



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

OTIMIZAÇÃO COM INCERTEZA APLICADA A PROBLEMAS DA PRODUÇÃO DE DERIVADOS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Luiz Carlos Felizari¹, Ricardo Lüders²

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR/CPGEI
Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba/PR, Brasil, 80230-901 Fone: (41) 310-4701
felizari@cpgei.cefetpr.br

² Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR/CPGEI
Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba/PR, Brasil, 80230-901 Fone: (41) 310-4688
luders@dainf.cefetpr.br

Resumo – Neste trabalho é proposto uma metodologia que utiliza técnicas de programação matemática juntamente com a teoria de otimização *fuzzy* aplicada ao estudo de problemas da produção existentes numa refinaria de petróleo. Foram desenvolvidos modelos em programação linear (LP) e programação linear inteira mista (MILP), considerando aspectos de compartilhamento de recursos e incertezas nos parâmetros de entrada. A proposta é avaliada através de cenários típicos envolvendo a mistura de produtos e o escalonamento de operações de transferência e estocagem. Como principais resultados, para o sistema de mistura de produtos foi obtida uma nova proporção de componentes intermediários constituintes do produto final, partindo-se de uma mistura de custo reduzido. Já os modelos de escalonamento demonstraram potencial satisfatório na programação de tarefas, considerando-se o gerenciamento de recursos escassos e o tempo de atraso das operações. Na implementação e resolução dos modelos foi utilizado um solver comercial.

Palavras-Chave: Mistura de Produtos, Escalonamento, Refinaria, Otimização *Fuzzy*, Programação Linear Inteira Mista (MILP).

Abstract – This paper proposes a methodology using techniques of mathematical programming and fuzzy optimization in the study of production problems in a petroleum refinery. Models in linear programming (LP) and mixed integer linear programming (MILP) are developed under aspects of resource sharing and uncertainty in input parameters. The approach is evaluated through typical sceneries of blending and scheduling operations of transfer and storage of products. The blending system presented a new composition for the final product, taking in account a reduced cost. The scheduling models showed satisfactory potential in programming of tasks under resource constraints and possibly time delay of the operations. A commercial solver is used for implementation and models solution.

Keywords: Blending, Scheduling, Refinery, Fuzzy Optimization, Mixed Integer Linear Programming (MILP).

1. Introdução

Este trabalho visa propor uma metodologia que utiliza técnicas de programação matemática juntamente com a teoria de otimização *fuzzy* aplicada ao estudo de problemas da produção existentes numa refinaria de petróleo. Um dos estudos refere-se a um sistema de *blending* presente na indústria petroquímica. Uma flexibilização na densidade e viscosidade do óleo MF-180 é resultado das diferentes campanhas de produtos dentro da refinaria, representando o risco de infringir as restrições da mistura. Como principal resultado, foi obtida uma nova proporção de componentes intermediários constituintes do produto final, partindo-se de uma mistura de custo reduzido.

Outro problema tratado é o escalonamento de operações de transferência e estocagem. Pretende-se considerar possíveis atrasos no tempo de execução destas operações através de técnicas de otimização *fuzzy*. O objetivo é contemplar características de flexibilidade nas restrições, geralmente não encontradas nos modelos tradicionais. O resultado esperado é obter uma solução alternativa que incorpore alguma margem de variação no ordenamento das operações, de forma que pequenas alterações em seus tempos de execução não provoquem um grande impacto no tempo total de execução das tarefas.

2. Programação Linear Fuzzy

A programação linear *fuzzy* pode ser vista como um caso particular da forma geral de otimização *fuzzy* (Kaymak e Sousa, 2003), que é o nome dado a um conjunto de técnicas utilizadas em problemas de otimização com flexibilidade, aproximação ou incerteza das restrições e objetivos através do uso de conjuntos *fuzzy*. Considere n variáveis de decisão, uma função objetivo e m restrições. O problema geral de programação linear *fuzzy* (FLP), com flexibilidade nas restrições é formulado como:

$$\begin{aligned} &\text{maximização fuzzy } f(x) = c^T x \\ &x \in X \\ &\text{sujeito a: } Ax \leq \sim b \\ &x \geq 0 \\ &\text{onde: } c, x \in \Re^n, b \in \Re^m, A \in \Re^m \times n \end{aligned} \quad (1)$$

O símbolo $\leq \sim$ representa uma flexibilidade nas restrições. A função de pertinência do objetivo *fuzzy* é dada por $F(c^T x)$, enquanto que as funções de pertinência das restrições *fuzzy* são dadas por $G_i(a_i^T x)$, $i=1,2,\dots,m$, onde a_i^T representa a linha i da matriz A . Esse problema de otimização pode ser resolvido utilizando a abordagem de Bellman e Zadeh (1970) para tomadas de decisão *fuzzy*. O vetor ótimo x^* é encontrado por:

$$D(x^*) = \max \{ F(c^T x) \wedge G_1(a_1^T x) \wedge \dots \wedge G_m(a_m^T x) \} \quad (2)$$

O símbolo $\wedge$ denota o operador mínimo. A solução para a programação linear *fuzzy* é dada pela conjunção de todas as funções de pertinência:

$$D(x) = \bigcap_{i=1}^m G_i(a_i^T x) \quad (3)$$

Sendo que o símbolo $\cap$ denota o operador de interseção que, neste caso, é o operador de mínimo. A solução ótima x^* é alcançada então por:

$$\begin{aligned} D(x^*) &= \max D(x) \\ x &\in \Re^n \end{aligned} \quad (4)$$

Com a introdução de uma variável adicional λ , a solução do problema de otimização descrito pela Equação 4 pode ser encontrada através de um problema de programação linear convencional (Zimmermann, 1993), como mostra a formulação abaixo:

$$\begin{aligned} &\text{maximizar } \lambda \\ &\text{sujeito a: } c^T x \geq z_p - (1-\lambda)p_0 \\ &a_i^T x \leq b_i + (1-\lambda)p_i, \quad i = 1,2,\dots,m \\ &x \geq 0 \\ &\lambda \geq 0 \\ &\lambda \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Note que o vetor x^* , correspondente à solução ótima λ^* da Equação 4, é a solução ótima da Equação 5. O valor ótimo λ^* dá uma idéia do risco associado, ou seja, se λ^* estiver próximo de 1, as violações às condições base das restrições não são muito grandes, enquanto que, para valores baixos de λ^* , há uma possibilidade elevada das restrições serem violadas.

3. Aplicação

3.1. Mistura de Combustíveis

Uma refinaria de petróleo típica produz várias correntes de produtos intermediários que podem ser misturadas de modo a produzir um produto final especificado. A maneira como as correntes intermediárias são misturadas para gerar produtos comercializáveis, assim como a distribuição dessas correntes entre as unidades de processo e os parâmetros operacionais dessas unidades, influenciam grandemente os resultados financeiros de uma refinaria (Moro, 2000). O objetivo do problema é maximizar a lucratividade da refinaria, definida como a soma das receitas obtidas com a venda de todos os produtos. Não são considerados custos independentes do desempenho do sistema de refino, tais como os custos de pessoal, financeiros e impostos, etc. Numa refinaria, pequenas melhorias na qualidade dos produtos acabados podem levar a uma redução significativa nos custos envolvidos na produção. Um exemplo disto está na obtenção do óleo combustível marítimo conhecido como *bunker* através da mistura (*blending*) realizada com RASF (resíduo asfáltico), LCO (óleo diesel craqueado) e QUEROSENE. Normalmente, esta mistura é feita com percentuais fixos de cada produto baseado em dados de laboratório. Considerando que as dos componentes variam com o inventário de óleo cru, esta mistura deixa de ser fixa e deve ser otimizada, evitando assim a necessidade de grandes correções posteriores (Stebel et al., 2000). Para podermos exemplificar um estudo de caso, consideraremos os seguintes dados relativos aos produtos intermediários e ao produto final, o óleo *bunker* MF-180, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Dados dos produtos intermediários e final

Produtos	Viscosidade (cSt/50°C)	Densidade (kg/m ³ /15°C)	Fator de Correção da Viscosidade	Custo
RASF	900000	1,1	0,992	2
LCO	2,7	0,94	0,470	10
Q	2,2	0,76	0,441	20
MF-180	180	0,9868	0,767	-

Para exemplificar a aplicação da programação linear *fuzzy*, vamos admitir uma flexibilização na densidade e na viscosidade do óleo MF-180. Essa variação é resultado das diferentes campanhas de produtos dentro da refinaria, representando o risco de infringir as restrições da mistura. Pretende-se obter uma nova proporção de componentes intermediários que minimizem o processo de ajuste da mistura final, reduzindo o tempo de retrabalho e o desperdício de produtos nobres. Utilizando a proposta de Zimmermann (1993), através da formulação (5), obtemos o seguinte problema de programação linear:

$$\begin{aligned}
 &\text{maximizar } \lambda \\
 &\text{sujeito a:} \\
 &2x_1 + 10x_2 + 20x_3 \leq 7,19 + (1 - \lambda)(7,92 - 7,19) \\
 &0,992x_1 + 0,470x_2 + 0,441x_3 = 0,767 + (1 - \lambda)(0,770 - 0,767) \\
 &1,1x_1 + 0,94x_2 + 0,76x_3 \leq 0,9868 + (1 - \lambda)(1 - 0,9868) \\
 &x_1 + x_2 + x_3 = 1 \\
 &x_1, x_2, x_3 \geq 0 \\
 &\lambda \geq 0, \quad \lambda \leq 1
 \end{aligned} \tag{6}$$

A solução de (6) resultou no fator de risco $\lambda = 0,5016$. Novamente foi utilizado o *solver* Lingo/PC para tal simulação. A Tabela 2 mostra os valores obtidos para um volume de produção de óleo MF-180 de 40000 litros.

Tabela 2. Dados dos produtos intermediários e final

Produtos	Percentual %	Volume	Custo
RASF	58,42	23368	2
LCO	19,31	7724	10
QUEROSENE	22,27	8908	20
MF-180	100	40000	302136

Vale observar que tal solução viola dentro de um certo grau as especificações do produto final MF-180, devendo ser ajustada. A principal diferença entre a metodologia proposta e a abordagem tradicional está na possibilidade de mensurar o impacto que flexibilidades existentes nos parâmetros produzem no resultado final.

3.1. Escalonamento de Operações de Transferência e Estocagem

O principal aspecto considerado é o problema de alocação de recursos compartilhados, tais como dutos e bombas. O problema consiste em estudar a influência que a alocação de recursos compartilhados provoca numa programação de produção inicialmente estabelecida, que basicamente mostra as operações de transferência dentro do horizonte de tempo. Além disso, em modelos de escalonamento, um parâmetro de grande impacto é o tempo de processamento de cada operação. Muitas aplicações assumem este tempo de processamento como exatos. Esta é uma hipótese muito forte, pois pode causar dificuldades em aplicações práticas de problemas de programação (Mccahon e Lee, 1992). O tempo de processamento estimado pode variar dependendo das atividades envolvidas em cada operação, conforme o equipamento a ser utilizado ou a manobra a ser efetuada. Desta maneira, pode-se afirmar que o tempo de execução das atividades está sujeito a incertezas.

Neste trabalho, é apresentada uma formulação que utiliza conceitos de conjuntos *fuzzy* (Zadeh, 1965) para tratamento de atrasos no tempo de processamento das operações de transferência de produtos de uma refinaria de petróleo. Inicialmente um modelo de programação matemática em tempo discreto considera os tanques como recursos e as demandas de fornecimento como parâmetros de entrada (Stebel, 2001). O resultado obtido é um escalonamento que indica em que instante de tempo ocorre o bombeamento de produtos, tanque escolhido para efetuar a tarefa e vazão necessária para atender o balanço de massas do sistema (ver Figura 1). O que se propõe então é resolver o problema de designação de dutos em uma etapa secundária, através de uma formulação tipo *job-shop* (Teixeira e Mendes, 1998) com algumas restrições adicionais. Pretende-se ainda considerar possíveis atrasos no tempo de execução, diminuindo sua influência através de um novo arranjo do escalonamento.

A Figura 1 mostra um exemplo de programação. Por exemplo, a tarefa T2 de envio do produto P1 para o cliente é composta por cinco operações, de OP1 a OP5. Cada uma dessas operações se baseia na transferência do produto P1 armazenado nos tanques TQ1, TQ7, TQ6, TQ2 e TQ7.

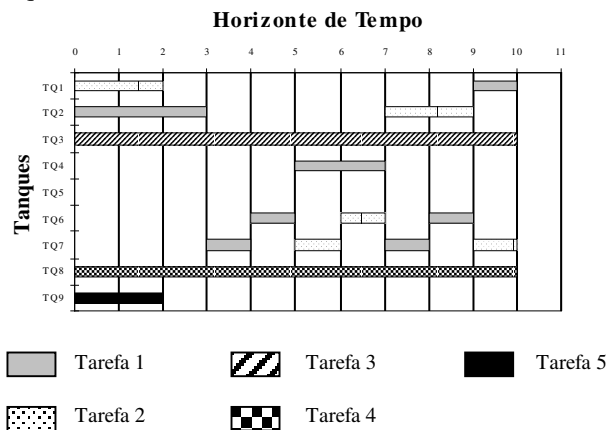


Figura 1. Gráfico de Gantt das tarefas – solução inicial (5 dutos)

O problema geral de programação linear *fuzzy* se reduz a um modelo de programação linear inteira mista (MILP), usando um domínio de tempo contínuo. As decisões são modeladas por variáveis binárias e contínuas, interligadas através de restrições lineares. O objetivo é minimizar o tempo total de execução das tarefas ou *makespan*, os tempos de início de processamento das operações e as transições entre dutos para uma mesma tarefa (Felizari, 2004). O modelo matemático é descrito a seguir.

A função objetivo é formada pelo *makespan*, os tempos de início de execução das operações e as transições entre diferentes dutos para uma mesma tarefa. Portanto, o problema de otimização é dado por:

$$\text{minimização fuzzy } \{ Mak + \sum_{o \in O_j} \sum_{j \in J} TS_{o,j} \} \quad (7)$$

Sujeito às restrições das Equações (8) a (19) abaixo:

O tempo final de qualquer operação deve ser inferior ao *makespan*:

$$Mak - TF_{o,j} \geq 0 \quad \forall o \in O_j, j \in J \quad (8)$$

A precedência entre operações de uma mesma tarefa deve ser assegurada:

$$TS_{o,j} \geq TF_{o-1,j} \quad \forall o > 1 \in O_j, j \in J \quad (9)$$

O tempo de duração das operações está sujeito a incertezas:

$$TF_{o,j} - TS_{o,j} = \sim TP_{o,j} \quad \forall o \in O_j, j \in J \quad (10)$$

A precedência entre as operações de tarefas distintas, para um mesmo tanque, deve ser respeitada:

$$TF_{p,k} - TS_{o,j} \geq -(1 - D_{o,j,p,k}) \times M \quad (11)$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, Q_{o,j} = Q_{p,k}$$

$$TF_{o,j} - TS_{p,k} \geq -D_{o,j,p,k} \times M \quad (12)$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, Q_{o,j} = Q_{p,k}$$

$$TF_{p,k} - TS_{o,j} \leq D_{o,j,p,k} \times M \quad (13)$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, Q_{o,j} = Q_{p,k}$$

$$TF_{o,j} - TS_{p,k} \leq (1 - D_{o,j,p,k}) \times M \quad (14)$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, Q_{o,j} = Q_{p,k}$$

$$D_{o,j,p,k} + D_{p,k,o,j} = 1 \quad (15)$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, Q_{o,j} = Q_{p,k}$$

A precedência de alocação dos dutos entre as operações de tarefas distintas precisa ser considerada:

$$TF_{o,j} - TS_{o,j} \leq (1 - D_{o,j,p,k}) \times M + TD_{n,p,k} + \quad (16)$$

$$(1 - V_{n,p,k}) \times M + (1 - V_{n,o,j}) \times M - TD_{n,o,j}$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, n \in N$$

$$TF_{p,k} - TS_{p,k} \leq D_{o,j,p,k} \times M + TD_{n,o,j} + \quad (17)$$

$$(1 - V_{n,o,j}) \times M + (1 - V_{n,p,k}) \times M - TD_{n,p,k}$$

$$\forall o, p \in O_j, (j \neq k) \in J, n \in N$$

Para cada operação de transferência, um tanque e um duto devem ser alocados no mesmo instante de tempo:

$$TD_{n,o,j} = TS_{o,j} \quad (18)$$

$$\forall o \in O_j, j \in J, n \in N$$

Em um dado instante de tempo, deve-se garantir que um único duto seja alocado para cada operação:

$$\sum_{n \in N} V_{n,o,j} = 1 \quad \forall o \in O_j, j \in J \quad (19)$$

O modelo descrito trata de forma geral a alocação de recursos às tarefas de transferência e estocagem, considerando ainda uma flexibilização do tempo de execução das operações a serem escalonadas. Através do exemplo a seguir, pretende-se que os aspectos principais do problema sejam evidenciados.

Como exemplo de aplicação, vamos admitir um atraso no processo de envio do produto P1 com destino ao cliente. Será considerado que a operação OP1 da tarefa T2 poderá atrasar em até 3 unidades de tempo ($TA_{1,2} = 3$), representando uma incerteza na duração da operação de bombeio do produto. O tempo de atraso leva em consideração a dificuldade das manobras envolvidas, podendo ser fornecido com base na experiência de especialistas.

Utilizando a proposta de Zimmermann (1993), através da formulação (5), obtemos o seguinte problema de programação linear:

maximizar λ

sujeito a:

$$Mak + \sum_{o \in O} \sum_{j \in J} TS_{o,j} \leq 75 + (1 - \lambda) \times (84 - 75) \quad (20)$$

$$TF_{1,2} - TS_{1,2} \geq 5 - (1 - \lambda) \times (5 - 2)$$

$$\lambda \geq 0, \lambda \leq 1$$

O problema completo é composto pela formulação (20) mais as restrições de (8) a (19), com exceção da restrição (10) que é substituída pelas restrições de tempo já contidas na equação (20). A Figura 2 traz a programação de operações considerando a variação no tempo de processamento, segundo a proposta de otimização *fuzzy*, resultando em $\lambda = 0,5833$. Neste caso, o início da tarefa T2 foi adiado e a solução considera uma duração intermediária para OP1 de T2. Além disso, se a duração de OP1 variar de 2 até 4 unidades, a programação permanecerá factível e haverá pouco impacto sobre o tempo total de escalonamento.

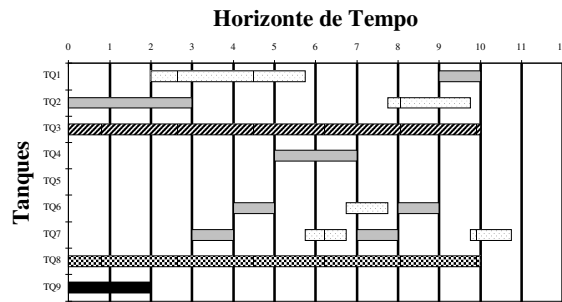


Figura 2. Quatro dutos com incerteza nas durações das operações

Na solução dos problemas de otimização foi utilizado o *solver* Lingo/PC release 8.0 instalado num computador Pentium III 1GHz/256MB RAM. De modo geral, os problemas consumiram um tempo médio de processamento da ordem de alguns minutos.

4. Conclusões

Através deste trabalho buscou-se abordar o uso da teoria de conjuntos *fuzzy* em problemas da produção de derivados em refinarias de petróleo, caracterizados por uma flexibilidade em suas restrições. Para o problema de mistura de combustíveis, notamos que existe uma violação das especificações do combustível MF-180, que deverá ser acertada, mas que possibilita uma solução de melhor compromisso, já que as características dos produtos intermediários apresentam variações devido aos diferentes tipos de petróleo empregados numa refinaria. Qualquer retrabalho que seja necessário para ajustar a densidade e a viscosidade do produto final partirá de uma mistura de custo reduzido e, caso seja necessário tal modificação, possibilitará o uso mais racional dos recursos envolvidos. O problema de escalonamento de operações considera o uso da otimização *fuzzy* na programação de tarefas, caracterizado por atrasos no tempo de processamento de operações de transferência e estocagem de produtos. Outro aspecto explorado diz respeito à alocação de recursos compartilhados, em particular os dutos que permitem o paralelismo das tarefas programadas. A partir de uma programação inicial, a introdução de atrasos nas operações leva a um aumento significativo do *makespan* e até mesmo à infactibilidade. Por outro lado, partindo-se da consideração de máximo atraso, com a possibilidade deste não ocorrer, a solução final fica deteriorada (poderia ser melhorada). Dessa forma, o resultado considerando o tempo de processamento *fuzzy* possibilitou alguma margem de variação na duração das operações, ao considerar um caso intermediário.

5. Agradecimentos

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR).

6. Referências

- BELLMAN, R. E, ZADEH, L. A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science* (Dec), v. 17, n. 4, p. 141-164, 1970.
- FELIZARI, L. C. Otimização *Fuzzy* Aplicada a Problemas da Produção de Derivados em Refinarias de Petróleo. Dissertação de Mestrado. CPGEI/CEFET-PR, 2004.
- KAYMAK, U., SOUSA, J. M. Weighted constraint in fuzzy optimization. *Constraints* (Jan), v. 8, n. 1, p. 61-78, 2003.
- MCCAHON, C. S., LEE, E. S. Fuzzy Job Sequencing for a Flow Shop. *European. Journal Operational Research*, v. 62, p. 294-301, 1992.
- MORO, L. F. L. Técnicas de Otimização Mista Inteira para o Planejamento e Programação de Produção em Refinarias de Petróleo. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- STEBEL, S. L. Modelagem da Estocagem e Distribuição de GLP de uma Refinaria de Petróleo. Dissertação de Mestrado. CPGEI/CEFET-PR, 2001.
- STEBEL, S.L., L. MAGATÃO, F. NEVES Jr., L.V.R. ARRUDA. Modelo de Programação Linear para otimização do sistema de mistura de óleo bunker. *Rio Oil Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- TEIXEIRA, E., MENDES, A. An Extension of the Model for the Problem of Workpieces Scheduling in a Flexible Manufacturing Cell. *Production Planning & Control*, v. 9, n. 2, p. 176-180, 1998.
- ZADEH L.A. Fuzzy sets. *Information and Control* (Jun), v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- ZIMMERMANN H. J. *Fuzzy Set Theory and its Application*. Kluwer Academic Press, Boston, 1993.