

## MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO E COLETA DE BIOMASSA PARA COGERAÇÃO EM USINAS SUCROENERGÉTICAS

DANIEL FERNANDO GARCIA<sup>1</sup>, EDILAINE MARTINS SOLER<sup>2</sup>, ANTONIO ROBERTO BALBO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestre Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru/SP, e-mail: daniel.garcia@unesp.br

<sup>2</sup> Profa. Doutora, Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru/SP, Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, 17033-360, Bauru, São Paulo, Brasil, edilaine.soler@unesp.br

<sup>3</sup> Prof. Doutor, Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru/SP, Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Vargem Limpa, 17033-360, Bauru, São Paulo, Brasil, antonio.balbo@unesp.br

**RESUMO:** A produção de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar tem se tornado cada vez mais comum nas usinas que produzem açúcar e álcool. Além de ser uma alternativa renovável para a produção de energia, a venda da eletricidade excedente pode aumentar significativamente o lucro das usinas sucroenergéticas. A otimização dos processos reduz consideravelmente os custos envolvidos em todo o processo produtivo. Considerando a utilização da biomassa da cana para a produção de energia, as usinas se deparam com o problema de alocação dos recursos para a produção de açúcar, álcool e energia, e de planejamento da coleta da biomassa remanescente da colheita mecanizada. Assim, este trabalho propõe um modelo matemático de programação linear inteira mista para o planejamento da produção e coleta da biomassa remanescente da colheita mecanizada, com o objetivo de realizar o balanceamento econômico através da cogeração de energia, e produção de açúcar e etanol. Propõe-se resolver o modelo proposto pelo *solver* CPLEX. Foram realizados testes numéricos com o modelo proposto aplicado à um cenário base. O *solver* CPLEX mostrou-se eficiente nos testes numéricos realizados e os resultados obtidos demonstram um equilíbrio do *mix* de produção.

**Palavras-chaves:** otimização linear inteira mista, cana-de-açúcar, bioenergia, balanço econômico, alocação ótima.

## MATHEMATICAL MODEL FOR PLANNING THE PRODUCTION AND COLLECTION OF BIOMASS FOR COGENERATION IN SUGAR ENERGY PLANTS

**ABSTRACT:** The production of energy from sugarcane biomass has become increasingly common in mills that produce sugar and alcohol. In addition to being a renewable alternative for energy production, the sale of excess electricity can significantly increase the profits of sugarcane plants. Process optimization considerably reduces the costs involved in the entire production process. Considering the use of sugarcane biomass for energy production, the mills are faced with the problem of allocating resources for the production of sugar, alcohol, and energy, and planning the collection of biomass remaining from mechanized harvesting. Thus, this work proposes a mixed-integer linear programming mathematical model for planning the production and collection of biomass remaining from mechanized harvesting, in order to achieve economic balance through energy cogeneration, and sugar and ethanol production. It is proposed to solve the model proposed by the CPLEX solver. Numerical tests were performed with the proposed model applied to a base scenario. The CPLEX solver proved to be efficient in the numerical tests performed and the results obtained demonstrate a balance of the production mix.

**Keywords:** mixed integer linear optimization, sugarcane, bioenergy, economic balance, optimal allocation.

## 1 INTRODUÇÃO

O histórico de produção e moagem da cana-de-açúcar no Brasil nas safras de 2018/19 e 2019/20 segundo o Observatório da Cana (2021) foi de aproximadamente 621 e de 643 milhões de toneladas, respectivamente. Em relação as mesmas safras, a produção de açúcar foi de aproximadamente 30 milhões de toneladas em ambas as safras e a produção de etanol foi de aproximadamente 34 e 36 mil metros cúbicos. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021) a utilização da biomassa da cana-de-açúcar desde o ano de 2019 para a produção de energia, tem uma participação de 8,4% na matriz elétrica brasileira, e ocupa a quarta posição ficando atrás da hidráulica, Gás Natural e Eólica.

O acesso a energias limpas e não poluentes atualmente é definido como uma meta de desenvolvimento sustentável, dentro desse novo contexto, muitos países estão desenvolvendo e promovendo políticas de incentivo para implementação de novos projetos energéticos com a utilização de fontes renováveis, conhecidas também como fontes não convencionais de energia. Uma alternativa de maior notoriedade está relacionada ao aproveitamento da biomassa residual deixada pelas cadeias produtivas do agronegócio, como por exemplo a biomassa da cana-de-açúcar. Para o setor de cogeração, a busca por alternativas que proporcionem evidências de sustentabilidade é fundamental, pois, seu papel ambiental está sendo discutido com mais afinco nos últimos tempos. Segundo Rivera-Cadavid, Velásques e Duque (2019) a cogeração de energia através da utilização de resíduos agrícolas ocasiona um conceito de agronegócio com base na preservação do meio ambiente e no uso consciente e eficiente dos recursos disponíveis e desta forma diminuindo cada vez mais a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera por meio da queima de combustíveis fósseis.

Modelos matemáticos e metodologias de resolução para a otimização dos processos agroindustriais relativos à cana-de-açúcar têm sido propostos na literatura nos últimos anos. Costa, Potrich e Cruz (2016), Ba, Prins e Prodhon (2016), Carpio e Souza (2017) apresentaram modelos matemáticos para a

alocação da cana-de-açúcar na produção industrial. Modelos aplicados ao planejamento do plantio e colheita da cana foram abordados por Isler, Florentino e Martins (2012), Leda, Gonçalves e Lima (2019) e Junqueira e Morabito (2018). Ramos e Florentino (2012) propuseram um modelo com foco em determinar os custos de produção de energia na cultura da cana. Os trabalhos de Sartori e Florentino (2002) e Oliveira, Braga e Santos (2014) apresentaram modelos que abordam a viabilização da utilização da biomassa da cana-de-açúcar. Carvalho Junior (2016) propôs um modelo matemático de otimização linear para determinar a configuração de produção da planta que maximize o lucro da usina. Rivera-Cadavid, Velásques e Duque (2019) propuseram um modelo que determina a seleção dos talhões para coleta e transporte da biomassa remanescente da colheita mecanizada para a produção de energia.

A maioria dos modelos propostos na literatura para a otimização dos processos agroindustriais da cana-de-açúcar focam em momentos específicos da produção agroindustrial, não consideram as demandas energéticas internas nem as demandas das *commodities* (açúcar e álcool). Há ainda modelos que auxiliam no planejamento do plantio da cana e modelos que demonstram os benefícios da utilização da biomassa sem considerarem as produções industriais. Há ainda modelos mais completos, mas, que devido a sua formulação exigem um grande esforço computacional para a sua resolução quando aplicados a instâncias de grande porte.

Assim, com o objetivo de obter um modelo que auxilie no planejamento da produção de uma usina sucroenergética assim como a coleta e utilização da biomassa na produção direta dos produtos derivados da cana, este artigo propõe um modelo matemático de programação linear inteira mista para a otimização do balanço econômico da cogeração de energia, produção de açúcar e etanol em usinas sucroenergética e que determine a seleção dos talhões em que deve coletar a biomassa remanescente da colheita mecanizada..

Para a validação do modelo proposto, testes numéricos com um cenário base são

apresentados, os quais foram realizados através do solver CPLEX, implementado no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*.

O modelo proposto neste trabalho é uma ferramenta que pode auxiliar nas decisões dos empresários do ramo sucroenergético, com as informações em relação as escolhas dos talhões e melhor alocação dos recursos destinados a fabricação das *commodities* e de atendimento das demandas energéticas envolvidas na produção canavieira. A contribuição deste trabalho vem de uma análise detalhada do planejamento de produção, cadeia de abastecimento e alocação de recursos em função das variações dos preços que influenciam a tomada de decisão.

Este trabalho está organizado como segue: na Seção 2 é descrito o modelo matemático proposto neste trabalho, a Seção 3 apresenta os resultados obtidos e as discussões pertinentes a partir dos testes realizados, a Seção 4 traz as conclusões deste trabalho.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo matemático proposto nesse trabalho é baseado nos modelos de Carvalho Junior (2016) e Rivera-Cadavid, Velásques e Duque (2019). A função objetivo bem como as restrições do modelo matemático proposto são resultantes das funções objetivo e restrições dos modelos apresentados nestes dois trabalhos que foram agregadas em um único modelo matemático de programação linear inteira mista.

O modelo proposto neste trabalho considera a operação industrial sucroenergética onde sua manufatura de bens, tais como as *commodities* açúcar e etanol, assim como, a cogeração da *commodity* eletricidade excedente a partir de um mesmo recurso, ou seja, a cana-de-açúcar, acontece de forma simultânea. Dentro das operações industriais também é considerado a produção das energias térmica, mecânica e elétrica para sanar as necessidades internas da usina e para tal é considerado o uso dos recursos derivados da cana, como a biomassa remanescente da colheita mecanizada (BRCM), o bagaço, o caldo e o melaço residual do caldo.

Adicionalmente, o modelo matemático proposto determina em quais talhões deve ser realizada a coleta de BRCM para complementar a cogeração de energia. Parte da BRCM de cada talhão é transportado agregado a cana e então utilizado para cogeração de energia. Devido as capacidades de geração de energia das usinas e o lucro resultante da venda de energia excedente, pode haver necessidade de coletar mais BRCM nos talhões em que já foi realizada a colheita da cana. O modelo proposto também visa determinar os talhões onde será realizada essa coleta adicional de BRCM. A coleta de BRCM deve ocorrer após a colheita da cana-de-açúcar nos talhões, e deve ser feita de 7 a 10 dias após a colheita. Assim, de forma agregada, o modelo proposto busca sanar as dificuldades encontradas tanto no planejamento produtivo quanto no planejamento da cadeia de abastecimento.

O objetivo do modelo é atingir o máximo benefício entre as receitas e os custos de uma usina sucroenergética, estes últimos, junto aos preços de comercialização de cada *commodity*. Na abordagem feita foi considerado a produção dos derivados a partir dos subprodutos da cana-de-açúcar com seus preços de mercados, custos de produção e custos logísticos de coleta e transporte de BRCM dos talhões para a usina, respectivamente.

A função objetivo e as restrições que compõem o modelo proposto neste trabalho serão detalhadas a seguir. Na notação adotada, as variáveis de decisão do modelo são denotadas por letras minúsculas e os parâmetros por letras maiúsculas e letras gregas.

### Índices

- i: *commodities*,  $i = 1, 2, 3$  (açúcar VHP, etanol anidro, etanol hidratado);
- j: recursos,  $j = 1, 2, 3, 4$  (BRCM, bagaço, caldo, melaço);
- h: energias,  $h = 1, 2, 3$  (térmica, mecânica, elétrica);
- k: talhões,  $k = 1, \dots, K$ .

### Variáveis de decisão

$x^e$ : quantidade da *commodity* eletricidade excedente produzida (em MW);

$x_i^c$ : quantidade da *commodity*  $i$  produzida (em ton ou  $m^3$ );

$x_{ij}^{cr}$ : quantidade da *commodity*  $i$  produzida a partir do recurso  $j$  (em ton/ton ou  $m^3$ /ton);

$x_{hj}^{er}$ : quantidade da energia  $h$  para demanda interna produzida a partir do recurso  $j$  (em MW/ton);

$x_{ji}^{rc}$ : quantidade do recurso  $j$  necessária para produzir a *commodity*  $i$  (em ton);

$x_{jh}^{re}$ : quantidade do recurso  $j$  necessária para produzir a energia  $h$  para atender a demanda interna (em ton);

$x_k$ : quantidade de BRCM coletada no talhão  $k$  (em ton);

$d_h$ : demanda interna da energia  $h$  necessária para a produção sucroenergética (em MW);

$y_k$ : variável binária que assume 1 se há coleta de BRCM do talhão  $k$ , 0 caso contrário.

### Parâmetros

$C_{ij}^C$ : custo de produção da *commodity*  $i$  produzida a partir do recurso  $j$  (em R\$/ton);

$C_{hj}^E$ : custo de produção da energia  $h$ , para atender a demanda interna, produzida a partir do recurso  $j$  (em R\$/ton);

$C_k^F$ : custo fixo de coleta da BRCM do talhão  $k$  (em R\$);

$C_k^T$ : custo de transporte da BRCM do talhão  $k$  à usina (em R\$/(ton/Km))

$D_k$ : distância entre o talhão  $k$  e a usina (em Km);

$D_i^C$ : demanda da *commodity*  $i$ , a ser atendida pela usina (em ton ou  $m^3$ );

$D_{aux}^E$ : demanda elétrica consumida na usina (em MW);

$E_k^D$ : número de equipes disponíveis para a coleta da BRCM disponível no talhão  $k$ ;

$P_i^C$ : preço unitário das *commodities*  $i$  produzidas (em R\$/ton ou R\$/ $m^3$ );

$P^e$ : preço unitário da *commodity* eletricidade excedente (em R\$/MW);

$P^Q$ : capacidade de processamento de BRCM da usina (em ton);

$Q_{moa}^C$ : capacidade de moagem (em ton);

$Q_{ij}^E$ : quantidade de energia elétrica necessária para produzir a *commodity*  $i$ , a partir do recurso  $j$  (em MW/ton);

$Q_{moa}^E$ : quantidade de energia elétrica consumida na etapa de moagem da cana (em MW/ton);

$Q_{rec}^E$ : quantidade de energia elétrica consumida na etapa de recepção da cana (em MW/ton);

$Q_{moa}^M$ : quantidade de energia mecânica consumida para a moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar (em MW);

$Q_k^P$ : quantidade de BRCM disponível no talhão  $k$  para coleta (em ton) - considera-se que a quantidade de BRCM disponível em cada talhão para coleta já é decrescida da quantidade que deve permanecer no solo para geração de adubo para o próximo plantio;

$Q_j^R$ : quantidade do recurso  $j$ , disponível para cada tonelada de cana-de-açúcar processada (em ton);

$Q_{ij}^T$ : quantidade de energia térmica (vapor de processo) necessária para produzir a *commodity*  $i$ , a partir do recurso  $j$  (em MW/ton);

$\eta_{jh}^R$ : coeficiente de transformação do recurso  $j$  em energia  $h$  (em ton/MW).

$\eta_{ji}^R$ : coeficiente de transformação do recurso  $j$  em *commodity*  $i$  (em ton/ton ou ton/ $m^3$ );

Em (1) tem-se a função objetivo do modelo proposto, formada pela soma da receita obtida pelas vendas das *commodities* mais a receita pela venda da eletricidade excedente,

menos os custos de produção das *commodities*, custo de produção das demandas energéticas

internas, e custos de transporte e dessa forma maximizar o balanço econômico da usina.

$$\max \left( \sum_{i=1}^3 (P_i^C x_i^c) \right) + (P^E x^e) - \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (C_{ij}^C x_{ij}^{cr}) + \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^2 (C_{hj}^E x_{hj}^{cr}) + \sum_{k=1}^K (y_k C_k^F) + \sum_{k=1}^K (x_k D_k C_k^V) \right) \quad (1)$$

## 2.1 Restrição de atendimento as demandas das *Commodities*

Em (2) temos que as quantidades das *commodities* açúcar VHP, etanol anidro e etanol hidratado ( $i=1, 2, 3$ ) produzidas a partir dos recursos caldo ( $j = 3$ ) e melão ( $j = 4$ ) devem ser maiores ou iguais as demandas destas, a serem atendidas pela usina.

$$\sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr} \geq D_i^C, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

## 2.2 Restrições de atendimento as demandas energéticas

Em (3) temos que a quantidade das energias térmica, mecânica e elétrica ( $h=1,2,3$ ) para atender as demandas internas produzidas a partir dos recursos BRCM ( $j = 1$ ) e bagaço ( $j = 2$ ) devem ser maiores ou iguais que as demandas energéticas internas necessárias para a produção sucroenergética (em MW).

$$\sum_{j=1}^2 x_{hj}^{cr} \geq d_h, \quad h = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Nas restrições (4) – (6), são calculados os valores das demandas energéticas internas, separadas por tipo, para atender as demandas das produções das *commodities*.

Tem-se em (4) que a demanda de energia térmica necessária na usina deve ser igual ao produto da quantidade de energia térmica necessária para produzir a *commodity*  $i$  pela quantidade da *commodity*  $i$ , produzida a partir dos recursos caldo ( $j = 3$ ) e melão ( $j = 4$ ).

$$d_1 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^T x_{ij}^{cr}) \quad (4)$$

Em (5) a demanda de energia mecânica necessária na usina precisa ser igual ao produto entre a quantidade de energia mecânica consumida para a moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar pela quantidade de cana-de-açúcar disponível para a moagem.

$$d_2 = Q_{moa}^M Q_{moa}^C \quad (5)$$

Já em (6) tem-se que: a demanda de energia elétrica necessária na usina é igual a soma da quantidade de energia elétrica consumida na etapa de recepção, mais a quantidade de energia elétrica consumida na etapa de moagem, multiplicadas pela quantidade de cana-de-açúcar disponível para a moagem; e esse termo é somado ao produto da quantidade de energia elétrica necessária para produzir a *commodity*  $i$  pela quantidade da *commodity*  $i$  produzida a partir dos recursos caldo ( $j = 3$ ) e melão ( $j = 4$ ) mais a demanda elétrica auxiliar consumida na usina.

$$d_3 = (Q_{rec}^E + Q_{moa}^E) Q_{moa}^C + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^4 (Q_{ij}^E x_{ij}^{cr}) + D_{aux}^E \quad (6)$$

## 2.3 Restrições de recursos

Nas restrições (7) a quantidade da *commodity*  $i$  produzida a partir do recurso  $j$  deve ser igual ao produto da quantidade do recurso  $j$  necessário para produzir a *commodity*  $i$  pelo coeficiente de transformação do recurso  $j$  na *commodity*  $i$  (em ton/ton ou ton/m<sup>3</sup>).

$$x_{ij}^{cr} = x_{ji}^{rc} \eta_{ji}^R, \quad i = 1, 2, 3; j = 3, 4 \quad (7)$$

Em (8) tem-se que a quantidade da energia  $h$  para atender a demanda interna produzida a partir do recurso  $j$  precisa ser igual ao produto dado pela quantidade do recurso  $j$  necessária para a produção da energia  $h$  pelo

coeficiente de transformação do recurso  $j$  para a energia interna  $h$  (em ton/MW).

$$x_{hj}^{er} = x_{jh}^{re} \eta_{jh}^R, h = 1, 2, 3; j = 1, 2 \quad (8)$$

Nas restrições (9) tem-se que a quantidade da *commodity*  $i$  produzida tem que ser igual ao somatório das quantidades da *commodity*  $i$  produzida a partir dos recursos caldo ( $j = 3$ ) e melaço ( $j = 4$ ).

$$x_i^c = \sum_{j=3}^4 x_{ij}^{cr}, i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

Em (10), a quantidade da *commodity* eletricidade excedente produzida é igual ao somatório da quantidade da energia elétrica produzida a partir dos recursos BRCM ( $j = 1$ ) e bagaço ( $j = 2$ ) decrescido da demanda da energia elétrica ( $h = 3$ ) necessária para a produção sucroenergética.

$$x^e = \sum_{j=1}^2 (x_{3j}^{er}) - d_3 \quad (10)$$

Em (11) tem-se que a soma entre as quantidades do recurso  $j$  necessário para produzir a *commodity*  $i$  e as quantidades do recurso  $j$  necessário para a produção da energia  $h$  deve ser menor ou igual que a quantidade do recurso  $j$  disponível.

$$\sum_{i=1}^3 x_{ji}^{rc} + \sum_{h=1}^3 x_{jh}^{re} \leq Q_j^R Q_{moa}^C, j = 2, 3, 4 \quad (11)$$

Nas restrições (12) além da quantidade total de BRCM disponível por tonelada de cana processada temos somado a esse valor a quantidade de BRCM coletados nos talhões disponíveis para a produção das *commodities* e da eletricidade excedente.

$$\sum_{i=1}^3 x_{ji}^{rc} + \sum_{h=1}^3 x_{jh}^{re} \leq (Q_j^R Q_{moa}^C) + \sum_{k=1}^K x_k, \text{ para } j = 1 \quad (12)$$

Tem-se em (13) que a quantidade de BRCM na cana-de-açúcar processada somada a quantidade de BRCM colhida nos talhões, deve

ser menor ou igual que a capacidade de processamento de BRCM da usina.

$$(Q_j^R Q_{moa}^C) + \sum_{k=1}^K x_k \leq P^Q \quad (13)$$

## 2.4 Restrições de seleção dos talhões para coleta do BRCM

Em (14) tem-se que o número de talhões nos quais o BRCM deve ser coletado é limitado pelo número de equipes disponíveis para a coleta. Já em (15) temos que a quantidade de BRCM coletado em cada talhão é limitada pela quantidade de BRCM disponível do talhão para coleta.

$$\sum_{k=1}^K y_k \leq E_k^D \quad (14)$$

$$x_k \leq Q_k^P y_k; k = 1, \dots, K \quad (15)$$

A coleta de BRCM deve ocorrer após a colheita da cana-de-açúcar nos talhões, e é feita essencialmente de 7 a 10 dias após a colheita. Segundo Rivera-Cadavid, Velásques e Duque (2019) a quantidade total de BRCM gerada em cada talhão  $k$  depende: de sua área, da variedade da cana-de-açúcar cultivada e das ferramentas de colheita em uso. Ressalta-se que é considerado que a quantidade de BRCM disponível em cada talhão para coleta  $Q_k^P$  já é decrescida da quantia que deve permanecer no solo para geração de adubo para o próximo plantio.

## 2.5 Restrições de não-negatividade

Em (16) tem-se o domínio de definição das variáveis do modelo.

$$\begin{aligned}
x_i^c &\geq 0, i = 1, 2, 3 \\
x^e &\geq 0 \\
x_{ij}^{cr} &\geq 0, i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4 \\
x_{hj}^{cr} &\geq 0, h = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4 \\
x_{ji}^{re} &\geq 0, j = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2, 3 \\
x_{jh}^{re} &\geq 0, j = 1, 2, 3, 4; h = 1, 2, 3 \\
x_k &\geq 0, k = 1, 2, 3, \dots, K \\
d_h &\geq 0, h = 1, 2, 3 \\
y_k &\in \{0, 1\}, k = 1, 2, 3, \dots, K
\end{aligned} \tag{16}$$

O modelo proposto (1) - (16) foi implementado no *software* IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* e resolvido pelo *solver* CPLEX (IBM, 2021). Para a validação do modelo considera-se uma planta hipotética com capacidade de moagem de 20 mil ton/dia, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013) plantas com essa capacidade de moagem são consideradas plantas agroindustriais de grande porte. Considera-se o horizonte de planejamento de 1 dia de produção. Os parâmetros adotados nos testes foram adotados conforme a literatura. Os preços de venda das *commodities* foram considerados na cotação de abril de 2021 segundo Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2021) e Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (2021a, 2021b), e são dados por: 2.083,00 R\$/ton de açúcar VHP, 3.012,40 R\$/m<sup>3</sup> de etanol anidro, 2.674,70 R\$/m<sup>3</sup> de etanol hidratado e 226,73 R\$/MWh de eletricidade excedente.

Considera-se 20 talhões com BRCM disponível para coleta, de tamanhos diferentes e localizados a diferentes distâncias da usina. Considerou-se que a usina conta diariamente com um total de 10 equipes disponíveis para

realizarem a coleta do BRCM nos talhões. Com uma capacidade de moagem de 20 mil ton/dia, considera-se uma demanda de açúcar VHP em 1.700 ton/dia e as demandas de etanóis anidro e hidratado em 400 m<sup>3</sup> e 240m<sup>3</sup>, respectivamente. As demandas podem variar, pois, dependem dos contratos pré-estabelecidos com a usina, porém, sempre respeitando a capacidade de moagem. A capacidade de processamento de BRCM da usina é de 3.000 ton/dia.

Para a implementação e os testes realizados foi utilizado um computador com processador Intel(R) Core (TM) i5-7200U e 4,00 GB de memória RAM instalada. Os resultados obtidos são apresentados na próxima seção.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo (1) - (16) foi resolvido em 1 segundo e 85 milésimos de segundo, para a instância testada.

Na Tabela 1 tem-se as quantidades produzidas de cada *commodity* na solução obtida e o valor da função objetivo. O *mix* de produção (calculado pela razão entre o volume total de caldo processado pela usina e a quantidade destinada para a produção tanto de açúcar quanto de etanol) assume uma razão de 69,45% (produção de açúcar) por 30,55% (produção de etanol), tais porcentagens evidenciam um balanço produtivo esperado em uma usina com produção agregada de açúcar e etanol. Pode-se perceber também uma alta produtividade na produção de energia elétrica excedente, ou seja, a usina além de atender as demandas internas de energia elétrica, ainda é capaz de produzir uma quantidade alta de eletricidade excedente, onde, é vendida ao mercado, assim, incidindo diretamente no aumento do lucro da usina.

**Tabela 1.** Quantidades de produção de cada *commodity*.

Resultados	Unidade
Balanço Econômico (Função Objetivo)	6.433.726,27 R\$/dia
Quantidade da <i>commodity</i> açúcar VHP produzida	1700,00 ton/dia
Quantidade da <i>commodity</i> etanol anidro produzida	410,60 m <sup>3</sup> /dia
Quantidade da <i>commodity</i> etanol hidratado produzida	240,00 m <sup>3</sup> /dia
Quantidade da <i>commodity</i> eletricidade produzida	17.511,00 MW/dia
<i>Mix</i> de produção	% 69,45/30,55

Fonte: Autores (2021)

A Tabela 2 apresenta as quantidades produzidas de cada *commodity* a partir do caldo e do melaço. Esta tabela evidencia uma produção de açúcar e etanol anidro baseada

integralmente na utilização do caldo. Já a produção de etanol hidratado utiliza tanto o recurso caldo quanto o melaço para sua produção.

**Tabela 2.** Quantidades produzida de cada *commodity* i, a partir do caldo e melaço.

Resultados	Unidade
Quantidade de açúcar VHP produzida a partir do caldo	1.700,00 ton/dia
Quantidade de açúcar VHP produzida a partir do melaço	0 ton/dia
Quantidade de etanol anidro produzida a partir do caldo	410,60 m <sup>3</sup> /dia
Quantidade de etanol anidro produzida a partir do melaço	0 m <sup>3</sup> /dia
Quantidade de etanol hidratado produzida a partir do caldo	73,40 m <sup>3</sup> /dia
Quantidade de etanol hidratado produzida a partir do melaço	166,60 m <sup>3</sup> /dia

Fonte: Autores (2021)

Na Tabela 3 tem-se as quantidades produzidas de cada tipo de energia na solução obtida. Analisando esta Tabela percebe-se que

o bagaço foi utilizado integralmente na produção de energia elétrica, enquanto o BRCM se dividiu na produção das três energias.

**Tabela 3.** Quantidade produzida de cada energia para atendimento da demanda interna, a partir do BRCM e bagaço.

Resultados	Unidade
Quantidade de energia térmica produzida a partir do BRCM	7.189,30 MW/dia
Quantidade de energia térmica produzida a partir do bagaço	0 MW/dia
Quantidade de energia mecânica produzida a partir do BRCM	220,00 MW/dia
Quantidade de energia mecânica produzida a partir do bagaço	0 MW/dia
Quantidade de energia elétrica produzida a partir do BRCM	4.350,70 MW/dia
Quantidade de energia elétrica produzida a partir do bagaço	13.608,00 MW/dia

Fonte: Autores (2021)

Na Tabela 4 são apresentadas as produções de energia para atendimento das demandas interna. Em uma escala decrescente nota-se que a demanda interna de energia com

menor necessidade de produção é a da energia mecânica, seguida da energia elétrica e por último, e com maior necessidade de geração, a energia térmica.

**Tabela 4.** Produção de energia para atendimento das demandas internas.

Resultados	Unidade
Demanda de energia térmica necessária na usina	7.189,30 MW/dia
Demanda de energia mecânica necessária na usina	220,00 MW/dia
Demanda de energia elétrica necessária na usina	447,34 MW/dia

Fonte: Autores (2021)

As Tabelas 5 e 6 apresentam como é a alocação de cada recurso para a produção das *commodities*. Na Tabela 5 nota-se que o caldo foi destinado para produzir as três *commodities*,

porém, o recurso melaço é utilizado em sua totalidade na produção da *commodity* etanol hidratado.

**Tabela 5.** Quantidades necessárias de caldo e melaço necessários para produzir cada *commodity* i.

Resultados	Unidade
Quantidade de caldo necessária para produzir o açúcar VHP	10.000,00 ton
Quantidade de caldo necessária para produzir o etanol anidro	3.732,70 ton
Quantidade de melaço necessária para produzir o açúcar VHP	0 ton



Quantidade de melaço necessária para produzir o etanol anidro	0 ton
Quantidade de caldo necessária para produzir o etanol hidratado	667,27 ton
Quantidade de melaço necessária para produzir o etanol hidratado	340,00 ton

Fonte: Autores (2021)

A tabela 6 confirma que a utilização da BRCM se divide na produção das três energias,

enquanto a utilização do bagaço fica restrito na produção da energia elétrica.

**Tabela 6.** Quantidades necessárias de BRCM e bagaço necessários para produzir cada energia h.

Resultados	Unidade
Quantidade de BRCM necessária para produzir a energia térmica	1.732,40 ton
Quantidade de BRCM necessária para produzir a energia mecânica	72,368 ton
Quantidade de BRCM necessária para produzir a energia elétrica	1.195,30 ton
Quantidade de bagaço necessária para produzir a energia térmica	0 ton
Quantidade de bagaço necessária para produzir a energia mecânica	0 ton
Quantidade de bagaço necessária para produzir a energia elétrica	5.600,00 ton

Fonte: Autores (2021)

Por último a Tabela 7 apresenta as quantidades de BRCM que devem ser coletadas em cada talhão. Dentre os 20 talhões

disponíveis para coleta de BRCM, na solução obtida tem-se coleta em 7 deles.

**Tabela 7.** Escolha do talhão e a quantia coletada em cada talhão

Talhão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de BRCM coletada no talhão (em ton)	0	30	0	25	26	35	0	0	21	0
Talhão	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Quantidade de BRCM coletada no talhão (em ton)	0	0	27	0	0	36	0	0	0	0

Fonte: Autores (2021)

Nos resultados obtidos notou-se a utilização da BRCM na produção conjunta das três energias envolvidas no processo sucroenergético. Assim, a BRCM é destinada no processo para a produção das demandas energéticas internas de energias térmica, e ainda é alocada na produção de energia elétrica excedente para ser vendida, fato este que maximiza o balanço econômico.

As Tabelas (1) – (6) apresentam como devem ser alocados os insumos oriundos da cana-de-açúcar no processo industrial de produção do açúcar e etanol, e cogeração de energia, de modo a maximizar o lucro da usina. E a Tabela 7 apresenta em quais talhões devem ser realizadas a coleta de BRCM e quanto coletar de cada talhão, auxiliando também a logística de transporte da usina.

O modelo proposto neste trabalho é uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões

que pode auxiliar empresários do setor sucroenergético a tomar decisões em relação a alocação dos recursos e produção de *commodities* a fim de se obter o balanço econômico que seja o mais vantajoso para a usina.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi abordado um problema de planejamento de produção em indústrias sucroenergéticas, através da produção dos subprodutos da cana-de-açúcar e coleta da biomassa no campo objetivando a cogeração de energia, e assim maximizar o balanço econômico da indústria.

Os resultados obtidos através da implementação do modelo são promissores, pois, eles mostram uma alocação dos recursos da cana de forma a priorizarem as produções

das *commodities* que irão beneficiar o balanço econômico da indústria. Ainda em relação aos recursos, o modelo se mostra eficiente ao determinar os talhões em que deve ser feita a coleta de BRCM.

Pode-se concluir que através dos resultados obtidos que o modelo proposto é uma importante ferramenta que pode ser utilizada na tomada de decisões pelos empresários das usinas sucroenergéticas, pois, ele mostra sua eficiência na alocação ótima dos recursos envolvidos, redirecionando a BRCM na produção energéticas de maneira a beneficiar o *mix* da produção da usina e assim maximizar seu balanço econômico.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Programa de Demanda Social (CAPES – DS) pela bolsa de mestrado (Processo número: 88887.489834/2020-00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ (Processos nº 314711/2020-1 e 305548/2019-0).

## 6 REFERÊNCIAS

BA, B. H.; PRINS, C.; PRODHON, C. Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: an operations research perspective. **Renewable Energy**, Oxford, v. 87, p. 977-989, 2016.

CARPIO, L. G. T.; SOUZA, F. S. Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second-generation ethanol in Brazil: scenarios of cost reductions. **Renewable Energy**, Oxford, v. 111, p. 771-780, 2017.

CARVALHO JUNIOR, C. P. **Modelo de otimização ao balanço econômico da cogeração de energia, produção de álcool e açúcar na indústria canavieira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM

ECONOMIA APLICADA. **Índice semanal do etanol hidratado combustível e indicador semanal do etanol anidro**. São Paulo: CEPEA: ESALQ, 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2021a.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Açúcar: Indicador do açúcar cristal branco Cepea/Esalq – 2021**. São Paulo: CEPEA: ESALQ, 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/acucar.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2021b.

BRESSAN FILHO, A.; ANDRADE, R. A.

CONAB. **Perfil do setor do Açúcar e do Álcool no Brasil**, Brasília, DF, p. 1-80, 2013. v. 5, Safra 2011/2012. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/perfil-do-setor-sucroalcooleiro/item/download/23296\\_e8994b0d8652261a47cf54ac4332120](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/perfil-do-setor-sucroalcooleiro/item/download/23296_e8994b0d8652261a47cf54ac4332120). Acesso em: 11 abr. 2021.

COSTA, C. B. B.; POTRICH, E.; CRUZ, A. J. G. Multiobjective optimization of a sugarcane biorefinery involving process and environmental aspects. **Renewable Energy**, Oxford, v. 96, p. 1142-1152, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 6 abr. 2021.

IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization**. Armonk: IBM, 2021. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/analytics/cplex-optimizer>. Acesso em: 10 abr. 2021.

ISLER, P. R.; FLORENTINO, H. O.; MARTINS, D. Modelagem matemática de aferições de temperatura com aplicação em graus-dias para cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 3, p. 97-114, 2012.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R.

Programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar: modelo e métodos de solução para problemas de grande porte.

**Gestão & Produção**, São Carlos, v. 25, n. 1, p. 132-147, 2018.

LEDA, V. C.; GOLÇALVES, A. K.; LIMA, N. S. Sensoriamento remoto aplicado a modelagem de produtividade da cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 34, n. 2, p. 263-270, 2019.

OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S. Produção de biomassa de cana-de-açúcar no vale do São Francisco. **Energia na agricultura**, Botucatu, v. 29, n. 1, p. 27-38, 2014.

OBSERVATÓRIO DA CANA. **Histórico de Produção e moagem**. São Paulo: Observatório da Cana, 2021. Disponível em:

<https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn>. Acesso em: 6 abr. 2021.

RAMOS, R. P.; FLORENTINO, H. O. Modelo matemático para determinação do custo e produção de energia na cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 122-137, 2012.

RIVERA-CADAVID, L.; MANYOMA-VELÁSQUEZ, P. C.; MANOTAS-DUQUE, D. F. Supply Chain Optimization for Energy Cogeneration Using Sugarcane Crop Residues (SCR). **Sustainability**, London, v. 11, n. 23, p. 6565, 2019.

SARTORI, M. M. P.; FLORENTINO, H. O. Modelos de minimização de biomassa residual. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 3, p. 297-303, 2002.