

APLICAÇÃO DE BOMBA DE CALOR EM COLUNA DE DESTILAÇÃO DE PROPENO

MARCELLO LIMA GALVÃO^{1*}

¹Eng Químico, PETROBRAS, mestrando em Energia, USP-SP, Curitiba-PR, marcellogalvao@petrobras.com.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

RESUMO: Processos de destilação apresentam grande importância para a indústria, sendo utilizados extensivamente para a separação e purificação de produtos. Extremamente intensivos energeticamente, de maneira geral, requerem grande rejeição de calor ao meio, frequentemente não aproveitado industrialmente por apresentar baixo nível térmico associado. Bombas de calor apresentam-se como excelente alternativa para recuperação energética de correntes *waste heat*, com vastos exemplos na literatura aplicados a torres de destilação. Neste trabalho avaliou-se a aplicação de uma bomba de calor por compressão do vapor de topo em uma torre de destilação para separação de propano-propeno, comparativamente a uma torre convencional de separação com refeedor e condensador, verificando que o uso de 4,1 MW associado ao compressor de vapor de topo da coluna torna possível sua reutilização junto ao refeedor, propiciando redução em mais de 35 MW (90%) do consumo de vapor d'água da planta, bem como 80% do consumo de água de resfriamento associado, produzindo um COP (coeficiente de desempenho energético) de 4,6. Cálculos de rendimento exergetico demonstram que a configuração obtida é 2,2 vezes mais eficiente, comprovando a aderência da tecnologia estudada ao foco de conservação e uso inteligente da energia.

PALAVRAS-CHAVE: Bombas de Calor, Destilação, Análise Exergetica.

INTEGRATION OF A HEAT PUMP IN A PROPYLENE DISTILLATION PLANT

ABSTRACT: Distillation has a great importance to the process industry, as it is extensively used for product separation and purification. As an extremely energy intensive process, requires high level of heat rejection, frequently not capable of being directly used into the process, due to its low temperature profile. Process integration using heat pumps are considered an excellent choice to provide waste heat upgrade, with numerous examples applied to distillation towers cited in the literature. In this work, a vapor compression heat pump applied to a propane-propylene distillation plant was evaluated, in comparison to a conventional distillation process with typical bottom reboiler and overhead condenser. It was found that a shaft compressor work of 4.1 MW, integrated to the top vapor compression, allows its application to the tower reboiler, reducing more than 35 MW (90%) of plant steam consumption, as well as 80% of cooling water originally associated. The calculated performance coefficient (COP) of the whole process is 4.6. Moreover, an exergetic analysis was performed, confirming the proposal scheme to be 2.2 times more efficient than a conventional process without heat pump integration. In conclusion, the evaluated alternative seems to be an attractive technology to be considered within projects with focus on energy savings.

KEYWORDS: Heat Pumps, Distillation, Exergetic Analysis.

INTRODUÇÃO

Processos de destilação são responsáveis por efetuar cerca de 95% das separações de fluidos na indústria de processos, compreendendo um gasto energético da ordem de 3% da demanda mundial (Engelien & Skogestad, 2004); (Humphrey & Siebert, 1992), representando em média entre 40% e 60% do consumo energético das indústrias químicas (Gorak & Sorensen, 2014); (Sarbatly & Chiam, 2013). Sua concepção, por si só, já apresenta uma baixa eficiência termodinâmica, da ordem

de 5 a 20%, sobretudo quando se busca a separação de componentes de pontos de ebulição muito próximos e em elevada pureza, como é o caso das torres de separação propano-propeno, abundantemente presentes em refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas em geral. (De Koeijer & Kjelstrup, 2000); (Humphrey et al, 1991).

Invariavelmente, o produto de topo de uma coluna de destilação está a uma temperatura muito próxima de utilização como fonte térmica, mas normalmente incapaz de aproveitamento direto, sendo tratado como *waste heat*, demandando rejeição térmica ao ambiente através da utilização de resfriadores a ar e/ou água. (Erickson et al, 1982). Neste aspecto a aplicação de bombas de calor integrada a processos de destilação se mostra como excelente alternativa para *upgrade* térmico de correntes de topo de torres, viabilizando seu uso como fonte de calor ao refeedor, propiciando economia energética e de água de resfriamento. Alguns exemplos de aplicações diretas de bombas de calor em colunas de destilação podem ser verificados em: Erickson, et al (1982), Fonyo (1995), Fonyo & Benkö (1998), Díez et al (2009), Waheed et al (2014).

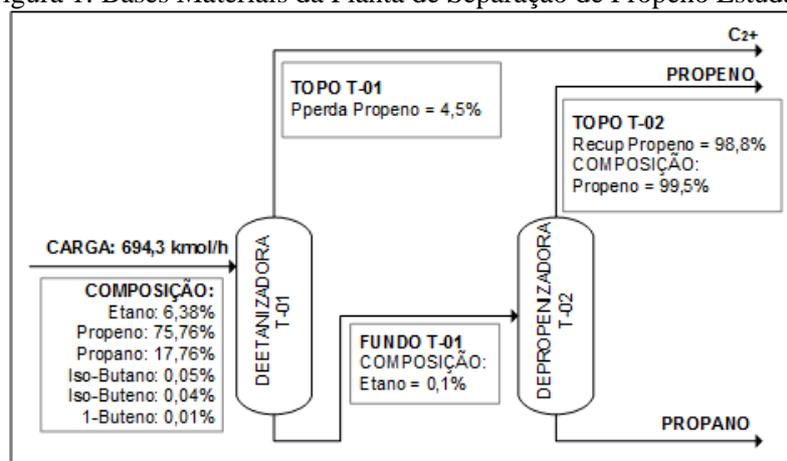
Neste trabalho propõe-se a avaliação energética de uma torre de separação propano-propeno comparando um esquema tradicional de destilação, com uso de refeedor aquecido pelo uso de vapor d'água e condensador suprido por água de resfriamento, a um esquema integrado a uma bomba de calor por compressão de vapor. Os resultados são apresentados em termos de coeficiente de desempenho (COP), consumos de água, vapor, energia elétrica e rendimento exergético.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de processo utilizados para este trabalho se referem a uma planta de separação de propeno de uma refinaria de Brasil, cujo projeto já contemplou a integração de bomba de calor como alternativa de ganho energético.

A planta de separação estudada consiste da aplicação de duas torres de destilação que efetuam o processamento de 694,3 kmol/h (≈ 30 t/h) de corrente de C₃, conforme disposição e composição representados pela Figura 1. A primeira torre (T-01), denominada deetanizadora, apresenta a função de remover o etano remanescente, garantindo sua presença abaixo de 0,1% para a segunda torre e perda de propeno para C₂ não superior a 4,5%. A segunda torre (T-02), denominada depropenizadora, efetua basicamente a separação entre propeno e propano, juntamente com os demais compostos de maior massa molecular ainda presentes em pequena quantidade (C₄ remanescente), garantindo a especificação final do propeno grau polímero (99,5% de pureza) e perda de propeno para propano (nesta torre) não superior a 1,2%, correspondendo a uma recuperação de 98,8% do composto de interesse.

Figura 1: Bases Materiais da Planta de Separação de Propeno Estudada



Fonte: elaboração própria a partir de dados coletados da refinaria em estudo

As Figuras 2 e 3 exibem as configurações da planta convencional (caso 1) e com aplicação de bomba de calor (caso 2) comparadas neste estudo, onde pode-se verificar a diferença em relação ao produto de topo da T-02 do caso 2, o qual, uma vez comprimido adquire temperatura elevada o suficiente para suprir a carga térmica do refeedor da torre, promovendo concomitantemente à

condensação do propeno e vaporização do propano de fundo, necessitando apenas de um condensador complementar à corrente de propeno.

Figura 2: Configuração Convencional (Caso 1)

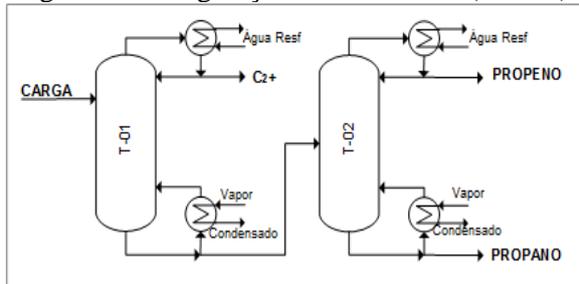
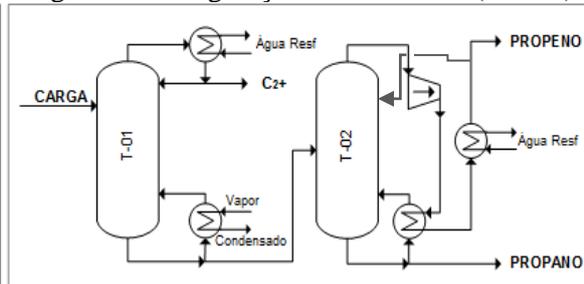


Figura 3: Configuração Bomba Calor (Caso 2)



Ambos os casos foram simulados em Petrosim¹ adotando-se a equação de estado de SRK² (como base termodinâmica, e as principais bases energéticas conforme Tabela 1.

Tabela 1: Bases Energéticas das Simulações

Condições	Caso 1	Caso 2
Alimentação T-01	36,3°C; 3483 kPa(abs)	36,3°C; 3.483 kPa(abs)
Topo T-01	38 °C	38 °C
Topo T-02	35 °C	18,1 °C (*3)
Vapor d'água	433,5 kPa (saturado)	433,5 kPa (saturado)
Coef. Adiab. Compressor	-	75%
Efic. Motor Elétrico	-	95%

De posse do balanço material e energético das simulações foram efetuadas as compilações dos seguintes resultados:

- ◆ Coeficiente de Desempenho Energético (COP): calculado a partir da razão entre o calor útil e a soma das parcelas de calor e trabalho fornecidos;
- ◆ Consumo de Vapor: considerando a razão entre calor fornecido e diferença de entalpia entre vapor e condensado nas condições definidas na tabela 1;
- ◆ Consumo de Água de Resfriamento: considerando a razão entre calor rejeitado e diferença de entalpia entre o suprimento e retorno da água de refrigeração, adotando de um $\Delta T_{\text{ÁGUA}}=5^{\circ}\text{C}$;
- ◆ Consumo de Energia Elétrica: mais propriamente aplicável ao cenário com bomba de calor, uma vez que o consumo de energia elétrica no caso 1 é desprezível se comparado ao caso 2, haja vista o compressor de vapor necessitar de um trabalho de eixo muito superior a uma bomba de recalque para refluxo de topo;
- ◆ Rendimento exergético: esta análise faz-se necessária em virtude de os casos comparados apresentarem consumos energéticos de qualidades diferentes perante a 2ª Lei da Termodinâmica, uma vez que o trabalho percebido por 1 kJ de vapor d'água (fonte majoritária no caso 1) é menor em relação a 1 kJ de energia elétrica (fonte majoritária no caso 2). O cálculo deste rendimento é feito através da razão da diferença entre as exergias físicas (\dot{B}^{fis}) de saída e entrada e a exergia total fornecida ($\dot{B}^{\text{fornecido}}$), conforme equação 1, sendo que para parcela de exergia fornecida adotou-se o seguinte critério para cálculo:
 - Energia elétrica fornecida: considerada como 100% de equivalência exergética;

¹ Petrosim: software proprietário da KBC Corporation, voltado à simulação rigorosa de processos.

² SRK (Soave-Redlich Kwong): equação de estado voltada para uso em substâncias não polares, tais como hidrocarbonetos (Sandler, 1999).

*³ A condição de arranjo do caso 2, na qual a condensação do propeno ocorre somente após a ação do compressor, permite com que haja viabilidade de operar a T-02 em menor nível de pressão, e, consequentemente de temperatura, situação não viável para o caso 1 em função da necessidade de garantir a condensação do propeno com o uso de água de resfriamento, o que determina que a torre deve operar a uma temperatura não inferior a 35°C (limite prático considerado para uso de água de resfriamento).

- Vapor d'água fornecido: calculada com base direta da aplicação do balanço de entalpia e entropia entre vapor e respectivo condensado nas condições da tabela 1.

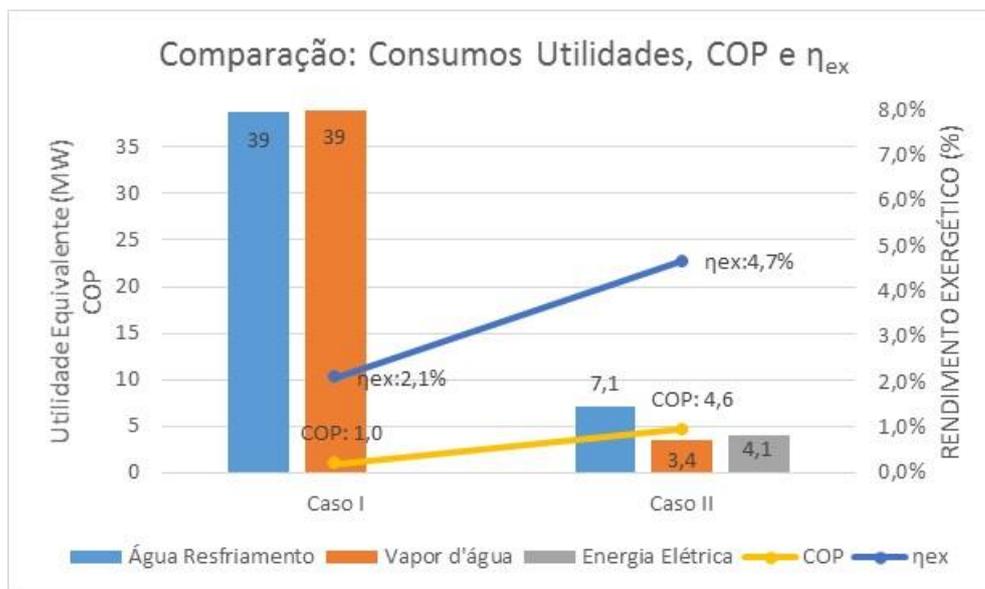
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 observa-se a comparação entre os consumos de vapor d'água, água de resfriamento e energia elétrica entre os casos 1 e 2, dispostos nas unidades usuais de consumo destas utilidades na indústria. Com intuito de compreender melhor o que as grandezas representam em termos de uma base de suprimento energético (no caso de vapor d'água e/ou energia elétrica) e de rejeição de *waste heat* ao meio (no caso da água de resfriamento), pode ser verificada a Figura 4 em conjunto com o coeficiente de desempenho (COP) e rendimento exergético.

Tabela 2: Comparação de Consumos de Utilidades

Consumos de Utilidades	Caso 1	Caso 2
Vapor d'água (t/h)	66,0	5,8
Água de Resfriamento (m ³ /h)	6576	1211
Energia Elétrica (MW)	0	4,1

Figura 4: Comparação de consumos de Utilidades em Bases Energéticas e COP da Instalação



Comparando-se os casos 1 e 2, verifica-se que o empreendimento de 4,1 MW junto ao compressor da bomba de calor viabiliza uma diminuição substancial do consumo de água de resfriamento, com redução acima de 80%, e vapor d'água, com redução acima de 90%, sendo aparentemente uma boa estratégia a ser aplicada em projetos, sobretudo se houver deficiência no fornecimento destas utilidades, ou se houver requisitos para minimização de tamanho da instalação.

A substancial redução de consumo de vapor d'água no caso 2 é o que garante a melhoria do desempenho energético da instalação (COP), o qual, conforme a Figura 4, apresenta resultado 4,6 vezes superior em relação ao caso 1, o qual por não utilizar de recursos de bomba de calor necessariamente apresenta COP = 1. Esta constatação, no entanto, deve ser analisada com cuidado, uma vez que o vapor d'água a 433,5 kPa (abs) não apresenta qualidade energética comparável à eletricidade utilizada para o motor do compressor da bomba de calor. Em outras palavras, o fato de o caso 2 apresentar um COP = 4,6 não significa dizer que seja 4,6 vezes superior em relação ao caso 1.

Esta dúvida fica melhor esclarecida ao se verificar a comparação de rendimentos exergéticos da figura. Ambas as situações apresentam rendimentos exergéticos extremamente baixos, 2,1% e 4,7%, respectivamente para o caso 1 e 2, o que é justificável para um processo tão difícil e custoso

energeticamente quanto a separação de propano e propeno. No entanto, o simples fato de o caso 2 haver apresentado rendimento exergético 2,2 vezes acima do caso 1, significa dizer que a introdução da bomba de calor neste processo, traz, além dos ganhos de redução de consumo de utilidades anteriormente mencionado, uma real redução das perdas de disponibilidade energética para geração de trabalho (menor destruição exergética por irreversibilidades termodinâmicas) comprovando ser uma forma mais inteligente do uso energético em instalações que apresentam expressivo consumo, tais como a separação propano-propeno.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível avaliar a aplicação de bomba de calor em ciclo de compressão de vapor integrada a um processo de destilação para separação de propano-propeno, demonstrando elevada atratividade energética, com economia de utilidades acima de 80% em relação ao processo de destilação convencional (uso de refeedor de fundo e condensador de topo), apresentando um COP de 4,6.

A comprovação da atratividade desta alternativa integrada foi também verificada através de cálculo de rendimentos exergéticos de ambos os processos, demonstrando uma elevação de 2,2 vezes o valor original, correspondendo a uma redução de perdas de disponibilidade energética, enquadrando a tecnologia proposta como extremamente favorável e aderente ao foco pela conservação e uso inteligente da energia.

O uso da análise exergética, em complemento à análise de coeficientes de desempenho (COP) oriunda da 1ª Lei da Termodinâmica, mostra-se extremamente eficaz para a realização deste tipo de análise, auxiliando a tomada de decisão em investimentos associados à melhoria de desempenho energético de uma instalação industrial.

REFERÊNCIAS

- De Koeijer, G; Kjelstrup, S. Minimizing entropy production rate in binary tray distillation. *Int J Appl Thermodyn* 3, p.105-110, 2000.
- Díez, Eduardo; Langston, Paul; Ovejero, Gabriel; Romero, M. Dolores. Economic feasibility of heat pumps in distillation to reduce energy use. *Applied Thermal Engineering* 29, p.1216-1223, 2009.
- Engelien, H. K.; Skogestad, S. Selecting appropriate control variables for a heat integrated distillation system with prefractionator. *Comput Chem Eng* 28, p.683-691, 2004.
- Erickson, Donald C; Lutz Jr, Edward J. Absorptive recycle of distillation waste heat. In *Proceedings from the fourth Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, 1982.
- Humphrey, J. L.; Siebert, A. F. Separation technologies: an opportunity for energy savings. *Chem Eng Prog*, 1992.
- Fonyo, Z; Benkö, N. Comparison of various heat pump assisted distillation configurations. *Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE Vol. 76, Part A*, 1998.
- Fonyo, Z.; Kurrat, R.; Rippin, D. W. T.; Meszaros, I. Comparative analysis of various heat pump schemes applied to C4 splitters. *Computers Chemical Engineering* Vol. 19, p.S1-S6, 1995.
- Gorak, A; Sorensen, E. *Distillation: fundamentals and principles*. Academic Press, 2014.
- Humphrey, J. L.; Siebert, A. F. Separation Technologies advances and priorities. Final report for US Department of Energy. Office of Industrial Technologist, Washington (DC), 1991.
- Sandler, Stanley I. *Chemical Engineering Thermodynamics*, 3rd Edition. John Wiley & Sons, 1999.
- Sarbatly, R.; Chiam, C. K. Evaluation of geothermal energy in desalination by vacuum membrane distillation. *Applied Energy*, 112, p.737-746, 2013.
- Waheed, M.A.; Oni, A. O.; Adejuyigbe, S. B.; Adewumi, B. A.; Fadare, D. A. Performance enhancement of vapor recompression heat pump. *Applied Energy* 114, p.69-79, 2014.