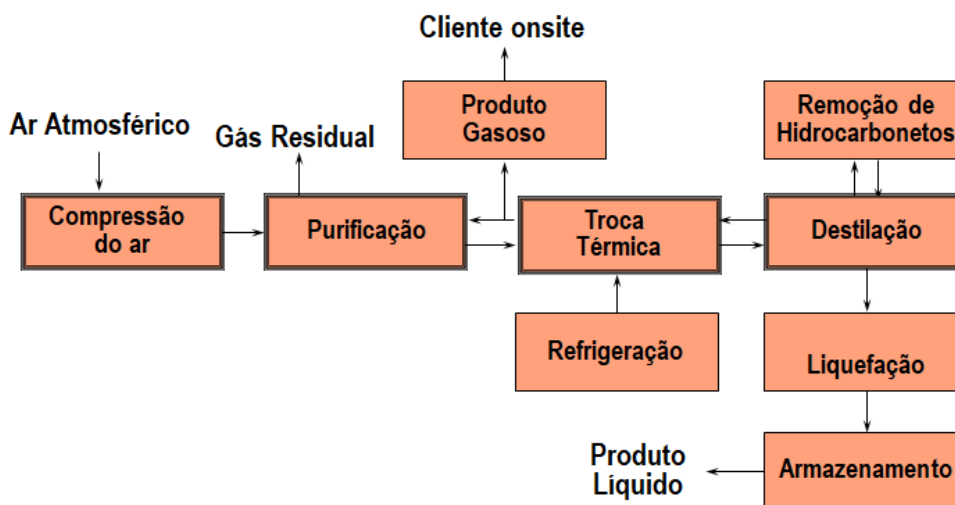


Figura 1. Visão simplificada de um processo criogênico em planta ASU

Este trabalho tem como objetivo fazer uma exposição de identificar os principais pontos de consumo de energia elétrica em uma planta de separação de ar (também conhecidas como *ASU – air separation unit ou air separation plant*) e apresentar evoluções tecnológicas que contribuem para a redução do consumo de energia.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Para realizar esse trabalho investigou-se o *estado da arte* da literatura técnica em plantas ASU, especialmente quanto a evolução tecnológica, consultas de patentes, informações disponibilizadas fabricantes e coletas de dados e informações *in loco* em dezenas de plantas dos principais fabricantes do mercado de gases.

2.2 REFERENCIAL TEÓRICO

A análise de exergia é comumente aplicada para quantificar e localizar as perdas termodinâmicas devido a irreversibilidades nos processos industriais, para que medidas potenciais possam ser tomadas para melhorar o processo (Ertesvag et al., 2005). Em plantas ASU, o compressor de ar (41%) e o sistema de destilação (28%) são responsáveis pelas maiores perdas de energia (FU e GUNDERSEN, 2016).

2.2.1 O Compressor de Ar

Para Lockwood (2014) e Goloubev (2012) quase toda a energia fornecida à planta de separação de ar é a utilizada o compressor de ar. Os compressores comumente utilizados nessas plantas alcançam em geral 75% de eficiência, o que significa que 25% da energia fornecida é “perdida” pelo aquecimento do ar no processo de compressão em um processo adiabático. No entanto, a energia também é perdida durante todo o processo de limpeza, refrigeração e destilação devido a quedas de pressão e perdas na troca de calor. Isso significa que o compressor deve atingir maiores pressões de ar, com conseqüente aumento no consumo de energia elétrica, para superar as perdas.

2.2.2 Os Trocadores Reversíveis (RHX)

As instalações criogênicas de separação de ar construídas antes dos meados dos anos 80 utilizavam trocadores de calor reversíveis para remover água e dióxido de carbono da corrente de ar do processo antes de entrarem no processo de liquefação e destilação. Muitas das antigas instalações com trocadores reversíveis também sofrem de corrosão interna das passagens principais do equipamento devido a contaminantes corrosivos no ar tais como o sulfureto de hidrogênio. Esses efeitos corrosivos, juntamente com as tensões mecânicas das constantes alternâncias entre serviços de alta e baixa pressão, facilitando a ocorrência de

vazamentos que prejudicam a pureza do produto e reduz a produção (AIGA, 2010; ALPEMA, 2010).

As novas gerações de plantas melhorou esse processo por incorporação de adsorção com peneira molecular para a remoção dos contaminantes e da maioria dos hidrocarbonetos presentes no ar. A substituição de trocadores de calor reversíveis por trocadores de núcleo ou a adoção da adsorção por alternância de temperatura (TSA) ou adsorção por alternância de pressão (PSA) podem eliminar os problemas de corrosão nos trocadores. A adoção do TSA ou PSA permite que os trocadores de calor reversíveis sejam retirados do serviço de reversão, funcionando sem alternâncias de fluxo (AIGA, 2010; ALPEMA, 2010).

2.2.3 Evoluções na Destilação Criogênica

O desempenho das unidades de separação de ar melhorado consideravelmente através da adoção de purificação antes de entrar no trocador criogênico principal e com a adoção de colunas de destilação com recheios (ao invés de bandejas, no processo convencional). Estas unidades de separação de ar podem produzir oxigênio com consumo específico de energia a partir de 360 KWh/Nm³ até 500 KWh/Nm³ (TANIGUCHI, ASAOKA, AYUHARA, 2015). Seguem algumas dessas evoluções:

- Em 1895 A primeira usina de liquefação de ar do mundo em escala comercial;
- 1902 - Primeira instalação de separação de ar do mundo para recuperação de oxigênio;
- 1904 - Primeira instalação de separação de ar do mundo para a recuperação de nitrogênio;
- 1910 - Primeira instalação de separação de ar do mundo usando o processo de destilação de coluna dupla;
- 1954 - Primeira instalação de separação de ar do mundo com purificação do ar (*front end*) por meio de absorvedores;
- 1978 - A compressão interna de oxigênio começa a ser utilizada;
- 1990 - Produção de argônio puro por coluna de destilação;
- 1991 - A maior usina de separação de ar do mundo com colunas em recheio entra em operação.

2.2.4 O Processo de Coluna Dupla e o Processo de Três Colunas

O processo nasceu com coluna dupla e foi desenvolvido por Linde no início do século XX ainda forma a base moderna da separação criogênica do ar. Neste processo, o ar é alimentado tanto a uma coluna de alta pressão (HP) e de baixa pressão (LP, ligeiramente acima da atmosférica) que compartilham um condensador/refervedor comum, geralmente alojados dentro de um mesmo casco. A coluna de alta pressão produz vapor rico em nitrogênio a uma pressão suficiente para condensar acima do ponto de ebulição do oxigênio e é assim capaz de vaporizar oxigênio no fundo da coluna de baixa pressão, produzindo um condensado de nitrogênio de elevada pureza usado como refluxo em ambas as colunas. O produto de fundo rico em oxigênio da coluna HP é também enviado como

alimentação para a coluna LP, que produz o produto oxigênio de elevada pureza na sua base. Este pode ser extraído como oxigênio gasoso ou líquido (HIGGINBOTHAM, 2011). Tanto as correntes de produto de oxigênio como as de nitrogênio proporcionam um resfriamento no trocador de calor principal (LOCKWOOD, 2014).

Uma planta de separação de ar moderna possui variantes altamente complexas neste formato básico, que minimizam a perda de energia usando múltiplos suprimentos de ar e fluxos de cada coluna para maximizar a eficiência de troca de calor entre as duas colunas (LOCKWOOD, 2014). A introdução de uma terceira coluna no processo de duplo refervedor com o ar de suprimento sob duas pressões (do compressor principal e de um suplementar, chamado *booster*) conduz para uma redução adicional de perdas na destilação e permite a otimização do processo. O consumo de energia de uma planta com esse tipo de processo é de mais baixo do que o processo clássico de coluna dupla.

2.2.5 Refervedores (*reboilers*) de Termosifão e de Fluxo descendente (*downflow*)

O trocador de calor refervedor (*reboiler*) é largamente utilizado em um processo criogênico para prover troca térmica com o objetivo de aquecer uma mistura líquida, vaporizando um ou mais componentes da mistura. O *reboiler* que integra termicamente o sistema de destilação é tipicamente um trocador de calor de alumínio soldado. Este tipo de trocar de calor proporciona uma grande quantidade de área superficial que aumenta a eficiência da instalação ao permitir que o calor seja transferido mesmo com uma pequena diferença de temperatura (SCHMIDT, 2001; SCHMIDT ET AL, 2014).

Os refervedores podem ser do tipo termosifão e de fluxo descendente (Figura 2). O refervedor termosifão é submerso em uma bacia de oxigênio líquido que circula naturalmente pela ação do calor. O refervedor de fluxo descendente (*downflow reboiler*) permite coeficientes de transferência de calor mais elevados associados com a vaporização de finas camadas de líquido e, portanto, uma planta mais eficiente (SCHMIDT ET AL, 2014).

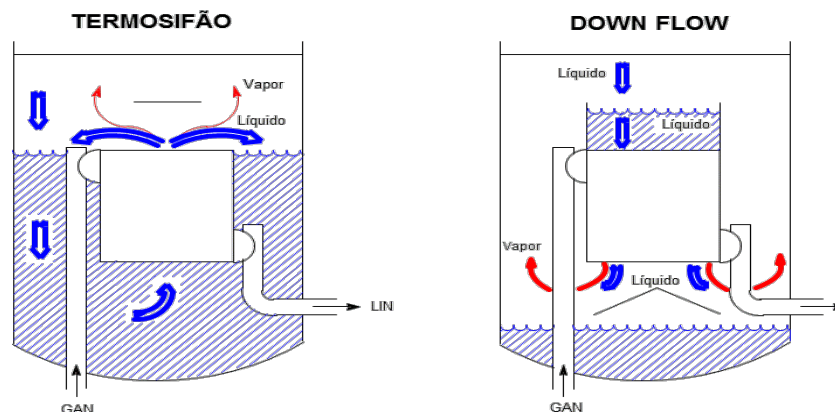


Figura 2. Tipos usuais de refervedores em colunas de destilação criogênica

2.2.6 Compressão Externa e Compressão Interna

O processo de compressão interna (ou bombeamento de líquido) permite ter oxigênio, nitrogênio e argônio pressurizados dentro da caixa fria por meio de bombas criogênicas fornecendo o produto final com a pressão necessária para o cliente. Com este método, evita-se a compressão externa (processo convencional) de oxigênio para o cliente, a operação e manutenção da planta se tornar mais simples, segura assim como há o aumento da confiabilidade (LINDE ENGINEERING, 2015). A estratégia é liquefazer os gases, cada produto isoladamente, e utilizar bombas para aumentar a pressão dos produtos (oxigênio, nitrogênio e argônio), no estado líquido antes de serem novamente vaporizados e entregues como gases de alta pressão ao cliente.

Alsultanny e Al-Shammari (2014) confirmam que algumas plantas criogênicas utilizam bombas internas, onde o oxigênio líquido é bombeado com pressão elevada que combina necessidades do cliente antes que passasse no trocador principal para a vaporização. No processo de compressão externa, é necessário disponibilizar compressores para transportar oxigênio, nitrogênio e argônio para o cliente nas pressões desejadas por este.

2.2.7 Importância do Isolante Térmico da Caixa Fria

Os equipamentos submetidos a temperaturas criogênicas ficam protegidos da troca térmica com o ambiente dentro da caixa fria (Figura 3). Os espaços vazios entre os equipamentos, tubulações e as paredes das caixas são preenchidos com isolante térmico que pode ser lã de rocha ou perlita. A função da lã de rocha e da perlita é minimizar a perda de calor dos fluidos do processo em temperaturas criogênicas para o ambiente externo, ou seja, dificultar a troca térmica entre o interior das caixas frias com o ambiente externo.

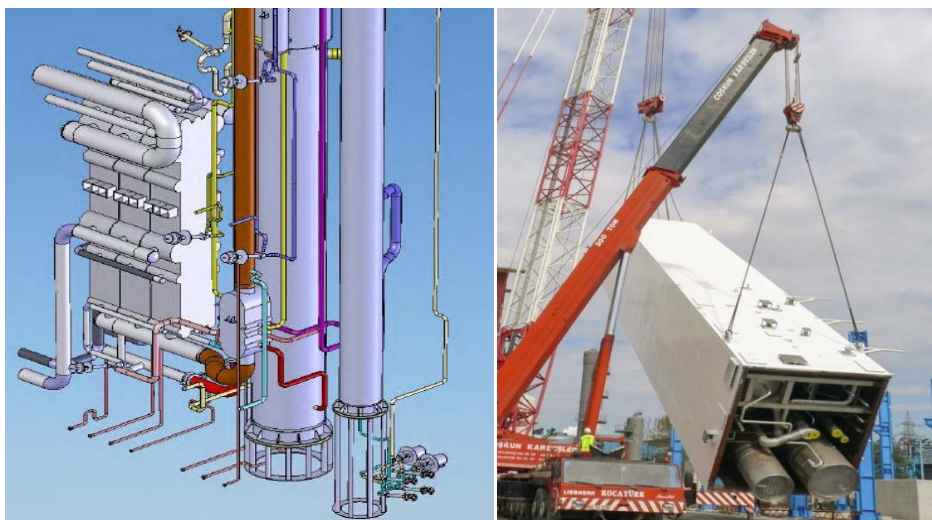


Figura 3. Equipamentos Criogênicos e Caixa Fria

Quando em operação normal, as caixas frias devem ser inspecionadas para verificar a presença de pontos de congelamento denominados de *frost spots*. A formação de *frost spots* é também um dos sintomas de vazamentos de fluidos do processo para o espaço ocupado pelo isolante térmico, por isso deve ser investigados (EIGA, 2012).

2.2.8 Nível de Automação

O PLC - *Programmable Logic Control*, em português CLP - Controlador Lógico Programável é um conjunto de dispositivos eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

DCS - *Distributed Control System* ou SDCD - Sistema Digital de Controle Distribuído composto de Sensores e atuadores dos mais diversos tipos, cartões de entradas e saídas analógicas e digitais, interface com redes de chão de fábrica e nível gerencial, estação de controle de processo onde são executados os algoritmos PID, controle avançado, otimização, etc.), interfaces gráfica Homem - Máquina como as estações de operação e de Engenharia, esta última destinada à configuração do software do sistema.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma eficiência máxima, o ASU deve ser operado a uma carga acima de 75%, caso se utilize um único compressor de ar principal, mas o uso de dois compressores pode reduzir esta limitação para 50%. Caso operem três compressores, a eficiência cairá para 35% (PROSSER e SHAH, 2011). Segundo Fu e Gundersen (2016) as principais perdas de energia no processo concentram-se no compressor de ar principal (41%).

O trocador de calor (REVEX) é uma tecnologia obsoleta, pois consome cerca de 50% da energia da ASU. Esta tecnologia foi suplantada pelo uso da peneira molecular. A revisão das patentes mostrou que a maior parte do desenvolvimento em novas tecnologias associadas a plantas de separação de ar nos últimos dez anos foi feito no sistema de purificação, onde são utilizadas peneiras moleculares (HIDANO, NAKAMURA E KAWAI, 2007). Novos materiais de peneira molecular trás uma redução de 1,5% no consumo total de energia devido a uma menor temperatura necessária de regeneração, no TSA, e menor queda de pressão, tanto no TSA quanto no PSA (ALSULTANNY E AL-SHAMMARI).

Os refeedores tipo *downflow* podem reduzir o consumo total de energia da planta de 0.5 % a 2 %, dependendo do processo (SCHMIDT, 2006). Segundo Fu *et. al.* (2013) o sistema de destilação de uma planta de separação de ar representa perdas de 28,2 %. O projeto de três colunas é melhor do que o projeto de duas colunas. Golubev (2012) afirma que o processo de três colunas consome 20% menos energia que o processo de coluna dupla.

No processo de compressão externa, é necessário disponibilizar compressores para transportar oxigênio, nitrogênio e argônio para o cliente nas pressões desejadas por este (compressão do produto final para o cliente). No Processo de compressão interna possibilita uma redução do investimento, pois não há necessidade de compressores de gases e também melhora na segurança de processo com a eliminação do uso de compressores de oxigênio que sempre apresentam um maior risco durante a operação. Embora possamos utilizar apenas o compressor de ar para fazer todo o trabalho de transporte de fluidos, é possível adicionar bombas para transportar o oxigênio, nitrogênio e o argônio em estado líquido (sendo posteriormente vaporizado na saída da caixa fria, no trocador principal indo diretamente para o cliente sem compressão adicional). Neste caso, o ganho de eficiência energética é alcançado porque o bombeamento do líquido requer menos energia elétrica do que a compressão do gás. Como resultado, produz-se oxigênio, nitrogênio e argônio de alta pressão, evitando-se a necessidade de compressores adicionais para comprimir o produto final. A Figura 4 reporta a adoção de novas tecnologias nas plantas de gases do ar ao longo do tempo e sua repercussão no consumo de energia elétrica (neste caso excluiu-se o consumo de compressores do produto final – compressão externa).

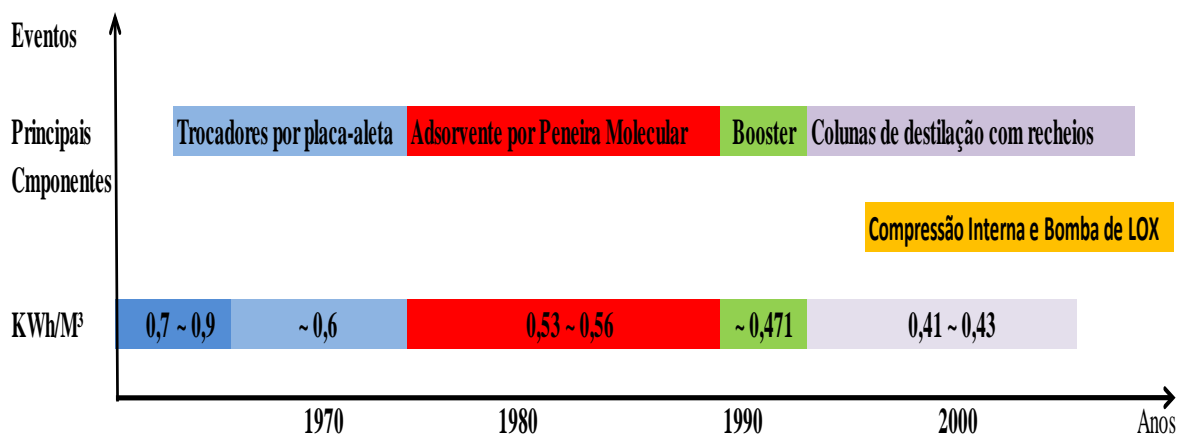


Figura 4. Evolução Tecnológica no Processo de Separação de Ar
Adaptado de ZHANG et al. (2014)

Quanto as caixas frias, Inspeções periódicas devem identificar e corrigir “perdas de calor” (desperdício do trabalho realizado pelo compressor de ar) para o ambiente externo.

É também possível reduzir os custos de energia elétrica com a adoção de novas gerações de PLC, DCS (e do MPC). Ressaltou-se ainda que, com uma série de precauções e ações preventivas durante a elaboração do contrato de fornecimento é possível alcançar uma redução mais expressiva no consumo de energia (pelo menos 10%) sem a necessidade de investimento de capital.

3 CONCLUSÃO

Concluiu-se que algumas novas tecnologias tem proporcionado um aumento da eficiência energética das plantas de gases do ar resultando em um menor consumo específico de energia elétrica por metro cúbico de produto obtido. Cabe as empresas

siderúrgicas negociarem com seus fornecedores de gases ações concretos que resultem na redução do consumo de energia e, conseqüentemente, uma redução proporcional no preço dos produtos.

REFERÊNCIAS

- 1 AIGA. Safe Use of Brazed Aluminum Heat Exchangers for Producing Pressurized Oxygen. Asia Industrial Gases Association (AIGA 057/10). 2010.
- 2 ALPEMA. The Standards of the Brazed Aluminium Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturers. Association, Brazed Aluminium Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturers. 2010.
- 3 ALSULTANNY, Y.A; AL-SHAMMARI, N. Oxygen Specific Power Consumption Comparison for Air Separation Units. Engineering Journal. Volume 18 Issue 2. April, 2014.
- 4 CUZIC, M., POPA, V., LACRAMIOARA, C. Study os the mais heat exchanger in a cryogenic air separation unit. Termohehnica, fev. 2013.
- 5 Fu, Chao & Gundersen, Truls. (2011). Power reduction in air separation units for oxy-combustion processes based on exergy analysis. Computer Aided Chemical Engineering. Out, 2016.
- 6 GOLOUBEV, Dimitri (Linde). Oxygen production for oxyfuel powerplants. Workshop on Oxyfuel - FBC Technology, 2012.
- 7 HIGGINBOTHAM, Paul. Development in the Air Separation Unit – Addressing the Need of Increased Oxygen Demand from the Oxy-Blast Furnace. IEA GHG Steel Workshop. November, 2011. Düsseldorf, Germany.
- 8 I. S. Ertesvag, H. M. Kvamsdaland O. Bolland. Exergy analysis of a gas-turbine combined-cycle power plant with precombustion CO₂ capture. Energy. 2005. January, 5-39.
- 9 KIRCHNER L., LOCHNER S., DOWY S (Linde). The 12th Cryogenics - Advanced Cryogenic Processes for low Purity Oxygen Production. Dresden, Germany, 2012.
- 10 LINDE ENGINEERING. History and technological progress. Cryogenic air separation. 2015.
- 11 LOCKWOOD, Toby. Developments in oxyfuel combustion of coal. IEA Clean Coal Centre. London, United Kingdom. August, 2014.
- 12 PROSSER N, SHAH M (2011) Air separation units for oxy-coal powerplants. Presentation at: 2nd oxyfuel combustion conference, Yeppoon, Queensland, Australia, 13–16 Sep 2011, 20 pp (2011).
- 13 SMITH, A.R.; KLOSEK, J (Air Products). A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. Fuel Processing Technology. v70 p115–134. Elsevier. 2001.
- 14 SCHMIDT, W. ASU Reboiler / Condenser Safety. European Industrial Gas Association Production Safety Seminar, February 2006.
- 15 SCHMIDT, W.P.; KOVAK, K.W.; LICHT, W.R.; FELDMAN, S.L. Managing Trace Contaminants in Cryogenic Air Separation. 12th Intersociety Cryogenic Symposium at AIChE Spring Meeting. Atlanta, GA March 5-9, 2000.
- 16 TANIGUCHI, M; ASAOKA, H; AYUHARA, T (Kobe). Energy Saving Air-Separation Plant Based on Exergy Analysis, Kobelco Technology Review n 33. Feb, 2015.
- 17 T. Hidano, M. Nakamura, and M. Kawai, Patent No. US 2007/0209518 A1. US, 2007.
- 18 ZHANG¹, X; CHEN, J; YAO, L; HUANG, Y; ZHANG, X; QIU, L. Research and development of large-scale cryogenic air separation in China. J Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys & Eng) 2014 15 (5): 309-322.

