57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA PARA A OTIMIZAÇÃO DA COLHEITA E PROCESSAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Carlos Henrique Pilz
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 – Vargem Limpa, Bauru/SP, 17033-360
carlos.pilz@unesp.br

Profa. Dra. Sônia Cristina Poltroniere Silva
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 – Vargem Limpa, Bauru/SP, 17033-360
poltroniere.silva@unesp.br

Profa. Dra. Edilaine Martins Soler
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 – Vargem Limpa, Bauru/SP, 17033-360
edilaine.soler@unesp.br

RESUMO

A colheita é uma operação logística complexa da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e sua sincronização com as demais operações é crucial para garantir o fluxo de matéria-prima das fazendas para as usinas de forma eficiente, evitando o desperdício de recursos. Este trabalho propõe um modelo matemático para otimizar a cadeia de suprimentos, integrando o sequenciamento das frentes de colheita nos talhões com o planejamento do processo de moagem para a produção de açúcar, bioetanol e energia elétrica. São incorporadas janelas de manutenção preventiva da moenda e, consequentemente, dos equipamentos utilizados na colheita e no transporte. O objetivo consiste em minimizar os custos de deslocamento das frentes e de manutenção preventiva, considerando restrições operacionais e atendendo a demanda dos produtos sem atrasos. Foram realizados testes numéricos com instâncias que simulam a realidade em usinas de pequeno e médio porte. Os resultados preliminares, que se mostraram promissores, são apresentados e discutidos.

PALAVRAS CHAVE. Cana-de-açúcar. Dimensionamento de lotes. Sequenciamento da colheita.

AG&MA – PO na Agricultura, Meio Ambiente e Sustentabilidade.

ABSTRACT

The harvest is a complex logistical operation in the sugarcane supply chain, and its synchronization with other operations is crucial to ensure an efficient flow of raw material from farms to mills, avoiding resource waste. This study proposes a mathematical model to optimize the supply chain, integrating the sequencing of harvest fronts in plots with the planning of the milling process for sugar, bioethanol, and electricity production. Preventive maintenance windows for the mill and,

https://proceedings.science/p/212139?lang=pt-br

consequently, for equipment used in harvesting and transportation are incorporated. The objective is to minimize the costs of front displacement and preventive maintenance, considering operational constraints and meeting product demand without delays. Numerical tests were conducted with instances simulating the reality of small and medium-sized mills. The preliminary results, which proved promising, are presented and discussed.

KEYWORDS. Sugarcane. Lot-sizing problem. Harvest scheduling.

AG&MA – OR in Agriculture, Environment and Sustainability.

1. Introdução

A cana-de-açúcar é um dos pilares da economia brasileira, sendo o Brasil o maior produtor mundial, com 715 milhões de toneladas colhidas anualmente, segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO, 2025]. A Figura 1 expõe o crescimento exponencial do plantio e exploração da cana-de-açúcar como fonte de energia alternativa à fonte fóssil. O Brasil produz mais cana-de-açúcar que todos os outros países somados e, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia, [UNICAdata, 2025], esse setor gera 2,2 milhões de empregos diretos e indiretos e contribui com 7% do PIB nacional, destacando-se na produção de açúcar, bioetanol e bioenergia. Além disso, a cana desempenha um papel estratégico na transição para fontes energéticas renováveis, reduzindo emissões de carbono por meio da fotossíntese e da utilização de subprodutos como o bagaço para cogeração de energia.

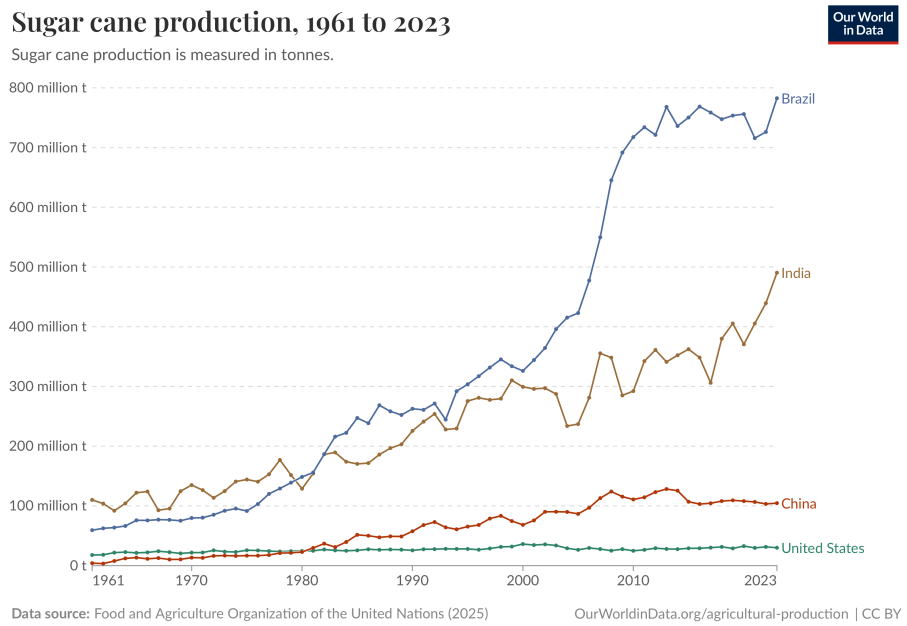


Figura 1: Produção mundial da cana-de-açúcar. [FAO, 2025], acessado em 13 de abril de 2025

A cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar expõe a complexa interdependência entre as fases de plantio à comercialização, passando pela colheita, transporte e processamento. Após a colheita, a cana deve ser transportada para a usina para iniciar o processamento. Caso contrário, inicia-se o seu processo de perda dos Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), o principal fator de produtividade dos coprodutos. Além disso, a curva da maturidade da cana-de-açúcar impõe conexões adicionais entre o plantio e a colheita, proporcionando perdas ou ganhos na produtividade de sacarose.

Vários trabalhos da literatura propõem modelos matemáticos e abordagens de solução para otimizar as etapas envolvidas na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. [Teixeira et al., 2023] revisaram 56 trabalhos publicados no período de 2003 a 2021, identificando 13 sobre plantio, 28 sobre colheita, 15 sobre transporte, 15 sobre processamento e 10 sobre comercialização. Na colheita, 28 trabalhos abordam alocação de frentes e logística. No processamento, 12 modelos determinísticos focam em minimização de custos (3), maximização de receitas (5) ou expedição (2). A maioria dos trabalhos trata do planejamento no nível tático em períodos e poucos no nível operacional em subperíodos.

Baseado no Problema Geral de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento em Linhas Paralelas [Meyr, 2002], [Junqueira, 2017] e [Junqueira, 2019] desenvolveram modelos matemáticos para otimizar o sequenciamento das frentes de colheita integrado ao transporte e processamento da cana-de-açúcar. Questões logísticas são consideradas, levando-se em conta as restrições operacionais impostas pelo processo. [Florentino, 2020] propuseram um modelo de otimização linear e inteira para tratar de forma integrada os problemas de seleção de variedades de cana-de-açúcar e de determinação do melhor período para o plantio e para a colheita, a fim de otimizar a produção, atendendo às principais restrições impostas pela usina. Em [Poltroniere, 2021] foi proposto um modelo de otimização linear inteira mista para o planejamento integrado do plantio e da colheita de variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia, visando maximizar a produção de sacarose e fibra. Aliano et al. (2022) também consideraram variedades de cana-de-açúcar e de cana-energia, propondo uma abordagem de modelagem e solução multiobjetivo, visando maximizar os volumes de produção e, por outro lado, minimizar as frentes de colheita e os custos de transporte das máquinas de colheita. Um modelo multiobjetivo também foi proposto em Aliano et al. (2023), mas utilizando o conceito de graus-dia para medir a maturação da cana, se diferenciando de estudos anteriores, neste sentido. Tolentino [2024] propuseram um modelo bi-objetivo que integra as decisões de plantio e colheita tomadas sobre as diferentes variedades de cana-de-açúcar e cana-energia, mas considerando vários ciclos (safras) de colheita. O modelo maximiza os volumes de produção de sacarose e fibra e, simultaneamente, minimiza os custos operacionais. Em tais pesquisas, os autores conseguem resolver de forma exata os problemas de pequeno porte. Para problemas de grande porte, foram desenvolvidas heurísticas baseadas nos conceitos relax-and-fix e fix-and-optimize, bem como metaheurísticas baseadas em Algoritmos Genéticos e Busca Local, obtendo-se soluções aproximadas de boa qualidade.

Outras abordagens recentes incorporam incertezas, buscando considerar aspectos que abordagens determinísticas não permitem. [Chavez, 2020] desenvolveram um modelo de otimização estocástica multiobjetivo, com o objetivo de fornecer um cronograma adequado e detalhado para a colheita, manutenção dos equipamentos e transporte da cana do campo para a usina. O efeito da incerteza na produtividade da cana-de-açúcar e na alocação de recursos é analisado. Além disso, os autores destacam que o modelo multiobjetivo inclui uma abordagem sustentável, buscando equilibrar as metas econômicas, ambientais e sociais. Paiva et al. (2023) abordaram a colheita da cana-de-açúcar por meio de uma modelagem em dois níveis. O primeiro nível, estratégico, corresponde ao planejamento agregado da colheita, considerando todas as usinas da cooperativa, com foco nas principais decisões mensais. No segundo nível, as decisões são menos agregadas e consideram o planejamento semanal da colheita, impondo metas de produção para cada usina. Uma análise de otimização robusta é realizada para preços de produtos e rendimentos industriais, buscando investigar seus impactos na cadeia de suprimentos.

Apesar dos avanços em modelos matemáticos para o planejamento agrícola, persistem lacunas na integração de aspectos logísticos e operacionais, como, por exemplo, o sequenciamento das frentes de colheita e a programação de manutenções nas usinas durante a safra. Entrevistas com gestores de uma usina no interior do Estado de São Paulo revelaram que a falta de janelas planejadas para manutenção pode comprometer a eficiência do processamento, enquanto a colheita descoordenada aumenta custos logísticos e diminui a produtividade da cana. Inspirado no trabalho de [Meyr, 2002], este trabalho propõe um modelo matemático que integra o problema de sequenciamento das frentes de colheita, considerando os períodos de planejamento divididos em subperíodos, com o planejamento do processamento da cana-de-açúcar na usina, incorporando a possibilidade de janelas de manutenção preventiva da moenda e, consequentemente, dos equipamentos utilizados na colheita e no transporte. Programar paradas durante o período de safra cria espaço para tratar in-

certezas e evita os desperdícios advindos de manutenções corretivas, como a elevação do consumo de combustíveis. O objetivo consiste em minimizar os custos de deslocamento das frentes entre os talhões e de manutenção preventiva, considerando restrições operacionais e atendendo à demanda de açúcar, bioetanol e energia elétrica sem atrasos.

Este trabalho está organizado como segue. A Seção 2 traz uma descrição sucinta do problema. A Seção 3 apresenta e detalha o modelo matemático proposto. A Seção 4 traz os testes numéricos realizados e uma análise dos resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as propostas de continuidade desta pesquisa.

2. Descrição do problema

A cana que abastece uma usina é plantada em fazendas, divididas em um conjunto de áreas menores chamadas talhões, de 18 a 20 hectares, em formatos quase geométricos, de maneira a facilitar as manobras das frentes de colheita e escoamento. Em cada talhão é plantada uma única variedade de cana. As variedades possuem diferentes concentrações de sacarose e fibra, dentre outras características que devem ser consideradas para que o manejo atinja sua melhor produtividade. O pico de maturação da cana-de-açúcar consiste no período em que ocorre a maior produtividade de sacarose. Na prática, nem sempre é possível realizar a colheita no período de máxima maturação da variedade plantada, pois a usina precisa atender demandas de produção durante os períodos de colheita, além das limitações operacionais como, por exemplo, capacidade de moagem do maquinário.

As frentes de trabalho que realizam a colheita se deslocam entre os talhões, havendo um custo de deslocamento que varia de acordo com a distância percorrida e condições das vias. Dessa forma, um dos desafios no planejamento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar consiste em sequenciar os deslocamentos das frentes nos talhões de modo a minimizar os custos envolvidos e atender a demanda da usina nos períodos.

A Figura 2, adaptada de [Teixeira et al., 2023], ilustra as fases da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. Um planejamento eficiente da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar busca o sincronismo entre as fases, pois qualquer desvio pode comprometer a entrega do ATR. Entre o plantio e a colheita, a curva de maturidade da variedade de cana plantada no talhão aponta para o período de melhor entrega do ATR. Após a colheita, o transporte e o processamento da cana deve ocorrer em menos de 24 horas para se evitar outras perdas. O processamento deve atender às demandas dos produtos finais, como açúcar, bioetanol e bagaço, sem atrasos, respeitando-se a capacidade de moagem e processamento da usina.



Figura 2: Cadeia de Suprimentos da Cana-de-Açúcar, adaptada de [Teixeira et al., 2023].

Esta pesquisa foca nas fases de colheita e processamento da cana e na produção para a comercialização de açúcar, bioetanol e energia elétrica, com ênfase na otimização do sequenciamento de frentes de trabalho para a colheita dos talhões e na programação de janelas para manutenção preventiva. A complexidade do problema decorre de fatores como a sazonalidade da safra, a variação na maturação da cana entre talhões, a capacidade limitada de moagem das usinas e a necessidade de paradas planejadas para manutenção de equipamentos, que, se não gerenciados adequadamente, podem levar a interrupções custosas.

O problema abordado consiste em determinar a alocação e o sequenciamento das frentes de colheita nos talhões, além da programação de subperíodos dedicados à manutenção preventiva,

de modo a minimizar os custos logísticos e maximizar a eficiência operacional, respeitando as restrições de capacidade de moagem e as demandas de mercado por açúcar, bioetanol e energia elétrica gerada pelo bagaço.

Na modelagem proposta, consideram-se talhões com diferentes áreas e produtividades, frentes de colheita com capacidade limitada e um horizonte de planejamento dividido em períodos e subperíodos. Cada talhão deve ser colhido por uma única frente de colheita e em um único subperíodo, incorrendo em custo logístico. A moagem da cana é limitada pela capacidade da usina, e pelo menos um subperíodo por período deve ser reservado para manutenção preventiva, garantindo a continuidade operacional. A produção de cana é alocada para açúcar ou bioetanol, com o bagaço utilizado para gerar energia elétrica, atendendo às demandas de mercado e gerenciando estoques ao longo do horizonte de planejamento.

3. Modelagem Matemática

O modelo de programação linear inteira mista, detalhado a seguir, foi formulado com base no GLSPPL, e adaptado do trabalho de [Meyr, 2002] para o contexto agrícola. Variáveis binárias são consideradas para representar a alocação e o sequenciamento das frentes de colheita nos talhões e a ocorrência ou não de manutenções. O objetivo consiste em reduzir os custos de deslocamento das frentes de colheita entre os talhões e, bom como os custos com as manutenções preventivas dentro do horizonte de planejamento. Além de garantir os limites de capacidades da central de processamento e das frentes de colheita, o modelo evita subperíodos sem atividades de colheita e manutenção e balanço adequado dos estoques de açúcar, bioetanol e bagaço.

Índices:

- $i \in F$, sendo F o conjunto de frentes de colheita;
- $j, k \in J$, sendo J o conjunto de talhões disponíveis para a colheita;
- $t \in T$, sendo T o conjunto de períodos do horizonte de planejamento;
- $s \in S_t$ ou $s \in S$, sendo S_t o conjunto de subperíodos do período t e $S = \cup_{t \in T} S_t$ o conjunto dos subperíodos do horizonte de planejamento.

Parâmetros:

- c^d_{jk}: custo do deslocamento da frente de colheita do talhão j para o talhão k;
- c^m_s: custo associado à parada para manutenção na usina no subperíodo s;
- A_j: área do talhão j (hectares);
- P_j: produtividade da variedade de cana-de-açúcar plantada no talhão j (ton. por hectare);
- C_t: capacidade de moagem da usina no período t (ton);
- D^a_t: demanda de açúcar no período t (ton);
- D^e_t: demanda de bioetanol no período t (ton);
- D^b_t: demanda de bagaço para a geração de energia elétrica no período t (ton);
- f^a: fator de conversão de cana processada em açúcar;
- f^e: fator de conversão de cana processada em bioetanol;

- f^b: fator de conversão de cana processada em bagaço;
- I_0^a, I_0^e, I_0^b: estoques iniciais de açúcar, bioetanol e bagaço, respectivamente (ton).

Variáveis de Decisão

- $x_{ijs} = 1$ se a frente i colhe o talhão j no subperíodo s e 0, caso contrário;
- $y_s = 1$ se há manutenção no subperíodo s e, 0 caso contrário;
- $z_{ijks} = 1$ se a frente i se desloca do talhão j para o talhão k no subperíodo s e 0, caso contrário;
- w_s^a: quantidade de cana (ton) destinada para a produção de açúcar no subperíodo s;
- w_s^e: quantidade de cana (ton) destinada para a produção de bioetanol no subperíodo s.
- I_t^a: estoque de açúcar (ton) no final do período t;
- I_t^e: estoque de bioetanol (m^3), no final do período t;
- I_t^b: estoque de bagaço (ton) no final do período t.

Modelo matemático:

$$\text{Min} \sum_{i\in F}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{s\in S} c_{jk}^d z_{ijks} + \sum_{s\in S} c_s^m y_s \tag{1}$$

sujeito a:

$$\sum_{i\in F}\sum_{j\in J} P_j A_j x_{ijs} \le \frac{C_t}{|S_t|}(1-y_s), \quad t\in T, s\in S_t, \tag{2}$$

$$\sum_{s\in S_t} y_s \ge 1, \quad t\in T, \tag{3}$$

$$\sum_{i\in F}\sum_{j\in J} x_{ijs} + |F|\cdot y_s \le |F|, \quad s\in S, \tag{4}$$

$$\sum_{i\in F}\sum_{s\in S} x_{ijs} \le 1, \quad j\in J, \tag{5}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ijs} \le 1, \quad i\in F, \quad s\in S, \tag{6}$$

$$z_{ijks} \ge x_{i,j,s-1} + x_{iks} - 1, \quad i\in F, \quad j,k\in J,\ j\ne k, \quad s\in S,\ s\ge 2, \tag{7}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{\substack{k\in J\\ k\ne j}} z_{ijks} \le 1, \quad i\in F, \quad s\in S,\ s\ge 2, \tag{8}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ijs-1} + y_{s-1} \ge \sum_{j\in J} x_{ijs} + y_s, \quad i\in F, \quad s\in S,\ s\ge 2, \tag{9}$$

$$\sum_{i\in F}\sum_{j\in J} P_j A_j x_{ijs} = w_s^a + w_s^e, \quad s\in S, \tag{10}$$

$$\sum_{s \in S_t} f^a w_s^a + I_{t-1}^a - I_t^a = D_t^a, \quad t \in T, \tag{11}$$

$$\sum_{s \in S_t} f^e w_s^e + I_{t-1}^e - I_t^e = D_t^e, \quad t \in T, \tag{12}$$

$$\sum_{i \in F} \sum_{j \in J} f^b P_j A_j x_{ijs} + I_{t-1}^b + I_t^b = D_t^b, \quad t \in T, \tag{13}$$

$$x_{ijs}, z_{ijks}, y_s \in \{0,1\}, \quad i \in F, \quad j,k \in J, \quad s \in S, \tag{14}$$

$$w_s^a, w_s^e \geq 0, \quad s \in S, \qquad I_t^a, I_t^e, I_t^b \geq 0, \quad t \in T. \tag{15}$$

A função objetivo (1) minimiza os custos de deslocamento das frentes de colheita entre os talhões e os custos associados às paradas para manutenções, evitando interrupções desnecessárias da colheita e da moagem da cana. As restrições (2) limitam a quantidade de cana colhida em cada subperíodo com base na capacidade de moagem da usina, para subperíodos sem manutenção. As restrições (3) garantem que cada período tenha pelo menos um subperíodo dedicado à manutenção preventiva, atendendo à necessidade de paradas planejadas nas usinas durante a safra. As restrições (4) impedem colheitas em subperíodos com manutenção. Se $y_s = 1$, o termo $|F| \cdot y_s$ obriga que a soma das variáveis relativas às colheitas (x_{ijs}) seja zero, permitindo até $|F|$ frentes ativas quando $y_s = 0$. As restrições (5) asseguram que cada talhão seja colhido no máximo uma vez durante o horizonte de planejamento. As restrições (6) restringem cada frente a colher no máximo um talhão por subperíodo, evitando alocação múltipla e respeitando a capacidade operacional das equipes. As restrições (7) e (8) definem o sequenciamento dos deslocamentos das frentes de colheita entre os talhões. As restrições (7) relacionam as variáveis de deslocamento das frentes entre os talhões, z_{ijks}, com as variáveis de colheita, x_{ijs}; as restrições (8) garantem que cada frente se desloque, no máximo, uma vez entre dois talhões em cada subperíodo. As restrições (9) priorizam a colheita no início do horizonte de planejamento, favorecendo que subperíodos ociosos para cada frente de colheita, se houver, ocorram no final da safra. As restrições (10) garantem que, em cada subperíodo, toda cana colhida seja destinada para a produção de açúcar ou bioetanol. As restrições (11)-(13) visam o atendimento da demanda de açúcar, etanol e bagaço (para a produção de energia elétrica) nos períodos, respectivamente. Tais restrições fazem o balanceamento do estoque desses produtos entre os períodos do horizonte de planejamento. Por fim, as restrições (14) e (15) definem o domínio das variáveis de decisão.

4. Experimentos Computacionais

Testes computacionais foram realizados para avaliar o desempenho do modelo proposto. A implementação foi realizada na linguagem de programação Julia, versão 1.11.5, utilizando o solver Gurobi Optimizer, versão 12.0.1. O ambiente computacional notebook VSCode 1.96 foi utilizado como ferramenta de documentação de versões e edição, executado em um Apple M1 com 8 núcleos físicos. Entretanto, as execuções foram conduzidas via terminal.

Os dados utilizados nos testes computacionais foram gerados a partir de entrevistas com gestores de uma usina sucroalcooleira localizada no interior do estado de São Paulo, complementadas por informações públicas da Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB, 2025] e da [UNICAdata, 2025]. Os custos de deslocamento considerados variam de 1 a 9 e o custo de manutenção preventiva foi fixado em 100 por subperíodo. Quatro instâncias foram simuladas, variando o número de frentes de colheita, períodos, subperíodos e talhões, conforme descrito na Tabela 1. Cada instância foi projetada para representar uma parte de uma safra de cana-de-açúcar, com configurações que refletem a complexidade de uma usina sucroalcooleira típica no Brasil.

Instâncias	Número Frentes	Número Períodos	Número Subperíodos por Período	Número Talhões
1	2	8	4	30
2	2	8	4	48
3	4	8	8	96
4	4	8	8	160

Tabela 1: Parâmetros de entrada para cada instância.

Nos testes realizados, foram considerados tempo limite de 7.200 segundos para todas as instâncias. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para a função objetivo, em unidades monetárias, tempo computacional, em segundos, e GAP, em %, nas soluções de cada instância. Nas instâncias mais ajustadas entre a relação número de frentes, períodos, subperíodos e talhões, identificou-se menos lacunas de atividades, isto é, J deve ser mais próximo a $F * (St - T)$. O GAP da instância 4 sugere que, utilizando um tempo limite maior, este pode ser melhorado.

Instâncias	Função Objetivo (UM)	Tempo (s)	GAP (%)
1	1414	5	1,2
2	834	107	4,2
3	3370	605	2,1
4	1878	7278	9,5

Tabela 2: Resultados das instâncias de teste, com valor da função objetivo e tempo de execução.

A seguir, detalhamos as soluções obtidas para a instância 2. A Tabela 3 apresenta os impactos práticos significativos para a otimização da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, com benefícios operacionais, econômicos e estratégicos. A análise dos resultados apresentados na Tabela 2, da instância 2, lista os talhões colhidos. Um calendário de agendas das frentes de colheita nos talhões, nas janelas dos períodos e subperíodos. Em azul, com a letra M, estão destacados os subperíodos dedicados à manutenção preventiva, que foram determinados com base na distribuição da carga de colheita, priorizando períodos com menor impacto na produção. Os dois subperíodos finais, 31 e 32, sem número de talhão, são determinados pelas restrições (9) que concentram os subperíodos ociosos para o final do horizonte de planejamento.

A Figura 3, evidencia a capacidade do modelo em melhorar a eficiência da gestão de colheita, processamento e manutenção preventiva em usinas sucroalcooleiras, com reflexos diretos na redução de custos e no aumento da robustez operacional. A figura expõe o total de cana utilizada em cada período. Em verde, o montante de cana utilizada para atender à demanda de bioetanol e em azul, para atender à demanda de açúcar. A integração de decisões táticas (alocação mensal) e operacionais (sequenciamento diário) permitiu uma distribuição equilibrada da colheita ao longo dos períodos, respeitando a capacidade de moagem e evitando gargalos no processamento. Na instância 1 (30 talhões), a alocação de 25% dos subperíodos para manutenção preventiva garantiu paradas planejadas sem comprometer a produção, enquanto na instância 4 (160 talhões), a escalabilidade do modelo manteve a eficiência mesmo com maior complexidade.

As reservas de subperíodos para manutenções preventivas minimizaram interrupções não planejadas, que representam altos custos para a usina, segundo afirmação de gestores entrevistados. A garantia de pelo menos um subperíodo de manutenção por período (restrição 4) assegurou a

Períodos		1				2				3				4			
Subperíodos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Frente	1	46	M	10	16	M	9	17	28	M	1	44	21	M	22	43	42
Frente	2	35	M	13	32	M	40	45	19	M	12	14	31	M	34	11	15
Períodos		5				6				7				8			
Subperíodos		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Frente	1	3	23	M	8	37	M	4	41	M	6	39	25	M	29		
Frente	2	30	36	M	18	27	M	2	5	M	20	26	38	M	47		

Tabela 3: Solução obtida para a instância 2.

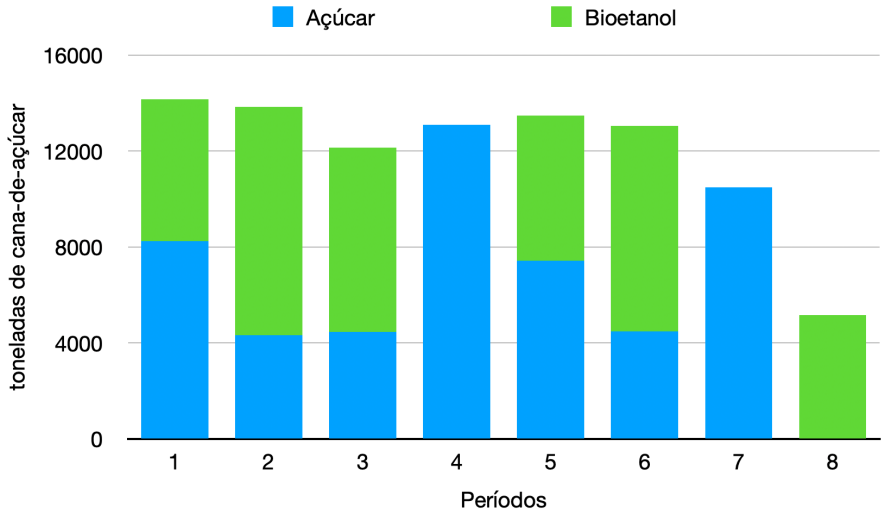


Figura 3: Utilização de cana-de-açúcar para produzir açúcar e/ou bioetanol na instância 2.

continuidade operacional, com alocação de até 26,5% do tempo total para paradas planejadas nas instâncias testadas. Essa estratégia reduziu o risco de falhas em equipamentos de colheita, transporte e processamento, aumentando a confiabilidade da usina.

A Figura 4, em escala logarítmica, ilustra a evolução dos estoques de açúcar, bioetanol e bagaço ao longo dos períodos, demonstrando que o modelo atende às demandas de mercado enquanto mantém níveis de estoque adequados.

Escalabilidade e Aplicabilidade: A robustez do modelo foi confirmada pela sua capacidade de lidar com instâncias de diferentes escalas, desde pequenas operações (instância 1, 30 talhões) até configurações mais complexas (instância 4, 160 talhões). A redução do GAP computacional (Tabela 2) em instâncias maiores, como a instância 4 (9,5% de GAP em 7200 segundos, tempo limite, e 7,2% em 20033 segundos), demonstra a eficiência do solver Gurobi e a adequação da formulação matemática para problemas de pequeno e médio porte. Esse desempenho sugere que o modelo possa ser aplicado em usinas de grande porte, mas com a possível necessidade de um procedimento heurístico para obtenção da solução em um tempo computacional aceitável.

Contribuições Estratégicas: Além dos benefícios operacionais, o modelo oferece su-

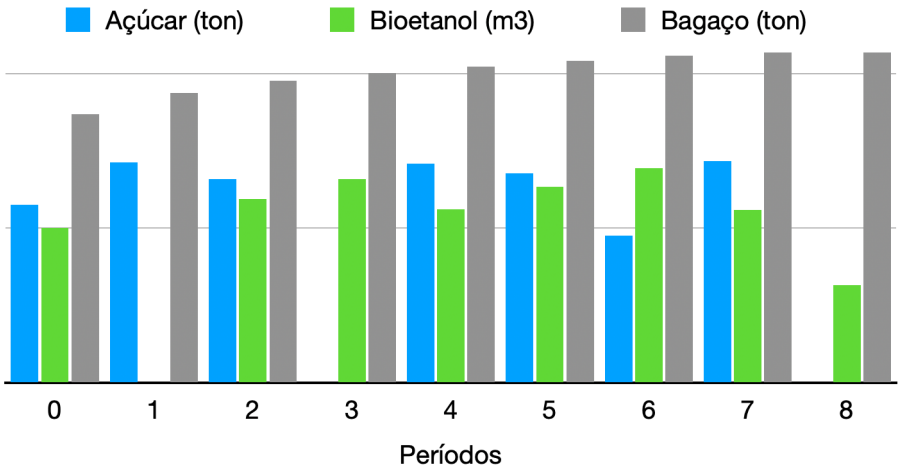


Figura 4: Estoques de açúcar, bioetanol e bagaço no instância 2.

porte à tomada de decisão estratégica, permitindo que gestores identifiquem os melhores subperíodos para colheita e manutenção, otimizem a alocação de recursos e antecipem a produção para liberar capacidade de processamento. Essa flexibilidade é particularmente valiosa em um setor sujeito à sazonalidade e a flutuações de mercado, como destacado por [Teixeira et al., 2023].

Em resumo, os impactos práticos do modelo incluem a redução de custos logísticos, o aumento da eficiência de moagem, a gestão eficaz de manutenções preventivas e estoques, além da escalabilidade para diferentes escalas operacionais. Esses resultados posicionam o modelo como uma ferramenta valiosa para usinas sucroalcooleiras, promovendo maior competitividade e sustentabilidade no setor, com potencial para futuras expansões que incorporem incertezas e objetivos ambientais, conforme sugerido na seção de conclusões.

5. Conclusão e Propostas Futuras

Embora os resultados sejam promissores, o modelo proposto considera várias simplificações que devem ser analisadas no decorrer desta pesquisa. Inicialmente, a modelagem deve ser expandido para considerar o teor de sacarose e a produtividade da variedade de cana plantada em cada talhão buscando, assim, planejar a colheita o mais próximo possível do pico de maturação da cana, obtendo uma maior produtividade em relação à sacarose. Este objetivo é conflitante com o melhor sequenciamento das frentes de colheita, considerando seus custos de deslocamento. Assim outros objetivos devem ser incorporados na função objetivo, como a maximização do teor de sacarose, além da minimização de impactos ambientais, como a redução da emissão de gases, pelas equipes de colheita e pelo centro de processamento. Além disso, a quantidade de testes realizados até o momento foi limitada, sendo necessário gerar um conjunto de testes mais abrangentes, buscando a validação da modelagem proposta.

Além disso, a reformulação do modelo como multiobjetivo é uma perspectiva promissora. Esse tipo de abordagem pode equilibrar objetivos econômicos e de sustentabilidade, refletindo as prioridades do setor sucroenergético. Para lidar com a complexidade de problemas multiobjetivo em larga escala, sugere-se o uso de meta-heurísticas avançadas, como o algoritmo NSGA-III, que oferece maior eficiência na geração de frentes de Pareto em comparação com métodos exatos para instâncias com centenas de talhões e subperíodos.

Outra característica atual do modelo consiste no fato de considerar parâmetros determinísticos, como produtividade fixa por talhão e preços constantes, o que pode limitar sua apli-

cabilidade em cenários com incertezas climáticas ou de mercado. Dessa forma, uma possibilidade promissora é propor uma abordagem estocástica para o problema, considerando diferentes cenários. Enfim, essas expansões são possibilidades que visam tornar o a abordagem mais robusta e alinhada com os desafios reais da indústria.

Referências

Chavez, M. (2020). Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 276(2020):123305.

CONAB (2025). Safra de cana-de-açúcar. `https://www.conab.gov.br/tags/safra_de_cana-de-acucar/1/`. acessado em 1 de maio de 2025.

FAO (2025). Sugar cane production. `https://ourworldindata.org/grapher/sugar-cane-production?tab=chart`. acessado em 13 de abril de 2025.

Florentino, H. (2020). An optimization model for combined selecting, planting and harvesting sugarcane varieties. *Annals of Operations Research*, 314(2022):451–469.

Junqueira, R. (2017). Abordagens de otimização para a programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar. *Gestão e Produção, São Carlos*, 24(2):407–422.

Junqueira, R. (2019). Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 213(2019):150–160.

Meyr, H. (2002). Simultaneouslotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, 139(2002):277–292.

Poltroniere, S. (2021). Integrated planning for planting and harvesting sugarcane and energy-cane for the production of sucrose and energy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184(2021): 105956.

Teixeira, E. S., Rangel, S., Florentino, H. O., e de Araujo, S. A. (2023). A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. *INTERNATIONAL TRANSACTIONS IN OPERATIONAL RESEARCH*, 30(2023):1755–1788.

Tolentino, G. (2024). A MIP-heuristic approach for solving a bi-objective optimization model for integrated production planning of sugarcane and energy-cane. *Annals of Operations Research*, 10479(024):06229–5.

UNICAdata (2025). Relatório de produção do observatório da cana e bioenergia. `https://unicadata.com.br`. acessado em 1 de maio de 2025.