

MIXTURE OPTIMIZATION OF DIFFERENTS TYPES OF ALCOHOL FOR EXPORT

João I. Soletti^a, Sandra H. V. Carvalho^a, Maria C. O. Pedulla^a

^aLaboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), Universidade Federal de Alagoas, Maceió – Alagoas, Brasil, jisoletti@gmail.com,
<http://www.ctec.ufal.br/laboratorio/lassop/>

Keywords: Blend Optimization, Fuels, Ethanol, International Market.

Abstract. Because of the countless economical and partner-environmental problems caused by the excess of gasoline consumption and other pollutants and nonrenewables fuels, the exported product (ethanol) was taken as a practical solution for such problem; the objective is to use it as a renewable fuel, mixed with the gasoline for automobiles. In this paper, a Non Linear Programming (NLP) model is developed to establish a volumetric quantity of ethanol produced by every Brazilian distillery to attend the quality specification and the annual required demand by each importer. The model aims the minimization of the global cost of the annual production, considering the specifications of the quality pattern demanded by each importer. To reach the properties of the final blend, it was necessary to convert some properties of the product produced from each distillery into volumetric basis and consider it a case of study, to evaluate the application and the great global results from the program. The Conopt solver, available in GAMS, was used to solve this problem.

1 INTRODUÇÃO

Na prática, apenas a partir da década de 70, século XX, é que a questão do desenvolvimento sustentável veio sendo tratada em reuniões internacionais. A associação entre o meio ambiente e o desenvolvimento, onde a produção e o uso de energia renovável têm importância fundamental, levou à valorização da biomassa para esse fim.

Em virtude dos inúmeros problemas econômicos e sócio-ambientais causados pelo excesso do consumo de gasolina e demais combustíveis poluentes não renováveis, o etanol é tido como uma solução prática, pois o objetivo é usá-lo como um combustível renovável para motores, misturado com a gasolina. Estudiosos de diversos países estão empenhados em desenvolver novas tecnologias que visam substituir uma parcela de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos. Não estimulados apenas pelo instável mercado internacional de Petróleo, mas também pela preservação do meio ambiente, já que hoje temos que conviver com os reflexos do uso indevido e exagerado dos combustíveis fósseis que ocasionaram o agravamento do efeito estufa, as apostas no uso de combustíveis alternativos e menos poluentes e os chamados carros híbridos começam a ganhar forma.

É nesse cenário que o Brasil se destaca como um dos maiores exportadores de etanol, no âmbito mundial. O álcool vem ocupando um lugar de destaque nos meios de comunicação – rádio, internet, jornais, revistas entre outros. A nova imagem projetada pelo setor no campo empresarial vem se modificando no cenário interno e externo e se consolidando como grande fornecedor de energia pura e renovável. Entrevistas com profissionais da área e intermediários de negócios de álcool nos estados de São Paulo, Alagoas e Pernambuco em julho/2006 mostram que, de fato, é otimista a percepção desses agentes quanto à produção de álcool no Brasil nos próximos anos. Entre as justificativas, ressaltam-se aspectos ambientais com a produção de um combustível limpo e renovável, o aumento do número de usinas de açúcar e álcool no País, acompanhado pela expansão da área cultivada, a posição já ocupada pelo Brasil como grande exportador de álcool e o baixo custo de produção. Quanto aos compradores com maior potencial para importação do álcool brasileiro estão Japão, Estados Unidos e União Européia - por ordem de importância. Tendo em vista a importância destacada do Brasil no mercado internacional e as potencialidades para as exportações nacionais de álcool, investimentos em infra-estrutura voltados para a logística são prioritários.

A produção e o uso do etanol no Brasil são hoje o melhor exemplo (no mundo) da introdução de energia renovável com uma grande escala de produção. Partindo da produção estabelecida de açúcar, um processo completo de integração das produções foi obtido nas usinas: com grande flexibilidade nas unidades anexas (e com operação de autônomas, por algum tempo), as perdas de processo foram reduzidas e houve melhoria na qualidade do açúcar. Esse processo exigiu extenso desenvolvimento tecnológico (geração, importação, adaptação e transferência de tecnologias) na produção (agrícola e industrial), na logística e nos usos finais, nos últimos trinta anos. Também foi importante uma legislação específica, subsídios iniciais e permanente negociação entre os principais setores envolvidos: os produtores de etanol, os fabricantes de veículos, os setores reguladores governamentais e a indústria do petróleo, em um denso processo de aprendizagem.

A produção mundial de álcool aproxima-se dos 40 bilhões de litros, dos quais se presume que até 25 bilhões de litros sejam utilizados para fins energéticos. O Brasil responde por 15 bilhões de litros deste total. O álcool é utilizado em mistura com gasolina no Brasil, EUA, UE, México, Índia, Argentina, Colômbia e, mais recentemente, no Japão. O uso exclusivo de álcool como combustível está concentrado no Brasil. A Figura 1 compara a produção de etanol em diferentes países.

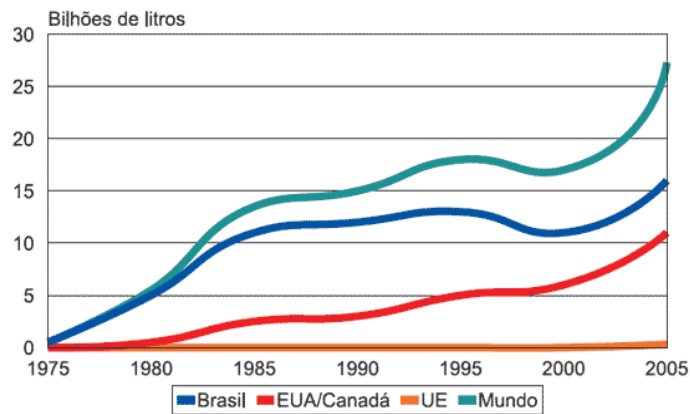


Figura 1: Produção mundial de etanol - Fonte: Elaboração D. L. Gazzoni, a partir de diversas fontes

Embora seja impossível prever o tamanho e a velocidade de crescimento da demanda internacional por álcool combustível no futuro próximo, é possível avaliar, com base em números relativos, o aproveitamento do potencial de expansão do uso do álcool que requer esforços contínuos de reorganização da produção e a instituição de mecanismos eficazes de regulação. O modelo de regulação viável para o Brasil baseia-se na autogestão e tem como objetivo a oferta de álcool em um contexto de aumento da frota interna de carros movidos a álcool hidratado (veículo movido 100% a álcool hidratado ou de combustível flexível), o seu uso em carros de nova geração e excedentes para garantir o abastecimento crescente e regular do mercado externo.

Além de melhores tecnologias e sistemas de geração energética são crescentes também as preocupações com a infra-estrutura de distribuição e regulamentação comercial das novas descobertas e do crescente aumento da demanda e oferta de novas soluções energéticas. A rapidez e a eficiência no escoamento da produção são peças-chave. Dificuldades de embarque, espera nos portos e burocracia que hoje impedem uma maior expansão do álcool no cenário internacional precisam de ações urgentes.

2 METODOLOGIA

A partir dos estudos feitos por Ravagnani *et al.* (2007), foi gerado um modelo matemático de programação não linear, o qual visa combinar diferentes tipos de etanóis, vindos de diferentes unidades produtoras, para formar uma mistura voltada para exportação, onde os países importadores pré-estabelecem suas normas de comercialização do produto. Acrescentado a isso, tem-se um sistema de penalidades, onde qualquer condição, exigida pelo importador através das suas normas, não cumprida gera uma penalidade para a unidade produtora. Os valores numéricos das penalidades são propostos pelos importadores, para cada condição de produção. Tais valores são interpretados como pesos dessas condições nos diferentes alcoóis, para, com isso, valorizar a unidade produtora de melhor qualidade.

A variável condicionante, que é posta no modelo como variável problema a ser minimizada, é o custo total da mistura, em escala de produção anual. Para se determinar o custo minimizado e as quantidades volumétricas que cada usina deve dispor de seu estoque, faz-se necessário que os países importadores estabeleçam sua demanda, seus padrões de qualidade e os respectivos pesos.

2.1 O modelo matemático

A função objetivo, representada pela Eq. 1, apresenta o custo a ser minimizado, considerando m países importadores e n usinas:

$$cost_f = \sum_{p=1}^m \sum_{i=1}^n cost_{(i)} fv_{(i,p)} \quad (1)$$

onde $cost_f$, $cost_i$, $fv_{(i,p)}$ são, respectivamente, o custo final de todas as misturas formadas; o custo de cada álcool utilizado nos processos e, por fim, a quantidade volumétrica que cada produtor deve dispor para a mistura final destinada a cada país p . É válido observar que tratam-se de várias misturas, destinadas a p países importadores, ou seja, a quantidade de misturas produzidas depende diretamente do valor p .

A equação que define o sistema de penalidades está representada nas três equações seguintes:

$$peso_{(i,j,p)} = pp_{(j,p)} \$ (Min_{(j,p)} \leq prop_{(i,j)} \leq Max_{(j,p)}) \quad (2)$$

onde $peso_{(i,j,p)}$ é o peso assumido pela propriedade j , do álcool i na mistura do país p . Esse valor será igual a $pp_{(i,j)}$, que é o peso que o país importador p impôs a propriedade j , somente se a propriedade j estiver nos limites dos padrões de qualidade exigidos pelos importadores. O símbolo $\$$ é que fornece a relação condicional.

$$vpeso_{(i,p)} = \sum_{j=1}^6 peso_{(j,i,p)} \quad (3)$$

$vpeso_{(i,p)}$ é o peso do álcool i para a mistura do país p , que corresponde ao somatório de todos os pesos das propriedades j calculados na Eq. 2.

Por fim, a Eq. 4 define o sistema de penalização do modelo, onde os pesos dados a cada álcool influenciam no volume final de cada mistura, a qual deve ser igual a demanda exigida pelo país importador p . Na equação abaixo, $quant_i$ representa a quantidade de unidades produtoras; $fv_{(i,p)}$ o volume de álcool produzido pela usina i para a mistura do país p e $Dem_{(p)}$ a demanda exigida pelo país p .

$$quant_i \frac{\sum_{i=1}^n fv_{(i,p)} vpeso_{(i,p)}}{\sum_{i=1}^n vpeso_{(i,p)}} = Dem_{(p)} \quad (4)$$

Para não haver defasagem na demanda, foi preciso criar uma equação (Eq. 5) a qual informe que o somatório de todos os volumes disponibilizados pelas usinas i deve ser igual a demanda.

$$\sum_{i=1}^n fv_{(i,p)} = Dem_{(p)} \quad (5)$$

As restrições do modelo referem-se ao padrão de qualidade do álcool, ou seja, às especificações técnicas, exigidas para sua comercialização: densidade (Eq. 6); teor de metanol (Eq. 7); teor de água (Eq. 8); teor de cloro (Eq. 9); acidez em ácido acético (Eq. 10); pH (Eq. 11); teor de goma (Eq. 12); teor de etanol (Eq. 13); íon sulfúrico (Eq. 14); íon de cobre (Eq. 15). Em todos os casos existe um limite mínimo, $Min_{(j,p)}$, e máximo, $Max_{(j,p)}$, referente a especificação da propriedade j (identificada em forma de sigla, entre parênteses) decretado pelo país p . Fora da faixa especificada para cada propriedade, o álcool será penalizado, de forma a reduzir sua contribuição para a mistura final.

- Densidade (m) em 20°C, kg/m³:

$$\text{Min}_{(m,p)} \leq \sum_{i=1}^n m_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(m,p)} \quad (6)$$

- Teor de metanol (tm), %v/v :

$$\text{Min}_{(tm,p)} \leq \sum_{i=1}^n tm_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(tm,p)} \quad (7)$$

- Teor de água (ta), %v/v :

$$\text{Min}_{(ta,p)} \leq \sum_{i=1}^n ta_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(ta,p)} \quad (8)$$

- Teor de cloro (cl), mg/L :

$$\text{Min}_{(cl,p)} \leq \sum_{i=1}^n cl_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(cl,p)} \quad (9)$$

- Acidez em ácido acético (ac), mg/L :

$$\text{Min}_{(ac,p)} \leq \sum_{i=1}^n ac_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(ac,p)} \quad (10)$$

- pH (ph) :

$$\text{Min}_{(ph,p)} \leq \sum_{i=1}^n ph_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(ph,p)} \quad (11)$$

- Teor de goma (go), mg/100ml :

$$\text{Min}_{(go,p)} \leq \sum_{i=1}^n go_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(go,p)} \quad (12)$$

- Teor de etanol (te), %v/v :

$$\sum_{i=1}^n te_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n f v_{(i,p)} \geq \text{Min}_{(te,p)} \quad (13)$$

Todas as variáveis das Eqs. 6 a 13, com exceção do pH, são relacionadas à unidades de volume, entretanto, as variáveis apresentadas nas Eqs. 14 e 15 necessitam ser convertidas, pois são apresentadas em frações mássicas e faz-se necessária a conversão para bases volumétricas.

- Íon sulfúrico (su), em ppm:

$$\text{Min}_{(su,p)} \leq \sum_{i=1}^n su_i m_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n m_i f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(su,p)} \quad (14)$$

- Íon de cobre (cu), em mg/kg :

$$\text{Min}_{(cu,p)} \leq \sum_{i=1}^n cu_i m_i f v_{(i,p)} / \sum_{i=1}^n m_i f v_{(i,p)} \leq \text{Max}_{(cu,p)} \quad (15)$$

3 SIMULAÇÃO

3.1 Estudo de caso

Para analisar a desenvoltura do modelo matemático, foram utilizados dados hipotéticos (similares aos reais) baseados nos estudos desenvolvidos por Ravagnani *et. al.*

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam, respectivamente, os limites das normas de comercialização do produto e as penalidades impostas às propriedades não cumpridas, ambos valores propostos pelos países importadores. A Tabela 3 apresenta as propriedades (representadas pelas siglas citadas acima) de cada produto, nas unidades impostas, e seu respectivo custo (em dólar US\$).

A demanda é dada em função de cada país. Para esse estudo de caso, adotaremos a demanda de 1.250.000 litros de etanol para cada país, numa escala anual de produção.

Prop.	Limites	País 1		País 2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Densidade (m)		789.3	812.3	790.1	811.3
Teor de metanol (tm)		0	5	1.5	6
Teor de água (ta)		0	1.0	0.6	3.0
pH (ph)		6.5	9.0	6.0	9.0
Goma (go)		0	5	0.2	10
Teor de etanol (te)		92.1	-	91.8	-
Teor de cloro (cl)		0	32	1	20
Acidez em ácido acético (ac)		0	36	0	60
Enxofre (su)		0	30	3	32
Cobre (cu)		0	0.1	0	0.15

Tabela 1 – Padrões de qualidade dos países importadores

	País 1	País 2
Densidade (m)	2.5	2.0
Teor de metanol (tm)	1.5	2.0
Teor de água (ta)	2.0	1.0
pH (ph)	2.0	2.0
Goma (go)	1.0	1.0
Teor de etanol (te)	3.0	2.5
Teor de cloro (cl)	1.0	1.5
Acidez em ácido acético (ac)	1.0	1.0
Enxofre (su)	1.0	1.5
Cobre (cu)	1.5	0.5

Tabela 2 – Pesos para cada propriedade

Destilaria	m	tm	Ta	cl	Ac	ph	go	te	su	cu	Cost
A1	801.2	7	0.1	33	21	9.0	0.8	90.0	08	0.00	0.21
A2	792.7	5	4.2	24	30	7.1	1.9	93.7	15	0.01	0.23
A3	699.0	0.5	2.0	17	17	6.0	9.3	98.5	01	0.20	0.19
A4	777.12	3	2.3	26	03	6.7	7.1	87.1	02	0.08	0.20
A5	811.03	4	1.9	15	10	8.0	4.1	94.3	24	0.07	0.29
A6	793.9	1.5	4.7	21	29	7.1	3.9	92.0	33	0.22	0.21
A7	820.5	1	5.5	30	41	9.3	8.7	83.5	40	0.10	0.18
A8	803.9	8	0.8	34	58	5.1	10.4	79.8	21	0.06	0.18
A9	788.1	10	0.3	27	63	8.3	6.6	91.9	18	0.03	0.19
A10	874.6	6	1.1	42	47	10.1	3.1	97.0	09	0.00	0.22
A11	901.0	6	3.2	20	23	6.9	12.4	95.1	03	0.27	0.23
A12	778.3	4.5	2.0	19	28	6.0	5.5	90.0	20	0.04	0.20
A13	808.6	1.1	1.1	30	19	8.1	7.3	78.8	27	0.17	0.24
A14	800.9	6.9	3.0	09	01	7.3	3.0	83.4	30	0.13	0.22
A15	789.9	3.2	4.1	12	08	6.6	8.0	93.7	31	0.05	0.25
A16	793.3	5.3	0.9	07	12	8.1	4.4	96.6	08	0.19	0.29
A17	810.8	6.0	6.0	23	29	5.8	2.0	93.9	10	0.21	0.21
A18	891.1	0.6	3.0	28	69	6.5	1.3	94.1	09	0.01	0.22
A19	780.0	0.8	1.7	03	43	7.0	5.9	99.0	25	0.00	0.27
A20	790.7	1.9	2.3	15	49	8.2	5.0	97.3	06	0.00	0.28
A21	510.3	3.0	2.9	39	21	7.5	2.7	84.8	13	0.09	0.24
A22	901.1	4.7	3.1	28	08	9.0	9.1	87.0	18	0.15	0.23
A23	799.8	3.9	4.8	04	13	5.0	3.8	92.0	39	0.20	0.23
A24	800.8	4.5	2.6	12	19	9.1	2.3	91.7	20	0.11	0.24
A25	812.3	5.9	1.0	18	24	6.8	7.3	94.5	11	0.07	0.26
A26	795.5	7.7	0.5	05	68	8.0	7.0	95.0	14	0.00	0.25
A27	794.3	8.3	0.6	14	00	7.0	5.5	92.3	07	0.01	0.25
A28	801.4	3.1	1.3	11	15	6.7	3.9	93.8	16	0.03	0.30
A29	810.7	9.1	4.0	23	18	8.9	8.0	89.9	28	0.09	0.23
A30	812.3	11.3	3.3	31	02	6.6	13.3	93.1	34	0.08	0.22

Tabela 3 – Propriedades dos etanóis

3.2 Análise dos resultados

Para desenvolver este modelo matemático foi utilizado o software GAMS, *General Algebraic Modeling System*. O *solver*, CONOPT (*Continuous Optimizer*), o qual foi usado na resolução do problema, é um sistema computacional que soluciona problemas de otimização não-convexos, problemas lineares, não lineares e mistos.

Os quantitativos finais (em litros) que cada destilaria fornece para a composição do etanol exportado para os países importadores 1 e 2 são apresentados na Tabelas 4.

Destilaria	País 1	Destilaria	País 2
A1	267000	A3	350000
A3	326000	A7	185000
A10	323000	A9	187000
A16	125000	A18	244000
A26	209000	A23	249000
-	-	A25	226000

Tabela 4 – Resultado final da simulação

No caso considerado, onde a produção de etanol nas destilarias é ilimitada, o custo global das exportações foi US\$ 532159,61, e, portanto, o custo do litro de etanol exportado foi US\$ 0.21. As únicas destilarias que fabricam o produto para as misturas de exportação não estão totalmente dentro dos padrões exigidos, porém a mistura com outros etanóis neutraliza as propriedades fora das normas, e, por conseqüência, minimiza o custo total da mistura, já que os etanóis fora dos padrões exigidos têm um custo menor. Para impedir a utilização apenas das destilarias mais baratas, o modelo impõe as penalidades sobre os alcoóis fora dos padrões, diminuindo a produção dessas destilarias e valorizando àquelas cujas propriedades se encontram próximas aos padrões.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático que visa à minimização do custo final de uma mistura de etanóis voltada à exportação, onde tais misturas devem estar dentro dos parâmetros de comercialização adotados pelos países importadores do produto. Foi adotado um sistema de penalização, aplicado ao produto fora da especificação.

O modelo mostrou-se coerente na apresentação dos resultados obtidos na simulação, sendo o custo global minimizado e as normas e demandas atendidas. Por fim, os pesos dados as unidades produtoras com melhores especificações de comercialização impediram a alta produção das destilarias mais baratas, valorizando àquelas cujas propriedades estavam dentro dos parâmetros impostos.

REFERENCES

- Broke, A.; *et al.* Gams Development Corporation. 1998. *GAMS—A User's Guide*. <<http://www.gams.com/docs/document.htm>>.
- Bragato, I. R.; Marjotta-Maistro, M. C.; 2006. *O futuro do álcool brasileiro na visão de quem trabalha no setor*. Nota técnica Cepea/ Esalq-USP.
- Macedo, I. C., 2007. *Situação anual e perspectiva do etanol*. Estudos avançados, vol.21 no.59, São Paulo Jan./Apr. 2007
- Mauro A.S.S. Ravagnani, Werner I. Thonerna, Jose A. Caballerob, 2007. *A mathematical*

- model for the composition of Brazilian ethanol shares for exportation to be blended to gasoline.* Energy Police. 5060-5063.
- Mônica Magalhães, 2005. *JornalCana. Mercados e cotações. O crescimento da opção por combustíveis fósseis.*
- Negrão, L. C. P.; Urban, M. L. P., 2005. *Álcool como “commodity” internacional.* Economia e Energia.
- Soletti, J. I.; Carvalho, S. H. V.; Pedulla, M. C. O., 2010. *Desenvolvimento de um modelo matemático que visa atender o padrão de qualidade dos países importadores de açúcar.*