

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/306291132>

Um modelo integrado de simulação e otimização para o planejamento de refinarias incluindo cargas externas e avaliação de produtos

Conference Paper · September 2016

CITATIONS

0

READS

247

3 authors, including:



Leonardo Sales

Norwegian University of Science and Technology

23 PUBLICATIONS 48 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Bruno Prata

Universidade Federal do Ceará

127 PUBLICATIONS 534 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Optimization Techniques Applied to Earthmoving [View project](#)



A Hybrid Genetic Algorithm for solving the Unrelated Parallel Machine Scheduling problem with Sequence Dependent Setup Times [View project](#)



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

UM MODELO INTEGRADO DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE REFINARIAS INCLUINDO CARGAS EXTERNAS E AVALIAÇÃO DE PRODUTOS

L. de P. A. SALES¹, F. M. T. de LUNA² e B. de A. PRATA³

¹ Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Logística e Redes de Infraestrutura

² Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Química

³ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Produção

E-mail para contato: leonardosaes@alu.ufc.br

RESUMO – *Na atual conjuntura, dado o ambiente de incerteza na indústria do petróleo a nível mundial, existe uma crescente preocupação com o planejamento operacional das refinarias. Embora existam modelos para o planejamento operacional de refinarias, eles são bastante delimitados em sua utilização, pois abrangem poucos cenários de operação. Este estudo descreve uma abordagem integrada envolvendo a simulação de unidades e a otimização do blending a fim de maximizar o lucro obtido. Um estudo de caso com base na Refinaria de Paulínia é apresentado. Na abordagem proposta são estudadas as cargas externas, a adição de produtos e a avaliação do preço dos produtos. O ótimo global da otimização foi obtido em todos os cenários analisados. Também foram obtidos os pontos de equilíbrio para cargas externas e novos produtos, bem como novas perspectivas acerca do volume produzido de vários produtos. A flexibilidade do modelo aliada com a sua rápida obtenção de soluções são destaques da abordagem proposta.*

1. INTRODUÇÃO

Uma refinaria consiste de diversos processos que dividem, misturam e reagem centenas de tipos de hidrocarbonetos, compostos inorgânicos e metálicos, com o objetivo de obter produtos comerciais. Em uma refinaria, as características requeridas de um produto são fixadas. No entanto, o óleo cru possui características que dependem de sua origem. Então, se as características do petróleo variam e as características do produto são fixas, as refinarias precisam adaptar suas configurações operacionais.

Em adição, uma refinaria sofre com as variações no preço do petróleo, restrições ambientais mais rígidas e com a pressão dos consumidores na diminuição dos preços, trabalhando assim com pequenas margens de lucro. É vital para uma refinaria operar o mais próximo possível de seu ótimo e além disso buscar oportunidades de acréscimo nos lucros. Entretanto, sem a utilização de modelos computacionais, uma produção ótima que maximiza o lucro é difícil de obter. Estas são as razões para praticamente todas as refinarias utilizarem ferramentas avançadas de processo para ampliar os resultados financeiros atualmente (Moro, 2003).

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO





XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

Diversos trabalhos apresentam modelos e algoritmos para solucionar problemas específicos de uma refinaria, como o *blending* de gasolina, o planejamento e o *scheduling* da refinaria (Bodington e Baker, 1990; Lang *et al.*, 1991; Pinto e Moro, 2000; Shorbys e White, 2002; Moro e Pinto, 2004; Pinto *et al.*, 2004; Koo *et al.*, 2008; Pitty *et al.*, 2008; More *et al.*, 2010; Gueddar e Dua, 2011; Menezes *et al.*, 2013).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo para o planejamento de refinarias considerando unidades de destilação (UDT), unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC), unidades de hidrotreatamento (HDT), e unidades de coqueamento retardado (UCR).

Bueno (2003) recomendou estudos considerando a adição de cargas externas pela importância de uma macro visão da estrutura de refino. Neste trabalho é proposto um modelo que permite a utilização de cargas externas intermediárias para o *blending* na refinaria, permitindo um estudo mais realístico. Comparando os resultados com intermediários similares, pode-se analisar como as propriedades dos intermediários podem influenciar os custos de aquisição.

Através do decréscimo ou acréscimo do volume produzido de um produto, a análise pode mostrar gargalos operacionais na capacidade ou a presença de produtos indesejados, permitindo ao planejador descobrir novos problemas e melhorias. Analisando a possibilidade de adição de novos produtos, é possível permitir o acesso da refinaria a mercados mais lucrativos. Este trabalho propõe um estudo mais profundo no assunto comparando vários novos produtos, e classificando-os pela sua lucratividade.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Uma refinaria típica realiza diversos processos físico-químicos a fim de obter os produtos requeridos. Nós podemos descrever o modelo de planejamento de uma refinaria assumindo a existência de várias unidades de processo, produzindo uma variedade de correntes intermediárias com diferentes propriedades que podem ser misturadas para constituir os produtos desejados. Um esquema geral de uma refinaria é ilustrado na Figura 1. As n unidades de destilação recebem o óleo, destilando-o em vários intermediários que irão possivelmente receber uma carga de origem externa e/ou ser transformada em outros intermediários através das m unidades de processo. Os intermediários irão ser misturados nas k unidades de *blending* disponíveis, deixando a refinaria como um dos w produtos especificados. A relação entre entradas e saídas, além dos custos operacionais e intermediários, leva ao lucro da refinaria.

Usualmente em uma refinaria, tanto a aquisição dos petróleos quanto a venda dos produtos são predefinidas pela organização. Portanto, um volume de venda máximo e mínimo de cada produto e o volume de óleo adquirido são usualmente predefinidos a fim de atender as expectativas da organização (Bueno, 2003). As refinarias devem avaliar a possibilidade deste planejamento, e no caso de adversidades (falta de suprimentos, equipamentos quebrados, etc.), ele deve corresponder à nova realidade. O volume de cada petróleo adquirido é a informação mais importante, já que irá afetar todo o sistema de refino.

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO



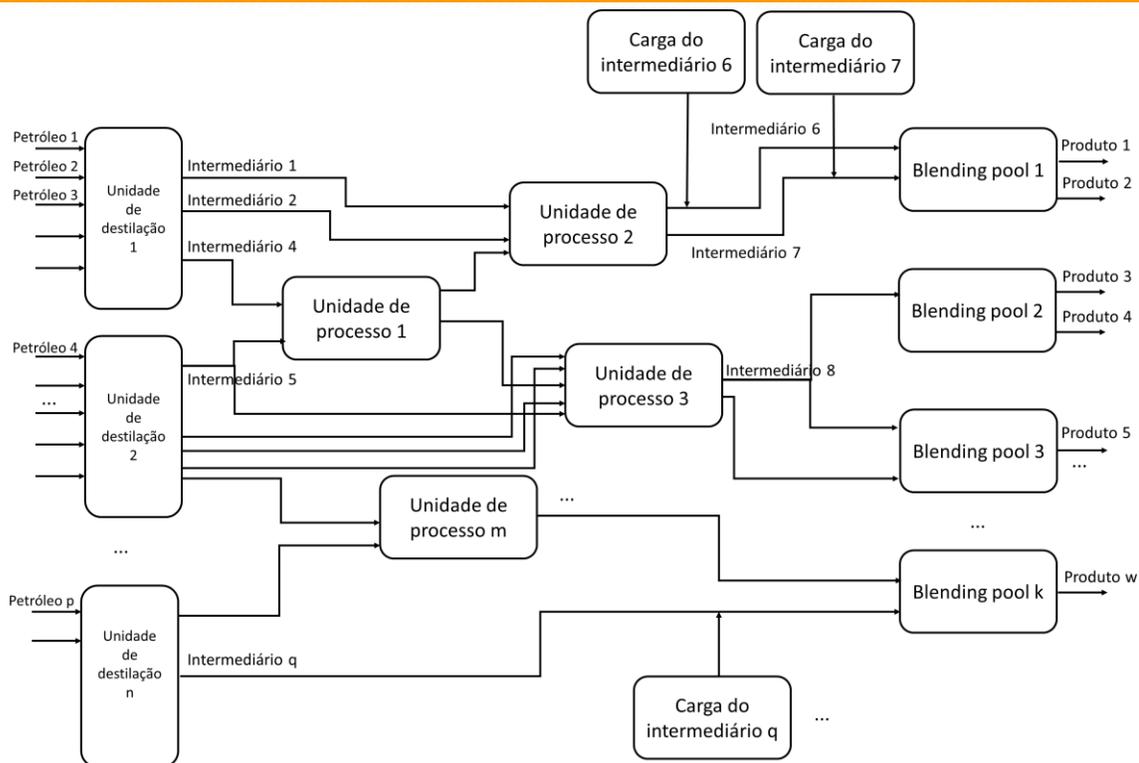


Figura 1 – Esquema geral de uma refinaria

Todas as unidades de destilação e de processo têm uma carga máxima e mínima requerida. Elas também possuem custos operacionais, o que é uma função do volume processado. Além disso, possuem atributos que determinam as quantidades e qualidades dos produtos intermediários gerados pela unidade. Há também um inventário, o qual armazena os intermediários não misturados, seja por propósitos econômicos ou por restrições de produto.

3. ESTUDO DE CASO

A Refinaria do Planalto (REPLAN) é uma das maiores refinarias do Brasil. A refinaria pertence a PETROBRAS, e é localizada em Paulínia, São Paulo. A refinaria possui duas unidades de destilação, duas unidades de destilação à vácuo, duas unidades de FCC, uma unidade de coqueamento retardado e uma unidade de hidrotreatamento catalítico. Dado que as unidades de destilação atmosférica, destilação a vácuo, e as duas unidades de FCC são muito similares, elas foram consideradas respectivamente como uma só. Tal consideração simplifica o modelo sem uma perda significativa de sua verossimilhança com a representação do problema real.

As unidades de processos trabalham em diferentes campanhas, dependendo dos petróleos recebidos e os produtos desejados. A REPLAN opera suas unidades de destilação nas seguintes campanhas: ATE (alto teor de enxofre), a qual separa intermediários com alto teor de enxofre; Asfalto, a qual separa resíduo de vácuo para a produção de asfalto; RATCRAQ, a qual separa resíduo atmosférico craqueável; e NORMAL, a qual não separa por nenhuma característica do

intermediário. Já que nenhum petróleo selecionado para este estudo possui alto teor de enxofre, e como a produção de asfalto não é analisada neste estudo de caso, ambas campanhas ATE e Asfalto não foram consideradas.

Para o modelo, foram selecionados os petróleos costumeiramente mais adquiridos e os produtos mais vendidos. Similar a Bueno (2003), Pitty *et al.* (2008) e Koo *et al.* (2008), neste trabalho é proposto uma abordagem integrada, a qual é composta de um modelo de simulação-otimização e interfaces gráficas, as quais serão explicadas em breve. Abordagens *what-if* são também utilizadas, permitindo analisar qual seria o resultado otimizado para os valores pré-definidos.

É desenvolvido um modelo no qual os dados são importados e exportados utilizando uma interface gráfica e amigável ao usuário. Este desenvolvimento prova ser de muita importância para otimizar o planejamento e *scheduling* por avaliar questões de qualidade, além de regras e restrições operacionais de uma forma direta (Joly, 2012). Através da interface do Microsoft Excel, os dados necessários para solucionar o modelo são inseridos. Os dados são combinados ao modelo matemático, e então o *solver* encontra as soluções ótimas. Estas soluções ótimas são exportadas ao Excel e são traduzidas em informações, permitindo a análise pelos profissionais da indústria tomadores de decisão.

O modelo foi solucionado com o *software* LINGO 15.0, utilizando o *Global Solver*. O *solver* obteve o ótimo global em cada caso estudado, assegurando a precisão nos resultados do planejamento da refinaria. O tempo computacional requerido em cada teste foi menor que 1 segundo em um processador Intel i5-2410M, 8 GB RAM, utilizando Windows 7. O pequeno tempo computacional garante a utilidade do modelo no planejamento de refinarias, e é também importante para abordagens *what-if*. Na Tabela 1 são apresentados os testes realizados, o número de iterações requeridas pelo *solver*, o número de variáveis existentes e o tempo computacional requerido. Com o aumento de variáveis no modelo, aumenta-se o número de iterações, consequentemente aumentando o tempo computacional. Deve-se observar que todas as variáveis de decisão do modelo são contínuas.

Tabela 1 – Tempo computacional de diversas execuções

Teste realizado	No. iterações	Variáveis	Tempo computacional
Modelo da Bueno (2003)	105	174	0,20 s
Teste na Nafta Leve	143	172	0,50 s
Teste do GLP	105	172	0,25 s
Teste do Querosene de Aviação	104	172	0,23 s
Teste da Gasolina	238	172	0,30 s
Teste da Nafta Petroquímica	252	172	0,28 s
Teste do Óleo Combustível	254	172	0,31 s
Teste do Óleo Combustível 9B	411	180	0,50 s
Teste do Óleo Combustível 5B	455	180	0,53 s
Teste do Óleo Combustível 3B	482	180	0,53 s

Algumas cargas externas foram estudadas a fim de analisar se eram economicamente viáveis. Três cargas externas foram estudadas, como apresentado na Tabela 2: Nafta Leve, GLP, e Querosene de Aviação. Cada carga foi introduzida isoladamente, com diferentes volumes e propriedades.

Nas primeiras duas possibilidades de inclusão de nafta leve, é possível ver que o ponto de equilíbrio varia de acordo com o volume transferido. Podemos inferir das três próximas possibilidades que o ponto de equilíbrio independe da octanagem, sendo necessário grandes quantidades do corte para alterá-lo. Nas duas últimas possibilidades, o ponto de equilíbrio varia de acordo com o teor de enxofre, já que as restrições para a propriedade são muito limitadas para os produtos que usam este corte, e.g. diesel. O preço do GLP é 127,8 dólares/m³. Dado que o GLP não é convertido em reações químicas nem é misturado com outros intermediários, seu ponto de equilíbrio é idêntico ao custo de aquisição. O querosene apresenta um ponto de equilíbrio similar à mesma quantidade de nafta leve. Podemos inferir então que ambos intermediários são equivalentes do ponto de vista econômico, permitindo assim uma flexibilidade na aquisição de intermediários para a refinaria.

Tabela 2 – Comportamento das cargas externas

Corrente	Volume externo adicionado (1000 m ³ /mês)	Teor de enxofre	Octanagem	Ponto de equilíbrio (dólares/ m ³)
Nafta Leve	200	0,01%	90	152,0
Nafta Leve	100	0,01%	90	162,2
Nafta Leve	100	0,01%	120	162,2
Nafta Leve	100	0,01%	40	162,2
Nafta Leve	100	1,00%	90	140,0
GLP	0	0,00%	0	127,8
Querosene de aviação	100	0,09%	0	162,4

Há uma escassez de estudos sobre os efeitos dos volumes produzidos em uma refinaria. Uma abordagem *what-if* pode ser utilizada pelos planejadores a fim de estudar o comportamento do lucro variando o volume produzido de um produto específico, assim determinando qual(is) produto(s) devem ser mais ou menos produzidos a fim de aumentar a lucratividade total da refinaria. Três produtos foram analisados: gasolina, nafta petroquímica, e óleo combustível tipo exportação, variando o volume produzido em um intervalo. A variação do lucro versus o volume produzido de gasolina é apresentada na Figura 2. A gasolina apresentou uma grande estabilidade nos lucros para pequenas variações de produção apresentando um ótimo de 296.000 m³/mês.

A variação nos lucros versus o volume produzido de nafta petroquímica é apresentada na Figura 3. Através do padrão linear da nafta petroquímica, podemos inferir que uma redução na sua produção sempre iria beneficiar os lucros da refinaria. O lucro adicional poderia alcançar 3.500 dólares/mês no caso de interromper completamente a produção do produto. Este gráfico informa ao planejador que a produção de nafta petroquímica deve ser evitada.

A variação nos lucros versus o volume produzido de óleo combustível exportação é apresentada na Figura 4, possuindo um ótimo local que alcança um lucro adicional de 1.650 dólares/mês. Não obstante, há um grande intervalo de produção disponível para aumentar os lucros. A curva é mais inclinada que a da gasolina: uma redução de meros 5.000 m³/mês aumenta o lucro da refinaria em aproximadamente 670 dólares/mês. O planejador deve prestar atenção a este comportamento, já que uma pequena variação pode influenciar diretamente nos lucros.

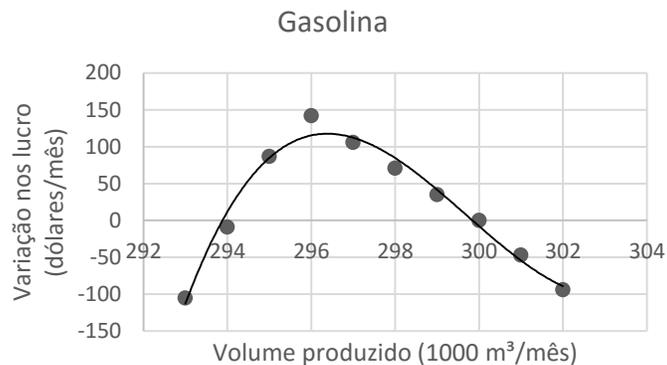
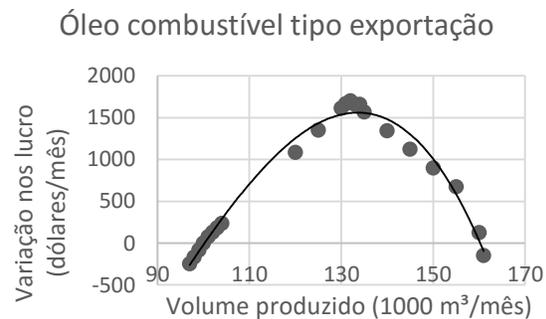
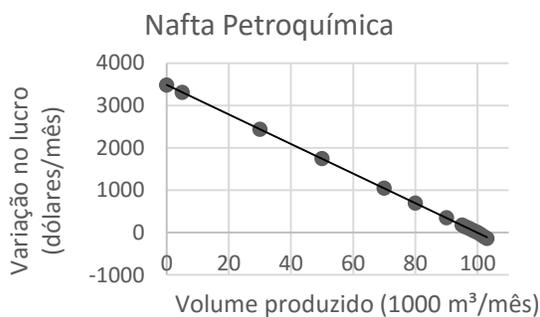


Figura 2 – Variação do lucro para diferentes volumes de gasolina produzidos.



Figuras 3 e 4 – Variação do lucro para diferentes volumes de nafta petroquímica e óleo combustível produzidos, respectivamente.

Neste trabalho, são propostos métodos para uma rápida avaliação da viabilidade econômica de adição de novos produtos no planejamento da refinaria. Para exemplificar uma situação possível, simulamos a adição de um novo tipo de óleo combustível. De acordo com as leis brasileiras, o óleo combustível possui 18 variações, segmentadas em viscosidade e teor de enxofre. Os produtos escolhidos para estudo foram os óleos combustíveis 3B, 5B e 9B. Eles possuem baixo teor de enxofre (1,00% máximo) e apresentam baixa, média e alta viscosidade, respectivamente. As análises foram realizadas adicionando uma batelada de 100.000 m³/mês e definindo um preço inicial para o novo produto. Solucionou-se o modelo várias vezes, variando o preço até que o lucro se igualasse ao lucro inicial. Dessa forma, encontrou-se o ponto de equilíbrio.

Os resultados estão apresentados na Tabela 3. Com base no exposto, pode-se inferir que, como os óleos combustíveis 5B e 9B possuem o mesmo ponto de equilíbrio, ambos possuem a mesma lucratividade para esta mesma quantidade produzida. O óleo combustível 3B apresenta a máxima viscosidade possível, já que poucas quantidades de intermediários de baixa viscosidade são recebidas no *blending* deste produto. Como a refinaria precisa suprir uma quantidade considerável (100.000 m³/mês) deste produto, realocam-se as frações de outros produtos mais leves e mais lucrativos, aumentando o ponto de equilíbrio. Não há limitações de produção por teor de enxofre em nenhum dos casos. O óleo combustível 9B se aproxima do limite superior do teor de enxofre porque os principais intermediários que adicionam viscosidade, como o resíduo de vácuo, também possuem alto teor de enxofre.

Tabela 3 – Adição de diferentes tipos de óleo combustível

Adição de óleo combustível (OC) 3B				Adição de óleo combustível (OC) 5B				Adição de óleo combustível (OC) 9B			
Teor de enxofre				Teor de enxofre				Teor de enxofre			
	Limite inferior	Real	Limite superior		Limite inferior	Real	Limite superior		Limite inferior	Real	Limite superior
OC tipo exportação	-	0,66%	2,00%	OC tipo exportação	-	0,64%	2,00%	OC tipo exportação	-	0,57%	2,00%
OC 2A	-	0,76%	5,50%	OC 2A	-	0,76%	5,50%	OC 2A	-	0,71%	5,50%
OC 9A	-	0,99%	5,50%	OC 9A	-	0,98%	5,50%	OC 9A	-	0,98%	5,50%
OC 3B	-	0,79%	1,00%	OC 5B	-	0,87%	1,00%	OC 9B	-	0,98%	1,00%
Índice de viscosidade				Índice de viscosidade				Índice de viscosidade			
	Limite inferior	Real	Limite superior		Limite inferior	Real	Limite superior		Limite inferior	Real	Limite superior
OC tipo exportação	0,38	0,452	0,452	OC tipo exportação	0,38	0,447	0,452	OC tipo exportação	0,38	0,386	0,452
OC 2A	0,49	0,530	0,53	OC 2A	0,49	0,520	0,53	OC 2A	0,49	0,500	0,53
OC 9A	0,674	0,688	0,688	OC 9A	0,674	0,681	0,688	OC 9A	0,674	0,682	0,688
OC 3B	0,53	0,553	0,553	OC 5B	0,592	0,610	0,618	OC 9B	0,674	0,684	0,688
Ponto de equilíbrio (dólares/m ³)		42,89		Ponto de equilíbrio (dólares/m ³)		34,29		Ponto de equilíbrio (dólares/m ³)		34,29	

4. CONCLUSÕES

Um ótimo global foi alcançado em todos os casos estudados, assegurando precisão nos resultados do planejamento da refinaria. O modelo apresentou um tempo de solução rápido, o qual é muito importante para as abordagens *what-if* aqui propostas, além de permitir mais agilidade ao tomador de decisão. A adição de cargas externas na refinaria deve ser considerada a fim de assegurar bons resultados. Uma abordagem *what-if* obteve o ponto de equilíbrio de diversos intermediários que poderiam ser transferidos à refinaria, indicando novas possibilidades e perspectivas na produção. A adição de intermediários, importante para a descoberta de novos



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

mercados, não afeta profundamente com o esquema da refinaria, adicionando assim flexibilidade, uma importante característica no mercado instável da indústria petrolífera. Uma abordagem *what-if* obteve o ponto de equilíbrio de vários produtos novos que poderiam ser produzidos na refinaria, além de informar como os outros produtos seriam influenciados. Estas análises podem ser rapidamente e facilmente aplicadas em refinarias por planejadores, com significantes vantagens sobre modelos mais simples.

REFERÊNCIAS

- Bodington, C. E.; Baker, T. E. A history of mathematical programming in the petroleum industry. *Interfaces*, v. 20, n. 4, p. 117-127, 1990.
- Bueno, C. Planejamento operacional de refinarias. Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.
- Gueddar, T.; Dua, V. Disaggregation-aggregation based model reduction for refinery-wide optimization. *Comput. Chem. Eng.*, v. 35, p. 1838-1856, 2011.
- Koo, Y.L.; Adhitya, A.; Srinivasan, R.; Karimim, I.A. Decision support for integrated refinery supply chains: Part 2. Design and operation. *Comput. Chem. Eng.*, v. 32, p. 2787-2780, 2008.
- Lang, P.; Szalpas, G.; Chikany, G.; Keminy, S. Modelling of a crude distillation column. *Comput. Chem. Eng.*, v. 15, n. 2, p. 133-139, 1991.
- Menezes, B.C.; Kelly, J.D.; Grossmann, I.E. Integration of nonlinear crude distillation unit models in refinery planning optimization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 52, p. 18324-18333, 2013.
- More, R.K.; Bulasara, V.K.; Uppaluri, R.; Banjara, V.K. Optimization of crude distillation system using aspen plus: effect of binary feed selection on grass-root design. *Chem. Eng. Res. Des.*, v. 88, p. 121-134, 2010.
- Moro, L. F. L. Process technology in the petroleum refining industry – current situation and future trends. *Comput. Chem. Eng.*, v. 27, p. 1303-1305, 2003.
- Moro, L. F. L.; Pinto, J. M. Mixed-integer programming approach for short-term crude oil scheduling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 43, p. 85-94, 2004.
- Pinto, J.M.; Joly, M.; Moro, L.F.L Planning and scheduling models for refinery operations. *Comput. Chem. Eng.*, v. 24, p. 2259-2276, 2004.
- Pinto, J.M.; Moro, L.F. L. A planning model for petroleum refineries. *Braz. J. Chem. Eng.*, v. 17, p. 575-586, 2000.
- Pitty, S.S.; Li, W.; Adhitya, A.; Srinivasan, R.; Karimim, I.A. Decision support for integrated refinery supply chains: Part 1. Dynamic simulation. *Comput. Chem. Eng.*, v. 32, p. 2767-2786, 2008.

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO

