

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO DA MISTURA PROPANO-PROPILENO

Arthur Siqueira Damasceno¹; Karoline Dantas Brito²

*1 Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química
1 arthursiqueira3@gmail.com; 2 karolineufcg@gmail.com.*

RESUMO

A escassez de recursos energéticos resultou na mudança de comportamento dos engenheiros em relação à operação de colunas de destilação. A crescente preocupação em operar colunas de destilação de forma eficiente (produto dentro das especificações obtidos com um menor consumo energético), trás consigo o conceito de otimização, ferramenta matemática importante para realizar esta tarefa. O presente trabalho visa aplicar três técnicas de otimização (Golden Section, Método de Newton e Interpolação Quadrática) para determinar a razão de refluxo ótima e os custos operacionais ótimo para uma coluna de destilação, destinada a separar propano e propileno, umas das mais complicadas separações da indústria petroquímica. A partir das correlações de Eduljee (1975) e do balanço de massa da coluna de destilação em estudo, foi possível desenvolver um modelo capaz de representar matematicamente os fenômenos físicos e o balanço de custo da mesma. Um estudo comparativo entre as técnicas de otimização e uma análise de sensibilidade na razão de refluxo foram realizadas no desenvolvimento deste trabalho, com o auxílio do software Matlab®.

Palavras-Chave: Destilação, Razão de Refluxo, Técnicas de Otimização

Lista de Símbolos

B – Vazão da corrente de base.

C_1 – Custo da quantidade de calor do refeedor.

C_2 – Custo do resfriamento do condensador

C_B – Valor do propileno na corrente de base

C'_B – Custo por quilo de propano

C_F – Custo por quilo de propileno

C'_F – Custo por quilo de propano

C_D – Valor de propileno na corrente de topo

C'_D – Valor de propano na corrente de topo

D – Vazão de destilado

F – Vazão de alimentação

L – Vazão de líquido

N – Número de estágios

N_M – Número mínimo de estágios

Q_C – Exigência de carga térmica para o condensador

Q_R – Exigência de carga térmica para o refeedor

R – Razão de refluxo

R_M – Razão de refluxo mínimo

U – Valor diferencial do componente mais pesado

V – Vazão de vapor

W – Valor diferencial do componente mais leve

X_B – Fração molar do componente mais leve (propileno) na corrente de base

X_D – Fração molar do componente mais leve (propileno) na corrente de topo

X_F – Fração molar do componente mais leve (propileno) na corrente de alimentação

α – Volatilidade relativa

λ – Calor latente

1. INTRODUÇÃO

A destilação desempenha um papel importante em muitos processos químicos, principalmente no setor de refino de petróleo, onde é a operação unitária mais utilizada. O contínuo aperfeiçoamento de colunas de destilação vem exercendo influências consideráveis no cenário econômico e ambiental. Isso porque a destilação necessita de energia para que o processo de separação ocorra, e quando se fala em consumo energético, trata-se de minimizar a energia requerida pelo sistema para atingir as especificações do produto, resultando em menores custos financeiros para a empresa, e também, menores danos ambientais para a sociedade [Cadore, 2011].

Apesar da grande utilização na separação das mais diferentes misturas, a destilação é um processo em que o consumo energético representa o maior percentual de requerimento global de energia de uma planta química. Em todo mundo, cerca de 95% das separações são feitas utilizando colunas de destilação [Caballero e Grossmann, 2012].

A preocupação em reduzir esses elevados consumos energéticos resulta na pesquisa de novos projetos energeticamente mais eficientes. Neste contexto, o conceito de otimização de processos ganhou muita força, representando uma importante ferramenta em processos de destilação que resulta em impacto significativo sobre o consumo de energia.

Um problema complexo no processo de otimização em torres de destilação é determinar não somente os valores das condições operacionais, mas também o número mínimo de estágios necessários para a separação. Caso o grau de liberdade seja reduzido a zero através das especificações impostas as variáveis, o problema de otimização se reduz a um problema clássico de design de destilação que requer apenas a solução de um conjunto de equações não lineares [Brito, 2014]. No caso do grau de liberdade ser maior do que zero, tem-se um problema clássico de otimização, onde uma função objetivo deve ser definida, e geralmente inclui os custos com investimento e operacionais. Os custos de capital aumentam com o número de estágios e com as vazões molares circulando no interior da coluna, enquanto os custos operacionais diminuem até certo ponto [Edgar et al, 2001].

Este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo capaz de representar os fenômenos físicos e o balanço de custo de uma coluna destilação destinada a separar a mistura propano-propileno. Além de analisar o desempenho de várias técnicas de otimização na busca pela razão de refluxo ótima da torres de destilação em estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Separação da mistura propano-propileno

Os métodos convencionais de produção de propeno a partir de uma alimentação composta principalmente de propano usualmente envolvem três etapas:

1. A produção de propileno a partir de uma alimentação de propano através de um craqueamento de hidrocarbonetos;
2. Separação de componentes leves;
3. Separação entre propileno, propano e outros componentes mais pesados.

A etapa 3 consiste em um sistema de destilação de duas colunas. A primeira coluna separa uma porção substancial de propano, produzindo um propileno com pelo menos 90% em volume de pureza e chegando a atingir os 96%, o qual é denominado propileno com grau de química ou refinaria. A segunda coluna aumenta o nível de pureza

para os 99,5% em volume ou mais, para a obtenção do propileno com grau de polímero (Davesac, 2004).

2.2. Mercado do propeno

O mercado de propeno no Brasil e no mundo é comandado pela forte demanda de polipropileno. Esta demanda cresceu nos últimos anos devido ao fato do polipropileno ser uma resina que apresenta grande versatilidade para inúmeras aplicações, tais como:

- Confeções de tubos;
- Conexões para a indústria química;
- Revestimento e fabricação de tanques.

No Brasil, o propeno é produzido em unidades de craqueamento de nafta da Braskem e nas refinarias da Petrobras. Como existe tendência à escassez desse insumo, devido à redução de novos investimentos nestas unidades, estão surgindo novas rotas tecnológicas para produção de propeno, com destaque para desidrogenação de propano (Bain&Company, 2014).

Em 2013, a produção nacional de propeno alcançou cerca de 2,1 milhões de toneladas com demanda efetiva local de 2 milhões de toneladas, como mostra a Figura 1. Tal

demanda cresceu 3,1% ao ano de 2007 a 2013, sendo 2/3 devido à produção de polipropileno (Bain&Company, 2014). A demanda mundial de propeno alcançou cerca de 83 milhões de toneladas em 2013, sendo 55% oriundo das unidades de craqueamento de nafta, 31% de refino e 14% de processos específicos, tais como a desidrogenação (Bain&Company, 2014).

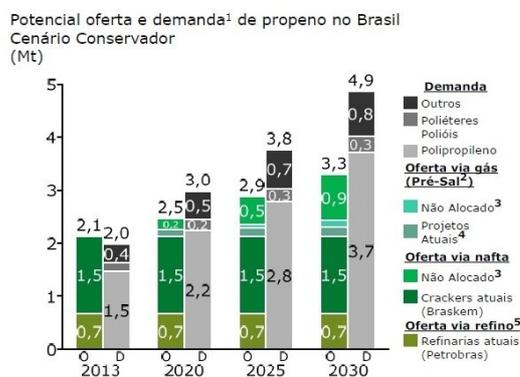


Figura 1 – Demanda e oferta de propeno entre os anos de 2013 e 2030 [Bain&Company, 2014].

2.3. Destilação

A separação dos constituintes, através da destilação, está baseada nas diferenças entre suas volatilidades. Na destilação, a fase vapor entra em contato com a fase líquida, havendo a transferência simultânea de massa do líquido para o vapor e vice-versa (vaporização e condensação, respectivamente). O líquido está no seu ponto de bolha e o vapor no seu ponto de orvalho, ambos em equilíbrio. O efeito final é o aumento da concentração do componente

mais volátil no vapor e do componente menos volátil no líquido [Foust, 1982].

A mistura a ser destilada é introduzida em um dado estágio da coluna, denominado estágio de alimentação. No seu interior, a mistura irá descer até atingir a base da coluna onde estará o refeedor, que consiste em um trocador de calor usado para aquecer (fornecimento de energia) a mistura até seu ponto de ebulição. Esse vapor, então, circula no sentido ascendente, em contracorrente com a mistura de alimentação, conforme mostra a Figura 2 atingindo o topo da coluna, o vapor irá para um condensador, onde será liquefeito e deixará a coluna como destilado. Na base da coluna, a mistura deixa o equipamento como produto residual [Cadore, 2011].

Para melhor separação das frações desejadas, utiliza-se o retorno de parte do destilado na forma de refluxo, o que faz aumentar a concentração do componente leve no topo, consequentemente aumentando a pureza do destilado e mantendo uma vazão descendente de líquido na coluna [Cadore, 2011].



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

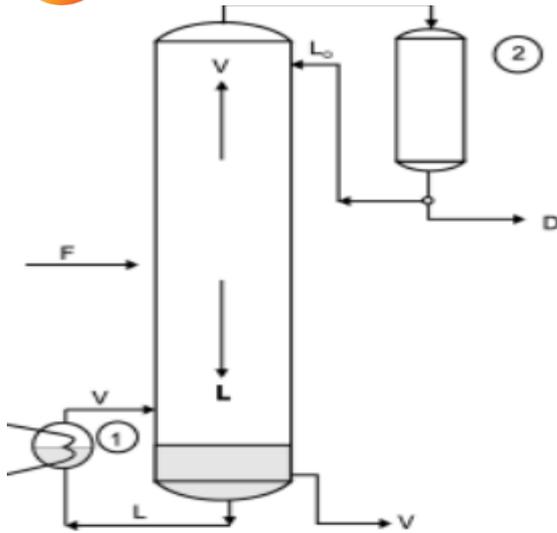


Figura 2-Esquema de uma coluna de destilação fracionada [Roitman, 2002]

2.4. Razão de refluxo e número de estágios

Existe uma relação entre o número de estágios de uma coluna e a razão de refluxo deste equipamento. Podem ser construídas torres com grande número de estágios para operarem com pequena razão de refluxo, assim como torres com pequeno número de bandejas e razões de refluxo elevadas, para um produto com as mesmas características.

Tendo em vista a relação anteriormente apresentada, a condição de razão de refluxo mínimo corresponderá a um número infinito de estágios para que seja atingido um fracionamento desejado, assim como a condição de razão de refluxo total corresponderá uma coluna com um número mínimo de pratos para que o mesmo fracionamento seja atingido. Nenhuma destas

condições possuem um caráter satisfatório, uma vez que uma coluna de destilação com um número infinito de estágio é um projeto economicamente inviável, bem como uma torre que não produz nada, pois como citado anteriormente, uma coluna operando com refluxo total não se tem retirada de produto.

Tendo em vista esses problemas encontrados na literatura, os projetos de colunas de destilação são concebidos prevendo-se uma razão de refluxo com valores que variam entre 1,5 a 2 vezes maior que a razão de refluxo mínima [Roitman, 2002].

2.5. Técnicas de otimização unidimensionais.

Os engenheiros devem sempre projetar equipamentos que desempenhem tarefas de forma eficiente. Ao fazer isso, eles estão restritos pelas limitações dos modelos matemáticos. Além disso, devem manter o custo baixo. Portanto, estão sempre confrontando problemas de otimização que equilibram eficiência e limitações [Chapra, 2006]

Na busca do ponto ótimo de uma função de uma única variável sem restrições existem vários métodos disponíveis. Alguns dos mais utilizados são:

1. Método da Golden section

www.conepetro.com.br

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



2. Interpolação quadrática
3. Método de Newton

O método de busca da seção áurea (Golden section) é um método unimodal que exige que se conheça um intervalo contendo um único ponto ótimo. Tem a vantagem de minimizar o número de cálculos da função e sempre converge. A interpolação quadrática também funciona bem quando implementada como um método intervalar, embora possa ser programada como um método aberto. Ambas, a Golden section e a interpolação quadrática, dispensam o cálculo das derivadas. Assim, os dois métodos são apropriados quando o intervalo pode ser prontamente definido e o cálculo da função é custoso [Chapra, 2006].

O método de Newton é um método aberto que não requer que o ótimo seja delimitado. Pode ser implementado de forma fechada quando a primeira e a segunda derivadas puderem ser determinadas analiticamente. O método de Newton converge rapidamente quando sua estimativa inicial está próxima ao ponto ótimo, e é frequentemente divergente para uma estimativa ruim. A convergência também depende da natureza da função.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

As correlações de Eduljee (1975) envolvem dois parâmetros: R_m , a razão de refluxo mínima, e N_m , o número de estágios mínimo para realizar a separação em refluxo total. Suas equações relacionam outros parâmetros N , α , X_F , X_D e X_B (consultar a lista de símbolos a título de notaçã) todos esses parâmetros possuem valores conhecidos exceto X_B como listado na Tabela 1. Uma vez que a razão de refluxo (R) é especificada, é possível encontrar o valor da fração molar do componente mais leve, propileno, na corrente de base (X_B) através de uma solução sequencial de três equações. São elas:

$$R_m = \frac{1}{(\alpha - 1)} \left[\frac{X_D}{X_F} - \alpha \frac{(1 - X_D)}{(1 - X_F)} \right] \quad (1)$$

Substituindo o valor de R_m na equação 2 é possível encontrar o valor de N_m .

$$\left(\frac{N - N_m}{N + 1} \right) = 0,75 \left[1 - \left(\frac{R - R_m}{R + 1} \right)^{0,5668} \right] \quad (2)$$

Por último, o valor de X_B pode ser calculado através da seguinte equação.

$$m_i = \frac{\ln \left[\frac{X_D / (1 - X_D)}{(1 - X_B) / X_B} \right]}{\ln \alpha} \quad (3)$$



Uma vez que X_B foi calculado, o balanço de massa para a coluna pode ser computado. As equações são:

$$F = D + B \quad (4)$$

$$X_F F = X_D D + X_B B \quad (5)$$

As equações (4) e (5) possuem duas variáveis desconhecidas: D e B, as quais podem ser determinadas uma vez que F , X_F , X_B e X_D são especificadas. Partindo do pressuposto que os fluxos de líquido e vapor são aproximadamente constantes em cada seção da coluna, pode-se assumir que:

$$L = RD \quad (6)$$

$$V = (R+1)D \quad (7)$$

A função de lucro da empresa é dada pelo balanço de venda dos produtos (entrada) e pelos custos de utilidade e matéria-prima (Custo de operação; saída) como segue:

$$f = \text{Vendas de Propileno} + \text{Vendas de Propa} \quad (8)$$

$$f = \left[(C_D X_D D + C_B X_B B) + [C'_D (1 - X_D)] L \right] \quad (9)$$

Os colchetes foram utilizados para mostrar a correspondência entre as palavras da equação (8) e os símbolos da equação (9).

A equação (9) pode ser rearranjada substituindo os termos $X_D D$ e $X_B B$ das vendas de propileno e propano, respectivamente, pela a equação (5). Definindo dois novos parâmetros como a diferença entre os valores de propano nas correntes de base e topo (U) e a diferença entre valores de propileno das correntes de base e topo (W), é possível incluí-los no rearranjo da função objetivo.

$$f = C_D X_F F + C'_B (1 - X_F) F - C_F X_F F \quad (10)$$

Os primeiros quatro termos são valores fixos e podem ser excluídos da função (ver Tabela 1). Assume-se que $Q_R \approx Q_C \approx \lambda V$. Por último, com o objetivo de tornar a função toda positiva, multiplica-se a mesma por (-1). Assim obtêm-se a forma final da função objetivo:

$$f = (C_1 + C_2) \lambda V + W X_B B + U (1 - X_D) \quad (11)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A obtenção da razão de refluxo ótimo para uma coluna de destilação convencional foi realizada através da implementação de três técnicas de otimização (Golden Section, Método de Newton e Interpolação

Quadrática) utilizando o software Matlab. A Figura 3 apresenta uma típica torre de destilação usada na separação de propano e propileno, com uma alimentação contendo 70% de propileno ($X_F = 0,70$) e uma vazão de $F = 12,751 \times 10^6 \text{ Mol/Dia}$. A coluna é composta por 94 estágios destinados a separar a mistura propano-propileno, usando uma alimentação contendo 70% de propileno (X_F) com uma vazão de $12,751 \times 10^6 \text{ Mol/Dia}$ (F). A corrente de alimentação é dividida em duas correntes na saída da coluna: a corrente de topo (D), na qual sai o propileno purificado e a corrente de base (B), a qual transporta o propano.

A coluna de destilação convencional tem como finalidade produzir um propileno, como produto de topo, numa composição molar de, no mínimo, 95 %. A volatilidade relativa entre os dois componentes é igual a 1,105. A Tabela 1 apresenta as condições operacionais da coluna de destilação em questão e foram baseadas de acordo com o que Edgar et al (2001) sugerem.

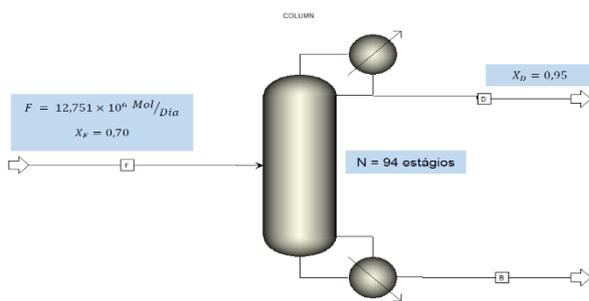


Figura 3 – Coluna de destilação usada na separação entre propano-propileno.

Tabela 1 – Condições de operações da coluna no processo de separação da mistura propano-propileno.

Símbolos	Unidades	Valores
C_1	(\$/Btu)	3×10^{-6}
C_2	(\$/Btu)	0×10^{-6}
F	(Mol/Dia)	$12,751 \times 10^6$
N	-	94
N_m	-	Função da razão de refluxo (R)
Q_C	-	λV
Q_R	-	λV
R	-	Será otimizado
R_m	-	11,17
U	(\$/Mol)	$-7,774 \times 10^{-3}$
V	(Mol/Dia)	Função da razão de refluxo
W	(\$/Mol)	0,0102
X_B	-	Será otimizado
X_D	-	0,95
X_F	-	0,70
α	-	1,105
λ	(Btu/Mol)	12,23

O fluxograma a seguir, ilustra a comunicação entre os arquivos do software Matlab® para a obtenção da razão de refluxo ótimo e a minimização dos custos operacionais da coluna estudada neste trabalho. O fluxograma é representativo para todas as técnicas de otimização utilizadas, pois o modelo matemático utilizado e os parâmetros são comuns para todos os

métodos. Os métodos foram inseridos na Figura 4 na caixa de processamento “Solver: Técnicas de Otimização”.

resultados estão de acordo com o sugerido em instalações industriais [Roitman, 2002].

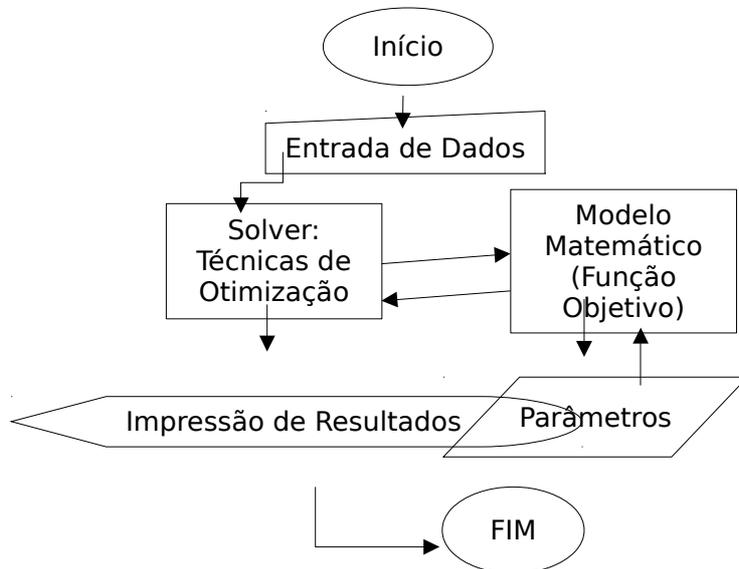


Figura 4 – Fluxograma de comunicação entre os arquivos no software Matlab®

5.RESULTADOS

Utilizando as condições de operação da coluna apresentadas na Tabela 1, a implementação das técnicas de otimização foi realizada e os resultados obtidos para a otimização da função “custo” encontram-se na Tabela 2.

O valor obtido da razão de refluxo ótimo para os métodos da Golden section e Newton ($R=17,043$) é 1,52 vezes maior que a razão de refluxo mínima ($R_M=11,17$). Já para o método da interpolação quadrática a razão de refluxo ótima (17,206) é 1,54 vezes maior que a razão de refluxo mínima. Estes

Tabela 2 – Resultados obtidos na otimização no processo de separação da mistura propano-propileno.

Descrição	Golden Section	Newton	Interpolação Quadrática
Razão de refluxo ótima(R)	17,043	17,043	17,206
Custo ótimo	3988,1	3988,1	3989,9
Concentração molar na corrente de base (XB)	0,041	0,041	0,039
Número mínimo de estágios (N _M)	61,166	61,166	61,552
Número de iterações	51	5	46

Dentre as técnicas de otimização unidimensionais implementadas, o método de Newton apresentou o melhor desempenho para a otimização desta coluna. Isso porque alcançou o mesmo resultado encontrado pela Golden section. No entanto, teve um menor esforço computacional para convergir para o valor ótimo.

O método da Golden section assim como a interpolação quadrática apresenta a vantagem de sempre convergir para o valor ótimo independente da estimativa inicial do intervalo que contenha o ótimo. Diferentemente, o método de Newton apresenta um problema de convergência

quando a estimativa fornecida pelo usuário é distante do valor desejado, como é possível observar pela Figura 5.

```

---Otimização no processo de separação da mistura propano-propileno---
Entre com a estimativa inicial da taxa de refluxo = 60
-----
Taxa de Refluxo ótima =      -Inf
Custo Ótimo =              NaN
Números de Iterações =      4
Concentração Molar na Corrente de Base (XB) =      NaN
Número Mínimo de Estágios (Nm) =      NaN
-----
Análise de Sensibilidade - Variância de mais ou menos 10%
-----
Sensibilidade_Newton =
-Inf  NaN  NaN
-Inf  NaN  NaN
-Inf  NaN  NaN
  
```

Figura 5– Problema apresentado pelo método de Newton-Raphson para uma estimativa ruim

Uma análise de sensibilidade foi realizada sobre a razão de refluxo com o objetivo de avaliar o grau de confiabilidade dos resultados obtidos. A função dessa análise é identificar se a modificação de algum critério é suficiente para modificar os resultados.

Para a construção da tabela de análise de sensibilidade tomou-se os resultados encontrados pelo método de Newton. Foi aplicado um desvio padrão de mais ou menos 10% do valor ótimo da razão de refluxo obtido pelo método e avaliou-se sua influência sob a fração molar de propileno na corrente de base e o custo operacional da coluna. É possível observar nos resultados

apresentados na Tabela 3, que esta técnica de otimização apresenta um bom grau de confiabilidade nos resultados obtidos, pois o resultado ótimo da razão de refluxo encontrado pelo método consegue atingir um valor mínimo de custo e ficar dentro das especificações determinada pelo problema estudado.

Tabela 3 – Análise de sensibilidade.

Razão de refluxo (R)	Fração molar na corrente de base (X_B)	Custo (\$/Dia)
15,339	0,063	4277,2
17,043	0,041	3988,1
18,748	0,029	4141,7

5.1. Variação da razão de refluxo

A seguir, são apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8, a influência da razão de refluxo no comportamento da função “custo”, da carga térmica do reboiler e na fração molar do propileno, respectivamente. Os três gráficos obtidos a partir dos resultados apresentaram o mesmo comportamento para as três técnicas de otimização unidimensional (Golden section, método de Newton e interpolação quadrática).

A Figura 6 mostra que a função custo decresce até que seja alcançada a razão de refluxo ótima. A partir deste ponto, a função custo inverte a tendência decrescente e volta a crescer. Isto ocorre porque o aumento na razão de refluxo implica em maiores vazões molares no interior da torre de destilação, impactando diretamente no requerimento de energia necessária ao reboiler.

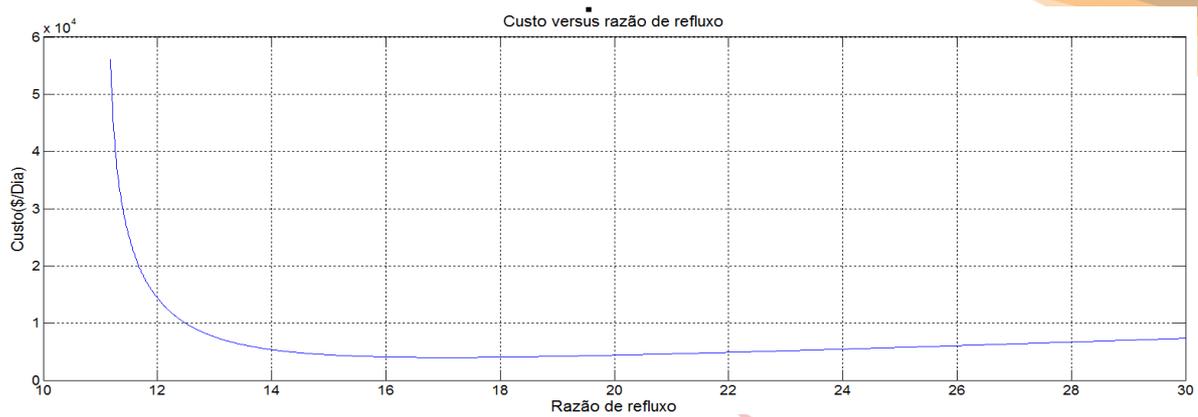
Conforme se observa na Figura 7, quanto maior for a razão de refluxo, maior será a carga térmica do refeedor. Ao aumentar a razão de refluxo, uma maior quantidade de material circula no interior da coluna e, conseqüentemente, tem que haver um acréscimo na quantidade de energia, na forma de calor através do refeedor, para que o produto desejado não saia das especificações previamente estabelecidas.

Já em relação à fração molar de propileno na corrente de base, a partir de um certo valor, o comportamento da curva torna-se praticamente constante, como mostra a Figura 8. A partir do valor de $R=17,043$, nada justificaria aumentar a razão de refluxo, já que as especificações do problema foram alcançadas.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



www.conepetro.com.br

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

Figura 6 – Comportamento do custo diário em função da razão de refluxo

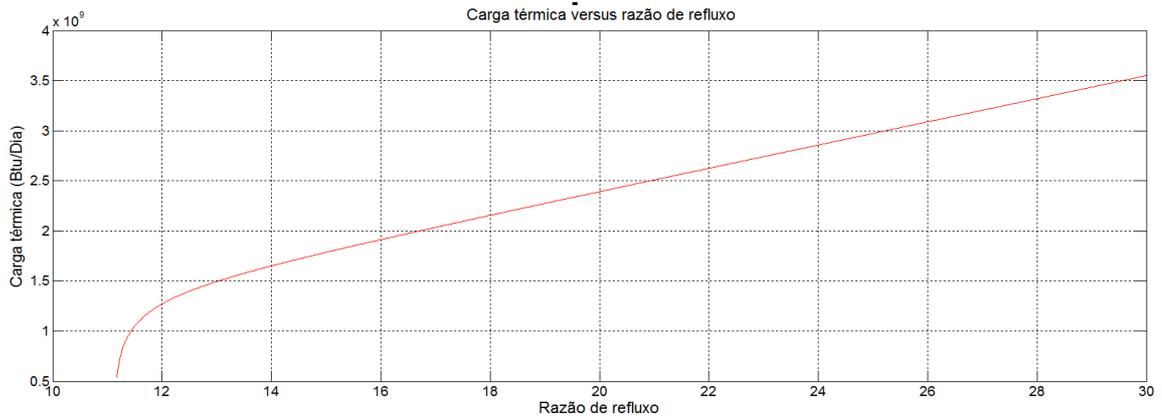


Figura 7 – Comportamento da carga térmica em função da razão de refluxo.

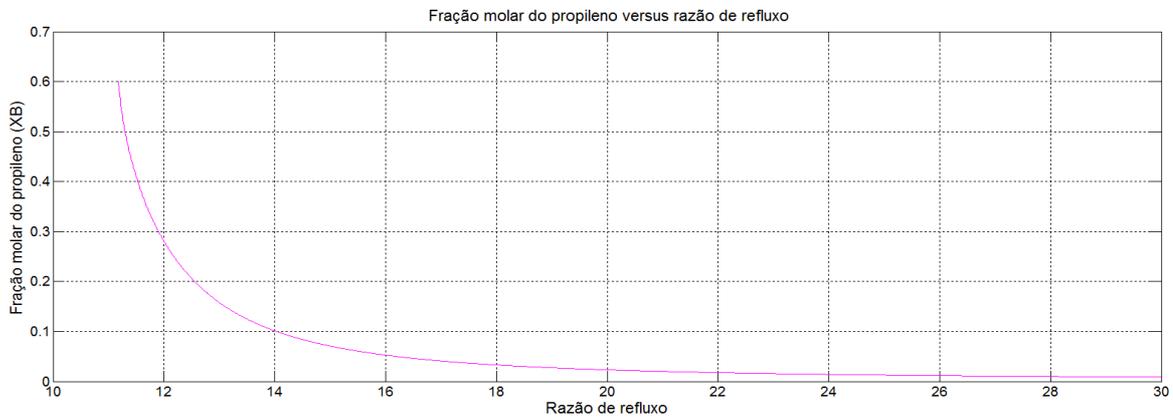


Figura 8 – Comportamento da fração molar do propileno em função da razão de refluxo.

6. CONCLUSÃO

As técnicas de otimização unidimensionais (Golden section, Método de Newton e Interpolação Quadrática) implementadas no software Matlab® foram capazes de obter o custo mínimo de utilidades de uma coluna de destilação destinada a separar a mistura propano-propeno e sua razão de refluxo ótima em regime estacionário.

Para este problema de otimização, o método da Golden section e o método de Newton mostraram-se mais eficientes, apresentando melhores resultados, quando comparados com a interpolação quadrática. O método da Golden section e o método de Newton apresentaram os mesmos resultados finais. Em casos de boas estimativas iniciais, o método de Newton mostrou uma maior eficiência pelo fato de convergir rapidamente para o mínimo da função e exigir um menor esforço computacional. No entanto, foi

possível observar que o método pode divergir, isso ocorre quando a solução inicial não é suficientemente próxima da solução ótima. Nestas situações, o método da Golden section torna-se mais eficaz, já que sempre converge para o valor ótimo da função objetivo.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIN & COMPANY. *Potencial de Diversificação da Indústria Química Brasileira*. Relatório 6 – Matéria-Prima Petroquímica. Rio de Janeiro, 2014.

BRITO, K. D. *Efeito do Teor de Solvente sobre o Custo Anual Total, Consumo Específico de Energia e Eficiência Termodinâmica na Obtenção de Etanol Anidro via Destilação Extrativa: Configurações Convencionais e Termicamente Acopladas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.

CABALLERO, J. A., GROSSMANN I.E.- *Optimization of Distillation Processes*, 2012.

CADORE, I. R – *Eficiência de Torres de Destilação*, 2011.

CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. – *Métodos Numéricos para Engenharia*, 5ª Edição, 2006.

DAVESAC, R. R. – *Separação Propano-Propileno e Reatores Adsorptivos com Modulação da Pressão*, 2004.

EDGAR, H. F., HIMMELBLAU, D. M., LADSON, L. S. – *Optimization of Chemical Processes*, 2ª Edição, 2001.

EDULJEE, H. E. – *Equations Replace Gilliland plot*.HydrocarbonProcess, 120-124, 1975.

FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. *Princípios das Operações Unitárias*. 2ª. Edição, Guanabara Dois, 1982.

ROITMAN, V. – *Curso de Formação de Operadores de Refinaria: Operações Unitárias*.Petrobras – Unicenp, Curitiba. 2002.