

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA PARA A CADEIA DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR COM FOCO EM BIOCOMBUSTÍVEIS

Carolina Monteiro, Joaquim Dias Garcia, Raphael Sampaio, Luana Gaspar, Rafael Kelman
PSR

Praia de Botafogo 370, Botafogo, Rio de Janeiro
[carolina, joaquim, rsampaio, luana, rafael]@psr-inc.com

Bruno Fânzeres

PUC Rio
Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro
bruno.santos@puc-rio.br

RESUMO

Este estudo aborda a otimização da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, uma matéria-prima promissora para energia renovável, visando maximizar os benefícios econômicos e ambientais. Foi desenvolvido um modelo de otimização estocástica para determinar investimentos em plantas industriais e suas operações, considerando incertezas na disponibilidade da biomassa e nos preços dos bioprodutos.

O modelo, formulado em duas etapas - decisões de investimento e operações - e resolvido através da decomposição de Benders, foi aplicado ao contexto brasileiro com dados realistas. Os resultados indicam que investimentos em plantas produtoras de açúcar, etanol de primeira geração, eletricidade, biometano, bio-óleo, biochar e créditos de carbono são economicamente viáveis. As anuidades totais foram estimadas em US\$ 51,7 milhões, com um custo operacional médio de US\$ 117 milhões e uma receita média de US\$ 445,53 milhões, destacando o açúcar como principal fonte de receita.

PALAVRAS CHAVE. Otimização estocástica, Cadeia de produção da cana-de-açúcar, Transição energética com biocombustíveis.

ABSTRACT

This study addresses the optimization of the sugarcane production chain, a promising raw material for renewable energy, in order to maximize economic and environmental benefits. A stochastic optimization model was developed to determine investments in industrial plants and their operations, considering uncertainties in biomass availability and bioproducts' prices.

The model, formulated in two steps - investment decisions and operations - and solved through the Benders decomposition, was applied to the Brazilian context with realistic data. The results indicate that investments in plants producing sugar, first-generation ethanol, electricity, bio-methane, bio-oil, biochar, and carbon credits are economically viable. Total annuities were estimated at US\$ 51.7 million, with an average operating cost of US\$ 117 million and an average revenue of US\$ 445.53 million, highlighting sugar as the primary source of revenue.

KEYWORDS. Stochastic optimization. Sugarcane production chain. Energy transition with biofuels.

1. Introdução

Nos últimos anos, houve uma crescente preocupação global com os efeitos adversos do consumo de combustíveis fósseis e da dependência desses combustíveis no que diz respeito ao meio ambiente e à segurança energética, e, com isso, a necessidade urgente de fazer a transição para fontes de energia sustentáveis e de baixo carbono. Como resultado, atenção significativa tem sido direcionada às fontes renováveis, como energia hidrelétrica, solar e eólica. No entanto, a utilização de biomassa derivada de materiais orgânicos, como plantas, madeira, resíduos agrícolas e culturas energéticas dedicadas, como fonte de energia renovável, tem muito potencial para descarbonizar o setor de energia e mitigar as emissões de gases de efeito estufa[EPE, 2023]. Embora a queima de combustíveis fósseis ou biomassa libere dióxido de carbono na atmosfera, as plantas que são a fonte básica da biomassa mitigam essas emissões durante seu crescimento, pois capturam a mesma quantidade de CO_2 durante a fotossíntese. Uma fonte particularmente notável de biomassa para produção de energia é a cana-de-açúcar. Com sua abundância, alto teor de energia e conversão eficiente em biocombustíveis, a cana-de-açúcar tem um potencial considerável como matéria-prima de energia renovável[Cherubin et al., 2021; EPE, 2023]. Como acontece com muitas fontes de biomassa, o aproveitamento de seu conteúdo energético pode permitir a produção de calor, eletricidade e biocombustíveis avançados. Em especial, a cana-de-açúcar pode ser usada para produzir combustível sustentável de aviação (SAF) e hidrogênio, importantes aliados para a descarbonização dos setores aeroespacial e siderúrgico, respectivamente[RSB [2021]].

Com base no rico potencial da cana-de-açúcar como matéria-prima de energia renovável, uma etapa crucial para aproveitar seus benefícios está na otimização estratégica de sua cadeia de produção. Nesse contexto, um modelo de otimização estocástica será desenvolvido para determinar investimentos em plantas industriais baseadas na cana-de-açúcar, juntamente com sua operação, com o objetivo de maximizar a receita por meio de vendas. O modelo contemplará a incerteza ao incorporar cenários de disponibilidade da cana-de-açúcar e preços de venda dos bioprodutos. O modelo será formulado em duas etapas. A primeira etapa envolve definir investimentos em cada planta industrial, determinando assim suas capacidades de processamento. A relação entre investimentos e capacidades é modelada como uma função exponencial côncava para representar o ganho de escala na construção das plantas. Essa função é modelada como uma função linear por partes que requer variáveis inteiras. A segunda etapa envolve determinar a quantidade de cada bioproduto a ser produzida e vendida, considerando as capacidades de cada fábrica e os cenários de disponibilidade e preços. Para resolver eficientemente o programa estocástico de grande escala resultante, a decomposição de Benders[Benders, 2005] é aplicada.

Esse modelo de otimização é aplicado usando dados realistas, considerando o contexto específico do Brasil. Os parâmetros e cenários usados no modelo são personalizados para refletir as nuances da indústria da cana-de-açúcar no panorama brasileiro. Ao incorporar informações precisas e específicas da região, o modelo visa fornecer insights e estratégias que sejam diretamente aplicáveis aos desafios dinâmicos e às oportunidades presentes no setor de cana-de-açúcar brasileiro.

2. Modelo de Otimização

O modelo de otimização estocástica proposto visa maximizar o lucro esperado da cadeia de produção de cana-de-açúcar, considerando a incerteza associada à disponibilidade da cana-de-açúcar e aos preços de venda dos bioprodutos. São parâmetros de entrada: o conjunto de produtos I , indexados por i ; o conjunto de processos J , indexados por j ; o conjunto de plantas K , indexadas por k ; o conjunto de cenários S , indexados por s ; o conjunto de produtos consumidos pelo processo j , $I^{in}(j)$; o conjunto de produtos produzidos pelo processo j , $I^{out}(j)$; o conjunto de processos que consomem o produto i , $J^c(i)$; o conjunto de processos que produzem o produto i , $J^p(i)$; o conjunto de processos que podem ser realizados planta k , $J(k)$; a função $u(j)$ mapeando o processo para seu

primeiro produto de entrada; o custo de investimento de uma planta de referência B_j^{ref} ; a capacidade de uma planta de referência C_j^{ref} ; o fator de ganho de escala da planta σ_k ; a taxa de juros anual da planta r_k ; o número de anos de vida útil da planta n_k ; o número de seções para linearização da função de ganho de escala M ; os custos operacionais do processo c_j ; o preço de venda do produto $p_{i,s}$; a disponibilidade inicial do produto $D_{i,s}^0$; o fator de consumo do produto pelo processo $\theta_{j,i}^{in}$; e o fator de produção do produto pelo processo $\theta_{j,i}^{out}$.

De acordo com os parâmetros de entrada, o modelo definirá a capacidade e o investimento associado em cada planta industrial, bem como a quantidade de cada bioproduto a ser produzida e vendida. O modelo será decomposto em dois estágios: a fase de investimento e a fase de operação. A comunicação entre os dois estágios será realizada por meio de cortes de Benders, e a variável mestra será a capacidade de cada planta industrial. A seguir, os detalhes de cada estágio do modelo serão apresentados.

2.1. Problema Mestre: Investimento

O problema mestre consiste no estágio de investimento. Além dos parâmetros de entrada supracitados, são utilizados os parâmetros calculados: a máxima capacidade possível da planta $\bar{C}_k$; a máxima disponibilidade possível dos bioprodutos $\bar{D}_{i,s}$; o vetor de valores de capacidade para linearização $\bar{C}_{k,m}$; o vetor de valores de investimento para linearização $\bar{B}_{k,m}$. São variáveis de decisão: a capacidade da planta industrial C_k ; o investimento na construção da planta B_k ; a anuidade referente ao investimento A_k ; e o custo futuro Q_s . O modelo, descrito pelas equações (2)-(5), determina a capacidade de cada planta industrial e o investimento associado. A relação entre o investimento B e capacidade C é baseada em valores de referência, B^{ref} e C^{ref} . Esta relação considera economia de escala e é modelada por uma função exponencial, onde $\sigma \leq 1$ representa o fator de economia de escala. Especificamente, a relação é dada por:

$$B_k = B_k^{ref} \left(\frac{C_k}{C_k^{ref}} \right)^{\sigma_k} \quad (1)$$

Esta função é não-linear e côncava, levando a uma não-convexidade devido a sua minimização, portanto deve ser linearizada com o uso de variáveis inteiras[Huchette e Vielma, 2023]. A capacidade C pode atingir um valor máximo $\bar{C}$, calculado a partir da disponibilidade inicial D^0 dos bioprodutos e dos fatores de consumo θ^{in} e de produção θ^{out} dos processos. O domínio da variável de capacidade é portanto $[0, \bar{C}]$, e é dividido em M seções. Para minimizar o erro de linearização da função, cuja variação é maior quanto menor a capacidade, os pontos $\bar{C}$ são dispostos de forma que o tamanho das seções segue uma progressão geométrica, com razão $q > 1$. O investimento $\bar{B}$ é calculado de acordo com a equação (1). Como resultado, obtém-se a restrição representada pela equação (4).

Para ser incluso na função objetivo, o investimento B é diluído em n anos, considerando uma taxa de juros anual r . A anuidade A é então calculada de acordo com a equação (3). Aos custos do problema de investimento é adicionado o valor esperado de custos (e receitas) da operação Q resultado de custos operacionais e venda de produtos, que são avaliados no subproblema. Com isso, obtém-se a função-objetivo contida na equação (2). Para limitar o problema, acrescenta-se o limite inferior ao custo futuro, na equação (5).

$$\min_{C,B,A,Q} \sum_{k \in K} A_k + \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} Q_s \quad (2)$$

$$\text{s.a. } A_k = \frac{B_k \cdot r_k}{1 - (1 + r_k)^{-n_k}} \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$(C_k, B_k) \in \text{piecewise}(\{\dot{C}_{k,m}, \dot{B}_{k,m}\}_{m=0}^M) \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$Q_s \geq - \sum_{i \in I} \bar{D}_i \cdot p_{i,s} \quad \forall s \in S \quad (5)$$

2.2. Subproblema: Operação

O subproblema recebe, além dos parâmetros de entrada supracitados, a capacidade avaliada $\hat{C}$ do problema mestre, e possui como variáveis de decisão: a capacidade da planta $C_{k,s}$; a disponibilidade final dos bioprodutos $D_{i,s}^f$; a quantidade de cada bioproduto sendo consumida por cada processo $f_{j,i,s}^{in}$; a quantidade de cada bioproduto sendo produzida por cada processo $f_{j,i,s}^{out}$; uma variável auxiliar $l_{j,s}$ para manter proporções de cada processo; a quantidade $v_{i,s}$ do bioproduto a ser vendida; o custo total da operação Q_s ; a variável dual $\lambda_{k,s}$ representando o custo marginal das restrições de capacidade.

O subproblema, descrito pelas equações (6)-(11) consiste em, dada a capacidade $\hat{C}$ de cada planta industrial, definir a quantidade de cada bioproduto a ser produzida em cada planta e vendida. A capacidade $\hat{C}$ é avaliada no problema mestre e é fixa para o subproblema na restrição da equação (11). A essa restrição é associada a variável dual λ , que será usada para calcular os cortes de Benders. As restrições do subproblema envolvem proporções de bioprodutos como entrada (9) e saída (10) dos processos, e equações de balanço (8) dos bioprodutos. A função objetivo (6) é minimizar o custo total Q , que é composto pelos custos operacionais dos processos e pelas receitas das vendas dos bioprodutos (7).

$$\min_{C,D^f,f^{in},f^{out},l,v,Q} Q_s \quad (6)$$

$$\text{s.a. } Q_s = \sum_{j \in J} c_j \cdot f_{j,u(j)}^{in} - \sum_{i \in I} p_{i,s} \cdot v_{i,s} \quad (7)$$

$$D_{i,s}^f = D_{i,s}^0 + \sum_{j \in J^p(i)} f_{j,i,s}^{out} - \sum_{j \in J^c(i)} f_{j,i,s}^{in} - v_{i,s} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$l_{j,s} = \frac{1}{\theta_{j,i}^{in}} \cdot f_{j,i,s}^{in} \quad \forall j \in J, i \in I^{in}(j) \quad (9)$$

$$l_{j,s} = \frac{1}{\theta_{j,i}^{out}} \cdot f_{j,i,s}^{out} \quad \forall j \in J, i \in I^{out}(j) \quad (10)$$

$$C_{k,s} = \hat{C}_k : \lambda_{k,s} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$(12)$$

2.3. Interação entre os Estágios

A cada iteração do algoritmo de Benders, o problema mestre é resolvido para determinar a capacidade $\hat{C}$ de cada planta industrial. Essa capacidade $\hat{C}$ é então fixada no subproblema, que é resolvido para obter o custo total $\hat{Q}$ da operação e o custo marginal $\hat{\lambda}$ das restrições de capacidade. Com essas informações, adiciona-se a seguinte restrição de corte ao problema mestre:

$$Q_s \geq \hat{Q}_s + \sum_{k \in K} \hat{\lambda}_{k,s} \cdot (C_{k,s} - \hat{C}_{k,s}) \quad \forall s \in S \quad (13)$$

3. Estudo de Caso

Um estudo de caso foi conduzido com um conjunto de produtos incluindo cana-de-açúcar, palha, açúcar, etanol de primeira e segunda geração, eletricidade, biometano, bio-óleo, SAF, diesel verde, biogasolina, biochar, e-metanol, créditos de carbono, hidrogênio, além de subprodutos como vinhaça e torta de filtro, totalizando 20 produtos. Um conjunto de 14 processos capazes de realizar as transformações entre os produtos foi considerado, bem como um conjunto de 13 plantas industriais capazes de realizar esses processos. Os dados como capex e capacidade de referência das plantas, custos operacionais e proporções dos processos foram obtidos a partir de uma pesquisa na literatura, bem como os preços de venda base dos produtos. Os produtos que receberam uma disponibilidade inicial foram a cana-de-açúcar e a palha, com o valor base de 3,84 milhões de toneladas e 0,27 milhões de toneladas, respectivamente, que são os valores que foram considerados como a média proveniente de uma plantação de cana-de-açúcar de 45 mil hectares. Foram considerados 100 cenários de preço e disponibilidade inicial dos produtos, gerados a partir de uma distribuição log-normal.

O modelo foi implementado na linguagem de programação Julia [Bezanson et al., 2017] na forma de um pacote chamado OptBio. Foram utilizados a biblioteca de otimização JuMP [Lubin et al., 2023], o solver Xpress, e o pacote PiecewiseLinearOpt. De acordo com as saídas obtidas, foi escolhido pelo modelo os investimentos nas plantas responsáveis pela produção dos seguintes bioprodutos a serem vendidos: açúcar, etanol de primeira geração, eletricidade, biometano, bio-óleo, biochar e créditos de carbono. A soma das anuidades foi de 51,7 milhões de dólares, e a média dos custos operacionais entre os cenários foi de 117 milhões de dólares. A média da receita com as vendas entre os cenários foi de 445,53 milhões de dólares, sendo o açúcar o produto responsável pela maior parte da receita.

Referências

- Benders, J. F. (2005). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Computational Management Science*, 2(1):3–19. ISSN 1619-697X.
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., e Shah, V. B. (2017). Julia: A fresh approach to numerical computing. *SIAM Review*, 59(1):65–98. URL <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/141000671>.
- Cherubin, M. R., Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Nogueira, L. A. H., Souza, G. M., e Cantarella, H. (2021). Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. *Land*, 10(1):72.
- EPE (2023). Publicações da epe sobre petróleo, gás natural e biocombustíveis em 2023. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética.
- Huchette, J. e Vielma, J. P. (2023). Nonconvex piecewise linear functions: Advanced formulations and simple modeling tools. *Operations Research*, 71(5):1835–1856.
- Lubin, M., Dowson, O., Dias Garcia, J., Huchette, J., Legat, B., e Vielma, J. P. (2023). JuMP 1.0: Recent improvements to a modeling language for mathematical optimization. *Mathematical Programming Computation*.
- RSB (2021). Feedstock availability for sustainable aviation fuels in brazil. Technical report, Roundtable on sustainable materials.