



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP  
Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA  
Departamento de Engenharia de Produção – DEENP  
Campus João Monlevade



# O PROBLEMA INTEGRADO DE PLANTIO DE CANA DE AÇÚCAR E RECUPERAÇÃO DE PALHIÇO

*Eduardo Henrique Martinez Fragoso*

**Orientadora:** *Profa. Dra. Mônica do Amaral*

João Monlevade, 2013



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



*Eduardo Henrique Martinez Fragoso*

# **O PROBLEMA INTEGRADO DE PLANTIO DE CANA DE AÇÚCAR E RECUPERAÇÃO DE PALHIÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia de Produção.

**Orientadora:** *Profa. Dra. Mônica do Amaral*

**João Monlevade**

ICEA – UFOP

Abril 2013



## ATA DE DEFESA

No dia 26 do mês de abril de 2013, às 17 h horas e 30 minutos, na sala 102 do prédio C deste Instituto, foi realizada a defesa de Monografia pelo formando **Eduardo Henrique Martinez Fragoso**, sendo a comissão examinadora constituída pelas professoras: Profa. Dra. Mônica do Amaral e Profa. MSc. Alana Deusilan Sester Pereira. O candidato apresentou a monografia intitulada: "*O problema integrado de plantio de cana e recuperação de palhico*". A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com a nota 8,5 (oito virgula cinco), concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporação das sugestões no texto final. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

João Monlevade, 26 de abril de 2013.

Profa. Dra. Mônica do Amaral  
Professora Orientadora

Profa. MSc. Alana Deusilan Sester Pereira  
Professora Convidada

Eduardo Henrique Martinez Fragoso  
Formando



### TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “O problema integrado de plantio de cana de açúcar e recuperação do palhiço” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 01 de abril de 2013



---

Eduardo Henrique Martinez Fragoso



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



**AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus pais e minha irmã pelo apoio durante os momentos mais difíceis.*

*Agradeço à Profa. Dra. Mônica do Amaral pela compreensão e dedicação.*

*Aos amigos e amigas pelo auxílio.*

*Aos professores da Universidade Federal de Ouro Preto pelos ensinamentos.*



## **RESUMO**

A cana de açúcar tem grande destaque no agronegócio brasileiro, não só no que diz respeito às produções de açúcar e álcool, mas também no que se refere ao uso do bagaço da cana e do palhiço como biomassa na geração de energia elétrica. O palhiço é recolhido na lavoura, após a colheita realizada de forma mecanizada. Depois de enleirado e enfardado, o palhiço é transportado até a usina para a sua utilização em processos de geração de energia. O teor calorífico do palhiço, assim como o balanço energético da cana, depende da combinação da variedade plantada com o tipo de solo disponível em cada talhão da lavoura. Assim, foi proposto um modelo de otimização para integrar as decisões de escolha das variedades de cana para plantio com o recolhimento do palhiço recuperado após a colheita da cana. Alguns testes foram realizados, mostrando a viabilidade prática de uso do modelo proposto. Como recomendações, sugere-se a realização coleta de dados de campo para melhor avaliação dos resultados e a implementação de um modelo dinâmico, adaptado para a realização de pousio e renovação do canavial, de acordo com as condições de solo a cada colheita realizada.

**Palavras-chaves:** cana-de-açúcar, palhiço, programação linear.



### **ABSTRACT**

*Sugar cane has great prominence in the Brazilian agribusiness, not only with regard to the sugar and alcohol production, but also as regards the use of sugarcane bagasse and straw as biomass to generate electricity. The straw is collected in the fields after the harvest carried out mechanically. After enleirado and baled the straw is transported to the plant for use in power generation processes. The calorific content of straw, as well as the energy balance of sugarcane depends on the combination of the variety planted in the soil available in each block of the crop. It was therefore proposed an optimization model to integrate the decisions of choice of sugarcane varieties for planting with the collection of recovered straw after harvest sugarcane. Some tests were performed, showing the practical feasibility of using the proposed model. As recommendations, we suggest conducting collection of field data to better evaluate the results and the implementation of a dynamic model, adapted to the realization of fallow and renewal of cane fields, according to the soil conditions*

**Key words:** *sugarcane, straw, linear programming.*



## SUMÁRIO

<b>1. Sumário</b>	
2. INTRODUÇÃO .....	6
2.1. Objetivos.....	8
2.1.1. Objetivo geral .....	9
2.1.2. Objetivos específicos .....	9
2.2. Justificativa.....	9
2.3. Estrutura do Trabalho .....	10
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	11
4. METODOLOGIA .....	12
5. O PROBLEMA INTEGRADO DE PLANTIO DE CANA DE AÇÚCAR E RECUPERAÇÃO DE PALHIÇO .....	14
6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS .....	19
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
8. APÊNDICE I.....	28
9. APÊNDICE II .....	30
10. APÊNDICE III .....	35



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1	Indicadores econômicos para as safras 2011/2012 e 2012/2013 .....	6
Figura 2	Colheita realizada por tipo no estado de São Paulo, em mil hectares .....	8
Figura 3	Fases de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação .....	12



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	Dados das variedades de cana .....	19
Tabela 2	Outros dados necessários para aplicação do modelo .....	20
Tabela 3	Dados dos talhões .....	20
Tabela 4	Espécie x Compatibilidade do solo .....	21
Tabela 5	Tipo de Solo x Talhão .....	22
Tabela 6	Resultados do modelo em relação à alocação das variedades nos talhões ...	23



## 1. INTRODUÇÃO

A cana de açúcar (*Saccharum spp.*) é uma espécie vegetal da família das gramíneas, que vem sendo cultivada desde a antiguidade (LEÃO, 2002, *apud* SILVA, 2009). Atualmente o Brasil se destaca mundialmente no plantio da cana de açúcar, produzindo principalmente açúcar e álcool combustível. Além desses principais produtos, diversos subprodutos têm sido obtidos do processo industrial da cana, em virtude dos resultados de estudos que visam melhorar o nível de aproveitamento de resíduos industriais. Dentre esses produtos, destacam-se a cachaça, a levedura de cana, a vinhaça, a torta de filtro, o bagaço e o palhiço (TEIXEIRA et al., 2007, *apud* SILVA, 2009).

Em termos econômicos, a indústria canavieira tem grande destaque no agronegócio brasileiro, como pode ser visto na Figura 1. Com uma produção em torno de 500.000 t anuais, esse setor segue em larga expansão, motivado principalmente pelo consumo de álcool combustível e pelo mercado de açúcar, sendo a produção nacional quase que igualmente dividida entre esses dois produtos.

Produtos	A	B	B/A (%)
	Valores finais safra 2011/2012	estimativa safra 2012/2013	
<b>MOAGEM</b>			
Cana-de-açúcar (mil toneladas)	493.264	509.000	↑ 3,19%
<b>PRODUÇÃO</b>			
Açúcar (mil toneladas)	31.308	33.100	↑ 5,72%
Etanol anidro (milhões de litros)	7.466	6.950	↓ -6,91%
Etanol hidratado (milhões de litros)	13.080	14.536	↑ 11,14%
Etanol total (milhões de litros)	20.546	21.486	↑ 4,58%
<b>QUALIDADE DA CANA</b>			
ATR (mil toneladas)	67.840	71.260	↑ 5,04%
Kg de ATR / toneladas de cana	137,53	140,0	↑ 1,79%
<b>MIX DE PRODUÇÃO</b>			
Mix (%) açúcar	48,43%	48,75%	↑
Mix (%) etanol	51,57%	51,25%	↓
<b>MERCADO</b>			
Açúcar disponível exportação (mil toneladas)	22.119	24.000	↑ 8,50%
Exportação de etanol (milhões de litros)	1.768	1.700	↓ -3,85%

Figura 1 – Indicadores econômicos para as safras 2011/2012 e 2012/2013

Fonte: UNICA (2012)



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



Um outro produto que parece estar definitivamente incorporado à indústria canavieira é a energia elétrica. De acordo com dados da ÚNICA (2008), na safra 2006/2007 já foram gerados, em média, 1.200 KWh, o que equivale à geração de energia da Usina Nuclear de Angra III. Com um aumento crescente desde então, estima-se que na safra 2012/2013 possam ser gerados 5.300 KWh médios, obtidos apenas com a utilização do bagaço da cana. No entanto, caso sejam utilizadas outras fontes de biomassa na geração de energia, como por exemplo, 50% do palhiço gerado pela colheita mecanizada, esse valor poderia chegar a 10.100 KWh, um valor superior à capacidade média da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

O palhiço pode ser definido como sendo o material remanescente sobre o solo após a colheita, principalmente a mecanizada, sendo constituído de folhas, palhas e ponteiros (RIPOLI, 2004, apud GERMEK et al., 2005). Florentino (2007) afirma que ainda são encontradas grandes dificuldades para o aproveitamento desse material para geração de energia, como a falta de tecnologia apropriada para a coleta e processamento do palhiço, bem como o alto custo envolvido na etapa de transporte. Porém, o palhiço não pode ser abandonado no solo após a colheita, pois a sua presença cria condições propícias ao aparecimento da cigarra da raiz e também pode provocar o atraso na brota da cana, o que obriga à sua retirada da lavoura (TOLENTINO, 2007).

No estado de São Paulo, a Lei Estadual N<sup>o</sup> 11.241, de 19 de setembro de 2002, regulamenta o fim da prática da queima da cana. Até 2021, as áreas com declividade menor ou igual a 12%, que são consideradas mecanizáveis, e maior do que 150 ha devem se adequar à lei, ficando as demais áreas sujeitas ao fim da queima até 2031, sendo especificados os casos em que a área cultivada tem declividade acima de 12% e em áreas menores que 150 ha. Entretanto, em junho de 2007, a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA) e a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo assinaram um protocolo agroambiental, que antecipa os prazos para extinção da queima da palha da cana nos canaviais paulistas (SMASP, 2008). Os prazos estabelecidos foram 2014 para áreas mecanizáveis, e 2017 para áreas não mecanizáveis, sendo que 80% das usinas do estado aderiram ao protocolo até 2011, como mostrado na Figura 2.

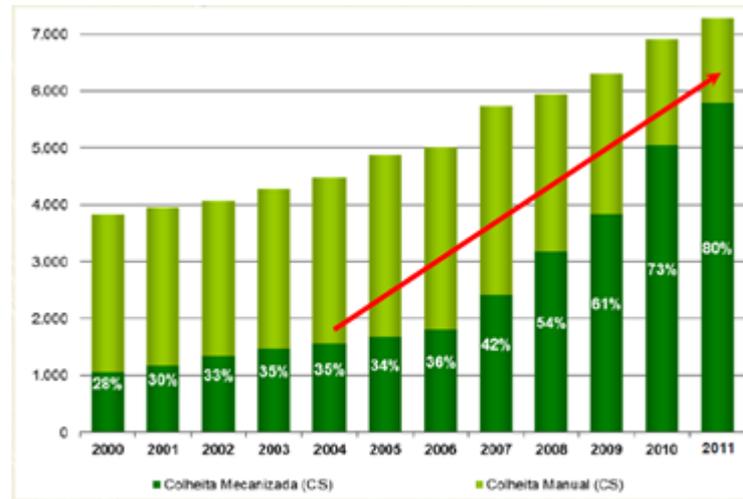


Figura 2 – Colheita realizada por tipo no estado de São Paulo, em mil hectares

Fonte: ÚNICA (2012)

Devido ao potencial de geração de energia elétrica pouco poluente e renovável, que pode substituir a matriz fóssil, causadora do efeito estufa (GENOÍNO, 2001, *apud* RIPOLI, 2002), e que os níveis de palhiço podem ser determinados pela escolha da variedade de cana (CANTÃO, 2005), é importante pensar neste não como um resíduo da lavoura, mas um subproduto rentável da atividade canavieira. Assim, o presente trabalho tem por finalidade discutir e propor soluções para o problema integrado de plantio de cana de açúcar e recuperação de palhiço. O plantio da cana pode levar em consideração a compatibilidade entre a variedade a ser plantada e o tipo de solo, mas está principalmente voltado à obtenção de um balanço energético favorável ao produtor. Além disso, a renovação das culturas em diferentes lotes da plantação, denominados talhões, poderia ser interessante, visto que o replantio pode ser necessário, de acordo com as condições de recuperação da lavoura após a colheita da cana.

### 1.1. Objetivos

Apresentam-se, a seguir, os objetivos do trabalho:



#### 1.1.1. Objetivo geral

Tem-se por objetivo geral discutir e apresentar propostas de solução, por meio do uso de modelos de otimização, para o problema do plantio da cana de açúcar. Devem ser combinados os objetivos de maximização do balanço energético da cana colhida e a minimização do custo de recuperação do palhicho, que tem grande potencial para geração de energia elétrica a partir da sua biomassa. Também devem ser considerados outros fatores, tais como a compatibilidade entre o tipo de solo e a variedade a ser plantada, além da necessidade de replantio da cana após uma parte da plantação se exaurir ou a realização de pousio do solo.

#### 1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar modelos na literatura que poderiam ser utilizados como base para a realização do presente estudo, esboçando-se o estado da arte em relação aos modelos de otimização propostos na área;
- Modelar o problema, propondo-se algumas variações, de forma a criar diferentes perspectivas para o produto de cana de açúcar brasileiro;
- Avaliar os resultados desses modelos, com a utilização de dados reais ou aproximados, de forma a validar as modelagens propostas.

### 1.2. Justificativa

A justificativa deste trabalho baseia-se, primeiramente, no potencial de geração de energia através do uso de resíduos agrícolas que, muitas vezes são deixados no solo (GOLDEMBERG e COELHO, 2000, *apud* MICHELAZZO, 2008). Ziuuber e Vooren (2008) *apud* Michellazo (2008) acrescentam que o Brasil deve aproveitar o potencial energético renovável e sustentável a partir da biomassa disponível, estimulando o seu desenvolvimento.



As vantagens já citadas no recolhimento, na recuperação e no aproveitamento do palhiço têm atraído estudos universidades e usinas, interessados em encontrar a maneira mais econômica, produtiva e eficaz de fazer esse manejo. Para Tolentino (2007), isso pode ser alcançado pela escolha de variedades que produzam palhiço com maior poder calorífico e com baixo custo de coleta, sem perder as características de produção sucroalcooleira.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

A partir desta introdução, o trabalho está estruturado em mais cinco capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão de literatura a respeito das pesquisas desenvolvidas no Brasil, visando ao desenvolvimento da indústria sucroalcooleira, destacando-se os trabalhos relacionados ao uso do palhiço na geração de energia elétrica. No Capítulo 3, trata-se da metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho. No Capítulo 4, o problema de pesquisa é definido, bem como são apresentados os modelos propostos para tratar o problema e suas possíveis variações. No Capítulo 5, a seguir, são apresentados alguns resultados computacionais obtidos pela aplicação dos modelos propostos. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas perspectivas para trabalhos futuros.



## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

As pesquisas aplicadas ao setor sucroalcooleiro são ainda muito recentes, sendo poucos os trabalhos aplicados ao problema de recolhimento do palhiço. Um trabalho descritivo bastante interessante é o de Ripoli (2002), que fez um mapeamento do potencial energético do palhiço de cana enfardado. Marques et al. (2006), por sua vez, se dedicaram a descrever as especificidades da logística de transporte da cana de açúcar.

Quando se tratam de pesquisas quantitativas, tem-se o modelo de Silva (2009), que desenvolveu um modelo para planejamento agregado da produção em uma indústria sucroalcooleira. Paiva (2009) também desenvolveu modelos para planejamento agregado, porém para uma cooperativa do setor sucroalcooleiro usando otimização robusta.

Alguns trabalhos conhecidos sobre recolhimento de palhiço incluem os trabalhos de Silva e Silva (2008) que desenvolveram um algoritmo de caminho mínimo para encontrar as melhores rotas de recolhimento de palhiço, usando o algoritmo de Dijkstra. Também merece destaque o trabalho de Florentino (2007), pelo desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira para minimizar os custos com recolhimento de palhiço, sujeito ao balanço energético da cana que deve ser colhida. Esse artigo foi particularmente importante para o desenvolvimento do presente trabalho, pois captura requisitos de qualidade da cana de açúcar, além da consideração do palhiço para ser utilizado como biomassa.

Dessa forma, pode-se concluir que a área de pesquisa ainda é bastante nova e apresenta grande potencial de desenvolvimento. No caso do desenvolvimento do presente trabalho, acredita-se que pode haver grandes semelhanças entre o problema integrado de plantio da cana e recuperação de palhiço. Para mais detalhes sobre o problema de rotação de culturas, pode-se consultar Santos et al. (2007). Essas semelhanças passam inicialmente pelo fato de haver divisão da lavoura de cana em talhões, enquanto a horta é partida em canteiros. Em ambos os casos, deve-se considerar a cultura precedente, seja em relação à variedade de cana cultivada, seja em relação à espécie de verdura ou leguminosa, dentre outras similaridades.



### 3. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho é a modelagem e simulação, em que devem ser utilizados modelos abstratos do sistema real estudado. Esses modelos devem ser descritos em linguagem matemática e computacional, utilizando-se de técnicas analíticas, tal como a estatística, e experimentais, mais comumente a simulação computacional, possibilitando a análise de diferentes estados, bem como o resultado esperado para possíveis ações que podem ser tomadas sobre o sistema real estudado (MORABITO e PUREZA, 2012).

Ainda de acordo com Morabito e Pureza (2012), a pesquisa aqui realizada pode ser classificada como empírica normativa. Em uma pesquisa empírica, é primordial se assegurar a adesão entre as observações e as ações do sistema real e o modelo elaborado para representá-lo. Assim, é preciso testar em processos reais a validade de modelos científicos obtidos em pesquisas teóricas, ou seja, a teoria e a prática devem ser consideradas em conjunto, não de forma isolada. O caráter normativo dessa pesquisa se refere ao desenvolvimento de políticas, estratégias e ações que melhorem a situação corrente do sistema estudado.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), o protocolo de pesquisa que descreve as fases de desenvolvimento de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação, além das principais interações entre elas, pode ser sintetizado pela Figura 3.

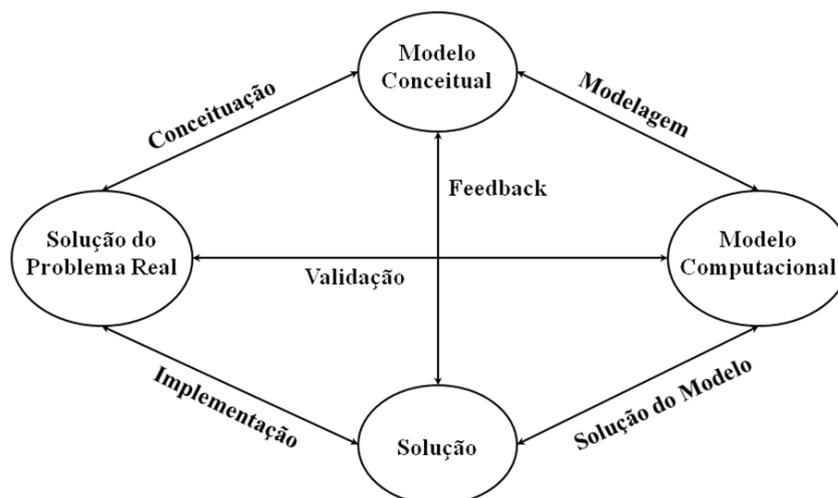


Figura 3 – Fases de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação

Fonte: Mitroff et al. (1974) *apud* Bertrand e Fransoo (2002)



Quando se trata de uma pesquisa empírica, há recomendações adicionais para o desenvolvimento de cada uma dessas fases (BERTRAND e FRANSOO, 2002):

- **Conceituação:** Além da definição do problema, nessa etapa é preciso identificar premissas do sistema real que se adéquem a uma área de pesquisa ou modelo conceitual já descrito na literatura científica.
- **Modelagem:** Nessa etapa, deve-se desenvolver um modelo conceitual e implementá-lo computacionalmente, seguindo-se à realização de testes preliminares que visam à verificação e validação da adequação do modelo ao sistema real, de acordo com uma margem de confiança estabelecida. Nos casos em que a pesquisa é empírica, essa etapa contempla a escolha de um modelo específico e um tipo de decisão associada, de forma que as premissas estabelecidas na etapa anterior sejam respeitadas. A partir daí, são estabelecidas a forma de coleta e análise dos dados, além das variáveis que serão estudadas e os critérios de avaliação dos resultados a serem obtidos.
- **Solução:** É a fase em que ocorre a experimentação do modelo. São realizados testes computacionais com os dados reais, além do estudo de possíveis cenários. Nos cenários alternativos, alguns parâmetros podem ser variados, a fim de se avaliar efeitos relacionados à análise de sensibilidade ou a mudanças de processos ou políticas de gestão do sistema real.
- **Implementação:** Consiste na implementação dos resultados obtidos na fase de solução no sistema real estudado, a fim de validar a eficácia dos resultados teóricos obtidos. A implementação também pode ocorrer em fases, isto é, um subsistema piloto é escolhido para a fase de implementação, e assim que seus resultados sejam satisfatórios, a pesquisa é implementada em todo o processo.



#### **4. O PROBLEMA INTEGRADO DE PLANTIO DE CANA DE AÇÚCAR E RECUPERAÇÃO DE PALHIÇO**

Em fazendas canavieiras, as estruturas básicas das estradas de terra e dos carregadores são decididas através do traçado dos talhões, que são os tipos de relevo da área e todos outros aspectos que tem ligação com o planejamento da base física agrícola (PARANHOS, 1987, *apud* MARQUES, ALVES e BORGES, 2006). De acordo com o tipo de solo de cada talhão e sua compatibilidade, são escolhidas as variedades a serem plantadas. Essa escolha leva em consideração informações como o nível de fibra e de sacarose das espécies. Segundo Florentino (2007) a quantidade de fibra na cana é determinante da produtividade da usina, podendo modificar a eficiência da extração da moenda. Uma elevada porcentagem de fibra de cana leva a uma baixa eficiência da extração da moenda, já a baixa porcentagem de fibra de cana aumenta a ocorrência de problemas mecânicos causados no corte e transporte da cana, favorecendo a ocorrência de açúcar na água de lavagem e de perdas na indústria. O teor de fibra de cana ótimo esta entre 11 a 13%.

Segundo Boraba (2009), a produtividade do canavial em cada corte é acompanhada pelas empresas, e assim definem-se os estágios que se deve interromper o ciclo produtivo. Quando há necessidade de reforma as condições de lavoura são observadas e definidas por um técnico com experiência no setor. Assim, critérios físicos com certa subjetividade determinam o ciclo produtivo e reformas necessárias. Normalmente, como práticas corriqueiras são feitos até seis cortes do mesmo ciclo, reformando então o talhão.

A colheita pode ser feita a cada ano ou ano e meio, de acordo com a variedade plantada, e se dá de duas formas: manual ou mecanizada. A colheita manual, dependente da queima prévia da cana que pode acarretar em impactos ambientais e problemas jurídicos, visto que a legislação vigente, no estado de São Paulo, Decreto Estadual nº. 47.700, de 11 de março de 2003, que regulamenta a Lei nº. 11.241 de 19 de setembro de 2002 determina a eliminação gradativa do uso do fogo, como método despalhador e facilitador da colheita da cana-de-açúcar.

Já a colheita mecânica produz palhiço, resíduo constituído por folhas, palhas, ponteiros e restos de colmos (FLORENTINO, 2007). O palhiço pode prejudicar a brota da cana e criar



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



condições que favorecem o aparecimento de parasitas que podem arruinar a safra, devendo, por isso, ser retirado da lavoura. Por outro lado, o palhiço pode ser aproveitado como fonte de biomassa (Florentino e Spadotto, 2006). Outras vantagens do aproveitamento do palhiço, além do potencial energético quando usado na forma de biomassa são as questões ambientais, a manutenção de empregos e a projeção de vida limitada para os recursos energéticos de fontes naturais (EID, CHAN e PINTO, 1998).

Segundo Ripoli et. al. (1999) a colheita mecanizada é feita por colhedoras compostas por um sistema de corte das pontas da cana, disco de corte das bases da planta. Cilindros hidráulicos, picadores, limpadores de folhas e palhas (exaustores) e elevadores para conduzir a cana para a descarga. Os autores descrevem que ao final da colheita da cana, ela é picada e colocado no transbordo, equipamento utilizado no processo, que tem capacidade de 8 a 15 toneladas por caixa. No final do processo, o transbordo descarrega a cana, com a ajuda de um pistão hidráulico, em um semirreboque que tem capacidade de 20 a 30 toneladas por caixa. O responsável por transportar a cana-de-açúcar até a processadora é o semirreboque.

Para Genoio (2001), a exploração da matriz energética da cana traz inúmeras vantagens. Ela se trata de uma matriz energética renovável e pouco poluente, substituindo a energia da matriz fóssil, matriz muito poluente causadora do efeito estufa. Além disso, o Brasil está muito acima que qualquer outro país em relação à tecnologia para produção de álcool, podendo ser um grande concorrente no mercado internacional nesse setor se investir na exportação de álcool. A exportação melhoraria a balança comercial, além de diminuir a dependência externa. Porém, esse processo só ocorreria se houver um direcionamento governamental, um longo prazo de planejamento e um acordo entre todos os setores da cadeia produtiva.

Segundo Ripoli (2002), na produção de energia existem as seguintes condições para que a coleta de palhiço de cana de açúcar ser aproveitada. O palhiço é enleirado por equipamentos do tipo ancinho enleirador, depois passa para a enfardadora, onde se produzem os fardos, que podem ser cilíndricos ou prismáticos. Os fardos são transportados pela carregadora até o centro de processamento, onde os fardos são picados e levados até as caldeiras. No entanto, a mecanização da colheita e a recuperação do palhiço não têm a mesma intensidade em todas as regiões canavieiras. Isso ocorre devido à tecnologia das colhedoras



usadas ainda não permitir a mecanização total da colheita, devido à variedade de cana de açúcar, topografia e, algumas vezes, mão de obra em excesso (VIEIRA e SIMON, 2005).

Conforme Sartori et. al. (2001), alguns pesquisadores apostam na escolha da variedade que surge através do palhiço com o menor custo de coleta e transporte e maior poder calorífico para minimizar os impactos ambientais, as influencias na produtividade e a lucratividade de indústrias sucroalcooleiras. Tanto a cana, como o palhiço, devem ser levados para a usina. Na usina, a cana pode ser aproveitada para a fabricação de açúcar, álcool combustível, cachaça, vinagre, rapadura, entre outros. Já o palhiço utilizado como biomassa.

#### 4.1. Modelagem Proposta

O modelo proposto consiste em uma adaptação do modelo proposto por Florentino (2007), tendo como objetivo minimizar o custo de coleta (CC) do palhiço, maximizando o balanço energético de biomassa residual (BE) da cana-de-açúcar.

Para a sua formulação, são necessários os seguintes conjuntos de parâmetros:

*V*: Variedades de cana

*T*: Talhões para plantação

*S*: Tipos de solo

Além dos seguintes dados de entrada:

$CC_{ij}$ : Custos de transportar os fardos de palhiço da variedade *i* plantada no talhão *j* até a usina

$BE_{ij}$ : Balanço energético da variedade *i* plantada no talhão *j*

*K*: Quantidade de talhões

*A*: Estimativa de produção de sacarose da variedade *i* (t/ha)

$\bar{A}$ : Quantidade mínima estabelecida para a POL (teor de sacarose dos colmos) da cana

*F*: Estimativa do teor de fibra da variedade *i*

*FI*: Quantidade mínima estabelecida para a fibra da cana

*FS*: Quantidade máxima estabelecida para a fibra da cana



$v_j$ : Variedade de cana plantada anteriormente no talhão  $j$

$r_{ik}$ : 1, se a variedade de cana  $i$  é compatível com o solo  $q$  e 0, caso contrário

$w_j$ : Tipo de solo do talhão  $j$

$\alpha$ : Ponderação do balanço energético em relação aos custos de transporte de palhiço na função objetivo

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} - \alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq k\bar{A} \quad (2)$$

$$KFI \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i X_{ij} \leq KFS \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$X_{ij} \neq v_j X_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq r_{ik} \mid k = w_j \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j \quad (7)$$

Os objetivos em (1) são: minimizar o custo de transferência do palhiço do campo para a usina, maximizando o balanço energético do processo. O parâmetro  $\alpha$  faz a ponderação entre esses dois objetivos, podendo-se fazer apenas a conversão de unidades relacionadas, ou ainda, priorizar um objetivo em relação ao outro. A restrição (2) garante a demanda de açúcar fermentável, a restrição (3) garante que o teor de fibra da cana mantenha-se nos limites requeridos pela usina. As restrições (4) e (5) garantem que toda a área destinada ao plantio seja utilizada e que será plantada apenas uma variedade de cana por talhão, enquanto a restrição (6) garante que não será plantada a mesma variedade de cana por dois períodos consecutivos no mesmo talhão. A restrição (7) garante que a variedade de cana é compatível com o tipo de solo do talhão, representando também o domínio binário das variáveis.



#### **4.2. Proposta de Adaptação do Modelo**

Como as usinas acompanham a produtividade do canavial a cada corte, a fim de se decidir pelo replantio, a cada nova colheita, é feito um novo mapeamento para os talhões do canavial. Caso um talhão esteja produzindo cana de baixa qualidade, este pode ser replantado ou ainda, deixado em repouso, para recuperação do solo. Esse repouso é chamado de pousio, e deve ser realizado junto com uma cultura alternativa, normalmente de uma leguminosa, para fixação do nitrogênio do solo. As leguminosas mais utilizadas são o feijão e o sorgo.

É possível inserir essas decisões em um modelo integrado de plantio de cana e recuperação de palhicho. Para isso, devem ser definidos parâmetros de entrada para acompanhar o desempenho da cana plantada em cada talhão, além do número de semestres em que o mesmo está produzindo consecutivamente. Quando a cana plantada atingir uma determinada idade, ou quando a qualidade da cana produzida estiver abaixo de um limite dado, o replantio deve ser realizado, dentro dos mesmos moldes já propostos no modelo. Alternativamente, alguns dados químicos do solo podem ser acompanhados, para indicar a necessidade do pousio antes do replantio da cana.

Dessa forma, a adaptação se iniciaria com a introdução de um horizonte de planejamento discreto, que poderia ser dividido em semestres. Para cada semestre de colheita, a decisão de continuar com a produção da cana plantada ou realizar o replantio ou realizar o pousio deveria ser tomada, rolando-se o horizonte para frente. Nesse caso, as decisões de replantio e pousio seriam tomadas automaticamente, não havendo mais necessidade de intervenção do tomador de decisão nesse sentido. Essa adaptação aumentaria a complexidade do modelo, mas permitiria um controle mais aprofundado da plantação e, conseqüentemente, poderia possibilitar um ganho de produtividade e o aumento da vida útil da área do canavial.



## 5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Para a obtenção dos resultados, dados retirados da literatura foram utilizados como base, sendo 10 variedades de cana e 15 de talhões (RIPOLI&RIPOLI (2004), TORREZAN (2003), SARTORI (2001), apud FLORENTINO(2007)) . Os dados referentes às variedades de cana se encontram na Tabela 1, enquanto os dados relativos aos custos de enleirar e transportar o palhão, dentre outros, se encontram na Tabela 2.

**Tabela 1- Dados das variedades de cana**

i	Variedade	Vi (m <sup>3</sup> /t)	Pbi (t/ha)	EcBi (Mcal/t)	Ai (t/ha)	Qi (m <sup>3</sup> /ha)	Fi (t/ha)
1	SP701284	4.74	13.37	2187.4	13.12	63.36	10.04
2	SP706163	8.72	23.57	1939.8	12.74	205.55	9.65
3	SP701143	7.05	22.14	1924.8	15.01	155.98	11.59
4	SP711416	10.15	27.42	2141.2	12.86	278.19	10.33
5	RB835486	9.56	21.53	2444.2	12.84	205.77	9.28
6	RB72454	8.71	23.54	2004.89	15.26	205.03	11.73
7	RB855536	9.78	26.43	2211.95	17.05	258.46	12.51
8	SP791011	8.91	24.09	1977.47	15.8	214.72	10.33
9	RB855113	10.87	29.38	2310.37	17.54	319.38	10.91
10	RB711406	12.32	33.3	2008.83	20.77	410.29	16.12

i = índice associado as variedades. Vi = estimativa do volume de uma tonelada de palhão da variedade i (obtido a partir da massa específica do palhão). Pbi = produtividade do palhão da variedade i. EcBi = poder calorífico útil do palhão da variedade i. Ai = produtividade de açúcar fermentescível (POL) da variedade i. Qi = estimativa do volume de biomassa por unidade de área.



**Tabela 2 - Outros dados necessários para aplicação do modelo**

Cecc (US\$/t)	Co (L/Km)	P (US\$/L)	Ecec (Mj/t)	Ecc (Mj/t)	Ect (Mj/Km)	$\bar{A}$ (t/ha)	FI (t/ha)	FS (t/ha)	Vc (m3)
7.030	0.125	0.850	7.560	57.540	5.250	14.000	11.000	15.00 0	54.570

Cecc = custo para enleirar, compactar e carregar o palhicho. Co = consumo de combustível do caminhão usado no transporte do palhicho. P = preço de um litro de combustível. Ecec = energia consumida pelas máquinas sob a forma de combustível para enleirar e compactar uma tonelada de resíduo. Ecc = energia consumida pela máquina sob a forma de combustível para carregar o caminhão com uma tonelada do resíduo. Ect = energia consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte do resíduo.  $\bar{A}$  = quantidade mínima recomendada de POL. FI e FS limites inferior e superior recomendados para o teor da fibra. Vc = capacidade de carga do caminhão a ser usado no transporte do palhicho.

Na Tabela 3, são apresentados os dados dos talhões considerados. A Tabela 4 mostra a compatibilidade de cada variedade de cana e os tipos de solo presentes nos talhões. Por fim, a Tabela 5 mostra os tipos de solo presentes em cada um dos talhões considerados no estudo.

**Tabela 3 - Dados dos Talhões**

Talhão(j)	Lj(ha)	Dj(Km)
1	17.6	14
2	17.05	22
3	18.29	12
4	22.17	24.5
5	21.22	13
6	10.6	16.5
7	13.25	14
8	16.96	16
9	18.7	20
10	15.36	15.5



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



11	16.84	23.5
12	19.88	22
13	21.82	29
14	19.42	15
15	21.59	22.5

$j$  = índice associado aos talhões.  $L_j$  = área do talhão  $j$  e  $D_j$  = distância do talhão  $j$  ao centro de processamento do palhão.

**Tabela 4 - Espécie x Compatibilidade do solo**

<b>Espécie</b>	<b>Solo Tipo1</b>	<b>Solo Tipo 2</b>	<b>Solo Tipo 3</b>
<b>SP701284</b>	Compatível	Compatível	Compatível
<b>SP706163</b>	Compatível	Não Compatível	Não Compatível
<b>SP701143</b>	Compatível	Não Compatível	Não Compatível
<b>SP711416</b>	Não Compatível	Compatível	Compatível
<b>RB835486</b>	Compatível	Compatível	Não Compatível
<b>RB72454</b>	Não Compatível	Não Compatível	Compatível
<b>RB855536</b>	Compatível	Compatível	Compatível
<b>SP791011</b>	Não Compatível	Compatível	Compatível
<b>RB855113</b>	Compatível	Compatível	Não Compatível
<b>RB711406</b>	Não Compatível	Não Compatível	Compatível



**Tabela 5 - Tipo de Solo x Talhão**

Talhão	Tipo de Solo
1	1
2	1
3	2
4	2
5	3
6	3
7	2
8	1
9	3
10	1
11	2
12	3
13	1
14	2
15	1

Os resultados foram obtidos utilizando o *software* GLPK: GNU Linear Programming Kit 4.8.1839.41276 *Free Software Foundation* ([www.gnu.org](http://www.gnu.org)) no notebook HP Pavilion Dev6, com sistema operacional Windows 7. O Apêndice I apresenta o modelo implementado, os dados são mostrados no Apêndice II e os resultados são apresentados no Apêndice III.

Como resultado, o problema apresentou 10 variedades de cana, 15 talhões e 3 tipos de solos. As soluções obtidas são apresentadas na Tabela 6.



Tabela 6 - Resultados do modelo em relação à alocação das variedades nos talhões

Espécie	Talhão
<b>SP711416</b>	5
<b>RB855113</b>	1,2,3,4,7,8,10,11,13,14 e 15
<b>RB711406</b>	6, 9 e 12

Como resultado do balanço energético se obteve 18.490.035,46 MJ e custo de transferência do palhiço US\$55.797,50.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A cana de açúcar tem grande destaque no agronegócio brasileiro. Além do açúcar, que é vendido tanto internamente quanto destinado à exportação, o álcool combustível também é um produto de grande importância para o país. A grande relevância econômica do álcool combustível está relacionada à matriz energética do setor de transportes, competindo com a gasolina no abastecimento de veículos particulares e de empresas. Como a produção de veículos bicombustíveis vem crescendo a passos largos, a disponibilidade do álcool deve acompanhar esse crescimento, a fim de trazer benefícios econômicos e ambientais para o Brasil, uma vez que o álcool é um combustível renovável e menos poluente que a gasolina e o óleo diesel.

No entanto, a indústria canavieira também participa da matriz energética brasileira com a geração de energia elétrica obtida a partir de biomassa da cana. Parte dessa biomassa é proveniente do bagaço da cana, possibilitando a geração de energia para uso da própria usina de açúcar e álcool. Parte dessa biomassa também pode ser obtida por meio do uso do palhiço, obtido após a colheita mecanizada da cana, sendo formado principalmente de folhas e pontas. O aproveitamento desse potencial energético tem sido incentivado pelo surgimento de leis que



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



visam à substituição da colheita manual, que queima o palhiço, pela mecanizada, que o deixa amplamente disponível.

Para que se obtenha o máximo aproveitamento da cana e do palhiço, simultaneamente, é necessário escolher as variedades de cana mais propícias a esse objetivo, de acordo com o tipo de solo disponível para plantação. Nesse contexto, foi proposto um modelo para tomada de decisões integradas de plantio de cana e recuperação de palhiço, em lavouras divididas em talhões. Foram consideradas restrições de balanço energético, necessárias à obtenção de cana com qualidade adequada à usina, de transporte do palhiço, da compatibilidade entre o solo e a variedade da cana a ser plantada e a não repetição consecutiva de uma única variedade em cada talhão. Além disso, foi proposta uma possível transformação desse problema para a tomada de decisão em um horizonte dinâmico, com a indicação de replantio e realização de pousio. Os resultados computacionais obtidos para um conjunto de dados foram apresentados e discutidos.

Como sugestões para trabalhos futuros, além do estudo que possibilite a transformação do modelo proposto em uma ferramenta de tomada de decisão dinâmica, sugerem-se estudos para se definir se existem vantagens na alternância das variedades entre talhões, ou seja, se é benéfico inserir uma restrição que não permita o plantio de uma única variedade em talhões vizinhos. Essa restrição é extremamente importante para o controle de pragas em culturas clonadas, como a do eucalipto, por exemplo, mas não se tem estudos conhecidos para o caso da cana. Por fim, sugere-se a aplicação do modelo a uma empresa, verificando-se posteriormente quais foram os ganhos obtidos em relação ao planejamento manual do plantio.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIERI, M.A. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável.**

Editora Agropecuária, Guaíba: 2002.

BASTOS, K. Z. **Modelos de simulação para análise e apoio à decisão nos processos de corte mecanizado, carregamento e transporte no agronegócio da cana-de-açúcar.**

Dissertação de mestrado – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos – Universidade Federal de Goiás, Goiânia (2009). Disponível em <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=164196](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=164196)>. Acesso em 5 de junho de 2012.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 22 (2), p 241-264, 2002.

BORBA, M. M. Z.; BAZZO, A. M. **Estudo econômico do ciclo produtivo da cana-de-açúcar para reforma de canavial, em área de fornecedor do estado de São Paulo.** 2009. Trabalho Apresentado ao 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia Administração e Sociologia Rural, Porto Alegre, 2009.

EID, F.; CHAN, K.; PINTO, S. S. Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucoalcooeira paulista: uma análise de experiência e dificuldades de difusão. **Informações Econômicas**, 28(5), 1998.

FLORENTINO, H. O. Minimização do custo de recolhimento do palhico da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 39.,2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2007.



FLORENTINO, H. O.; SPADOTTO, A. F. **O problema da mochila**. Botucatu, SP: UNESP, 2006.

GENOÍNO, J. A crise de energia e a cana. **Jornal de Piracicaba**, Piracicaba, 10 jul. 2001. P.A3.

GERMEK, H. A. et. al. Análise de decisão sobre o aproveitamento da biomassa canavieira, para fins de cogeração. In: Congresso Brasileiro de Economia E Sociologia Rural, 43. Ribeirão Preto, 2005. **Anais...** Ribeirão Preto: SOBER, 2005.

GLIESSMAN, S.R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. Editora da Universidade – UFRGS, Porto Alegre. 2000.

MARQUES, K.M.; ALVES, K. C. M.; BORGES, R. M. **A logística de transporte da cana-de-açúcar como uma especificidade da logística geral aplicada ao setor sucro alcooleiro**. Presidente Prudente, 2006.

MARQUESINI, A.G.; SANCHES, R.B; SOUZA, J.W.M.. Modelo matemático para otimizar a roteirização mensal das frentes de colheita de cana-de-açúcar em usinas sucroalcooleiras. In: SIMPEP, 12, 2006, Bauru, SP. **Anais...**, Bauru: Universidade Estadual Paulista - UNESP: 2006.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e Simulação**. Em: Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. P. C. Miguel (ed.). 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. Piracicaba, Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo – USP: 2002.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



RIPOLI, T. C. et. al. **Desempenho operacional de uma colhedora em cana crua em função da velocidade de avanço**. Engenharia Agrícola: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola- SBEA, Jaboticabal, SP: 1999.

SARTORI, M. M. P. et. al. Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. **Energy**, 26:1031-1040, 2001.

VIEIRA, G.; SIMON, E. Possíveis impactos da mecanização no corte de cana-de-açúcar em consequência da eliminação da queima da palha. In: Congresso Brasileiro de Economia E Sociologia Rural, 43. Ribeirão Preto, 2005. **Anais...** Ribeirão Preto: SOBER, 2005.



## **7. APÊNDICE I**

### **Implementação do modelo**

# Conjuntos

```
set V; # Variedades de cana
set T; # Talhões para plantação
set S; # Tipos de solo
```

# Parâmetros

```
param CC{i in V, j in T}; # Custos de transportar os fardos de palhiço da variedade
i plantada no talhão j até até a usina
param BE{i in V, j in T}; # Balanço energético da variedade i plantada no talhão j
param k;
param A{i in V}; #Estimativa de produção de sacarose da variedade i (t/ha)
param Abarra; #Quantidade mínima estabelecida para a POL da cana
param F{i in V}; #Estimativa do teor de fibra da variedade i
param FI; #Quantidade mínima estabelecidas para a fibra da cana
param FS; #Quantidade máxima estabelecidas para a fibra da cana
param v{j in T}; # Variedade de cana plantada anteriormente no talhão j
param l{i in V, q in S}; #1, se a variedade de cana i é compatível com o solo q e
0, caso contrário #SUBSTITUI K POR Q DEVIDO AO "PARAM K"
param w{j in T}; # Tipo de solo do talhão j
param alfa; # Ponderação do balanço energético em relação aos custos de transporte
de palhiço na função objetivo
```

# Variáveis

```
var x{i in V, j in T} >= 0, binary; # Variedade i de cana a ser plantada no talhão
j
var cbe >= 0;
var ct >= 0;
```

# Função Objetivo

```
maximize fo: alfa*cbe - ct; #Minimizar custo para o transpote do palhiço de um
talhão até a usina e maximizar o balanço energético do palhiço
```



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



# Restrições

s.t. R1:  $\sum_{i \in V, j \in T} A[i] * x[i, j] \geq k * Abarra$ ; #Garante a demanda de açúcar que pode fermentar

s.t. R2:  $\sum_{i \in V, j \in T} F[i] * x[i, j] \geq k * FI$ ; #Garante que o teor de fibra mantenha-se nos limites requeridos e suas restrições

s.t. R3:  $\sum_{i \in V, j \in T} F[i] * x[i, j] \leq k * FS$ ; #Garante que o teor de fibra mantenha-se nos limites requeridos e suas restrições

s.t. R4  $\{j \in T\}: \sum_{i \in V} x[i, j] = 1$ ; #Garante que toda a área destinada para plantio seja usada e também que seja plantado apenas uma variedade de cana por talhão.

s.t. R5  $\{j \in T\}: x[v[j], j] = 0$ ; #Garante que não será plantado a mesma variedade de cana por 2 períodos consecutivos no mesmo talhão

s.t. R6  $\{i \in V, j \in T\}: x[i, j] \leq l[i, w[j]]$ ; #Garante que o tipo de cana  $i$  é compatível com o tipo de solo do talhão  $w[j]$

s.t. R7:  $ct = \sum_{i \in V, j \in T} CC[i, j] * x[i, j]$ ;

s.t. R8:  $cbe = \sum_{i \in V, j \in T} BE[i, j] * x[i, j]$ ;

end;



## 8. APÊNDICE II

### Dados utilizados no teste

```
set V := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; #Especies de cana
```

```
# 1 = SP701284  
# 2 = SP706163  
# 3 = SP701143  
# 4 = SP711416  
# 5 = RB835486  
# 6 = RB72454  
# 7 = RB855536  
# 8 = SP791011  
# 9 = RB855113  
# 10 = RB711406;
```

```
set T := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15; #Numero de talhoes
```

```
set S := 1 2 3; #Tipos de solo
```

param CC :	1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	11	
12	13	14	15 :=			
1	1684.28015	1648.47331	1745.79891	2150.33620	2028.08816	1017.66516
	1267.99500	1627.21812	1803.38915	1472.75954	1631.28572	1922.09087
	2128.50179	1860.84577	2088.75335			
2	3015.15984	2975.52531	3118.72797	3891.23736	3626.83085	1826.55421
	2269.93567	2919.09293	3248.51136	2640.63316	2948.98602	3469.41015
	3869.10303	3334.72693	174.71772			
3	2812.29159	2765.83207	2911.43688	3613.22533	3384.28434	1701.81456
	2117.20816	2720.32792	3022.13488	2461.36080	2739.43755	3224.91153
	3586.00322	3109.00595	162.37074			
4	3524.58427	3488.32168	3642.95053	4565.86195	4238.03341	2137.11463
	2653.45122	3414.79024	3805.64360	3088.48036	3459.03903	4067.32171
	4546.96457	3899.57711	204.86447			
5	2761.84704	2730.18696	2855.46849	3572.24930	3321.40712	1674.00217
	2079.23143	2675.00603	2979.41457	2419.57004	2706.68025	3183.34995
	3555.19293	3055.22761	160.32859			
6	3010.87212	2971.23348	3114.30920	3885.60061	3621.68272	1823.94501
	2266.70771	2914.92679	3243.84206	2636.86782	2944.72148	3464.40596
	3863.45587	3329.97617	174.46549			



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



7	3393.80609	3356.39050	3508.45048	4392.18357	4081.17171	2057.33250
	2554.99606	3287.46459	3662.38161	2973.46160	3327.76244	3913.49227
	4372.25609	3754.52926	197.10736			
8	3084.70414	3045.33168	3190.34561	3982.99569	3710.30028	1868.91199
	2322.29147	2986.71396	3324.40543	2701.73773	3018.38361	3550.80316
	3961.16589	3411.80948	178.82086			
9	3788.57226	3754.99915	3914.35440	4917.06587	4554.61713	2298.23266
	2852.19219	3671.89901	4095.12913	3320.71767	3724.45772	4378.26294
	4900.49870	4192.42132	220.54548			
10	4317.32080	4291.36784	4457.35743	5624.31299	5188.36357	2621.37413
	3250.25572	4187.42435	4676.78446	3786.24914	4258.69126	5003.65939
	5613.96060	4779.28471	252.09255;			

param BE :	1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12
	13	14	15:=			
1	526594.7258	510200.8418	547222.9515	663435.9882	634896.0098	317165.7262
	396442.0521	507461.2949	559558.0616	459584.0856	503928.3622	594885.2043
	653007.0347	581058.2636	646059.8303			
2	825631.1275	799944.5838	857968.9327	1040209.044	995430.637	497277.3423
	621568.8886	795636.6336	877327.2	720570.1309	790113.085	932721.3094
	1023869.534	911025.1837	1012959.412			
3	769667.7965	745708.1922	799817.462	969676.925	927960.0757	463567.8967
	579437.4036	741702.8831	817848.1343	671725.704	736540.6493	869482.6311
	954435.1368	849271.6154	944279.4549			
4	1057686.548	1024767.037	1099116.948	1332551.789	1275212.719	637041.6389
	796269.7021	1019258.341	1123901.52	923094.3947	1012169.94	1194860.335
	1311610.544	1167079.916	1297648.098			
5	945341.262	915924.7996	982369.2925	1191021.815	1139761.255	569377.6331
	711691.5751	910996.4136	1004528.285	825046.2921	904666.8469	1067952.2
	1172309.344	1043116.004	1159823.208			
6	851547.3339	825050.7775	884901.2075	1072854.405	1026677.356	512885.9412
	641079.669	820610.3999	904863.0615	743187.8889	814910.0287	961994.6896
	1055999.425	939621.3428	1044750.764			
7	1052409.292	1019649.841	1093634.102	1325895.96	1268850.783	633862.3486
	792296.7684	1014171.779	1118290.442	918487.9699	1007114.871	1188893.774
	1305056.296	1161256.253	1291167.932			
8	859817.5753	833065.1984	893494.9761	1083276.569	1036648.228	517867.3919
	647305.8451	828580.5579	913652.3518	750405.9975	822826.2242	971339.3633
	1066258.942	948747.176	1054899.437			



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



9	1220766.338	1182760.032	1268587.673	1537992.854	1471833.587	735261.9844
	919042.8395	1176410.307	1297181.569	1065420.171	1168218.73	1379077.387
	1513815.091	1347024.984	1497711.529			
10	1206919.414	1169364.853	1254192.784	1520582.925	1455135.643	726926.0569
	908618.3092	1163071.64	1282484.865	1053338.798	1154992.059	1363458.843
	1496693.712	1331748.872	1480751.046;			

param k := 15; #k = numero de talhões;

param A :=	1	13.12
	2	12.74
	3	15.01
	4	12.86
	5	12.84
	6	15.26
	7	17.05
	8	15.80
	9	17.54
	10	20.77;

param Abarra := 14;

param F :=	1	10.04
	2	9.65
	3	11.59
	4	10.33
	5	9.28
	6	11.73
	7	12.51
	8	10.33
	9	10.91
	10	16.12;

param FI := 11;

param FS := 15;

param v :=	1	8
	2	6
	3	2



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



4 1  
5 10  
6 9  
7 2  
8 1  
9 7  
10 1  
11 7  
12 8  
13 3  
14 10  
15 7;

param l :	1	2	3:=
1	1	1	1
2	1	0	0
3	1	0	0
4	0	1	1
5	1	1	0
6	0	0	1
7	1	1	1
8	0	1	1
9	1	1	0
10	0	0	1;

param w :=1	1
2	1
3	2
4	2
5	3
6	3
7	2
8	1
9	3
10	1
11	2
12	3
13	1
14	2
15	1;



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



```
param alfa:=1;
```

```
end;
```



### 9. APÊNDICE III Relatório de Resultados

Problem: modelo  
Rows: 186  
Columns: 152 (150 integer, 150 binary)  
Non-zeros: 1069  
Status: INTEGER OPTIMAL  
Objective: fo = 18490035.46 (MAXimum) 18490035.46 (LP)

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	x[1,1]	*	0	1
2	x[1,2]	*	0	1
3	x[1,3]	*	0	1
4	x[1,4]	*	0	1
5	x[1,5]	*	0	1
6	x[1,6]	*	0	1
7	x[1,7]	*	0	1
8	x[1,8]	*	0	1
9	x[1,9]	*	0	1
10	x[1,10]	*	0	1
11	x[1,11]	*	0	1
12	x[1,12]	*	0	1
13	x[1,13]	*	0	1
14	x[1,14]	*	0	1
15	x[1,15]	*	0	1
16	x[2,1]	*	0	1
17	x[2,2]	*	0	1
18	x[2,3]	*	0	1
19	x[2,4]	*	0	1
20	x[2,5]	*	0	1
21	x[2,6]	*	0	1
22	x[2,7]	*	0	1
23	x[2,8]	*	0	1
24	x[2,9]	*	0	1
25	x[2,10]	*	0	1
26	x[2,11]	*	0	1
27	x[2,12]	*	0	1
28	x[2,13]	*	0	1
29	x[2,14]	*	0	1
30	x[2,15]	*	0	1



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



31	x[3,1]	*	0	0	1
32	x[3,2]	*	0	0	1
33	x[3,3]	*	0	0	1
34	x[3,4]	*	0	0	1
35	x[3,5]	*	0	0	1
36	x[3,6]	*	0	0	1
37	x[3,7]	*	0	0	1
38	x[3,8]	*	0	0	1
39	x[3,9]	*	0	0	1
40	x[3,10]	*	0	0	1
41	x[3,11]	*	0	0	1
42	x[3,12]	*	0	0	1
43	x[3,13]	*	0	0	1
44	x[3,14]	*	0	0	1
45	x[3,15]	*	0	0	1
46	x[4,1]	*	0	0	1
47	x[4,2]	*	0	0	1
48	x[4,3]	*	0	0	1
49	x[4,4]	*	0	0	1
50	x[4,5]	*	1	0	1
51	x[4,6]	*	0	0	1
52	x[4,7]	*	0	0	1
53	x[4,8]	*	0	0	1
54	x[4,9]	*	0	0	1
55	x[4,10]	*	0	0	1
56	x[4,11]	*	0	0	1
57	x[4,12]	*	0	0	1
58	x[4,13]	*	0	0	1
59	x[4,14]	*	0	0	1
60	x[4,15]	*	0	0	1
61	x[5,1]	*	0	0	1
62	x[5,2]	*	0	0	1
63	x[5,3]	*	0	0	1
64	x[5,4]	*	0	0	1
65	x[5,5]	*	0	0	1
66	x[5,6]	*	0	0	1
67	x[5,7]	*	0	0	1
68	x[5,8]	*	0	0	1
69	x[5,9]	*	0	0	1
70	x[5,10]	*	0	0	1
71	x[5,11]	*	0	0	1



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



72	x[5,12]	*	0	0	1
73	x[5,13]	*	0	0	1
74	x[5,14]	*	0	0	1
75	x[5,15]	*	0	0	1
76	x[6,1]	*	0	0	1
77	x[6,2]	*	0	0	1
78	x[6,3]	*	0	0	1
79	x[6,4]	*	0	0	1
80	x[6,5]	*	0	0	1
81	x[6,6]	*	0	0	1
82	x[6,7]	*	0	0	1
83	x[6,8]	*	0	0	1
84	x[6,9]	*	0	0	1
85	x[6,10]	*	0	0	1
86	x[6,11]	*	0	0	1
87	x[6,12]	*	0	0	1
88	x[6,13]	*	0	0	1
89	x[6,14]	*	0	0	1
90	x[6,15]	*	0	0	1
91	x[7,1]	*	0	0	1
92	x[7,2]	*	0	0	1
93	x[7,3]	*	0	0	1
94	x[7,4]	*	0	0	1
95	x[7,5]	*	0	0	1
96	x[7,6]	*	0	0	1
97	x[7,7]	*	0	0	1
98	x[7,8]	*	0	0	1
99	x[7,9]	*	0	0	1
100	x[7,10]	*	0	0	1
101	x[7,11]	*	0	0	1
102	x[7,12]	*	0	0	1
103	x[7,13]	*	0	0	1
104	x[7,14]	*	0	0	1
105	x[7,15]	*	0	0	1
106	x[8,1]	*	0	0	1
107	x[8,2]	*	0	0	1
108	x[8,3]	*	0	0	1
109	x[8,4]	*	0	0	1
110	x[8,5]	*	0	0	1
111	x[8,6]	*	0	0	1
112	x[8,7]	*	0	0	1



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências exatas e Aplicadas – ICEA**  
**Departamento de Engenharia de Produção – DEENP**  
**Campus João Monlevade**



113	x[8,8]	*	0	0	1
114	x[8,9]	*	0	0	1
115	x[8,10]	*	0	0	1
116	x[8,11]	*	0	0	1
117	x[8,12]	*	0	0	1
118	x[8,13]	*	0	0	1
119	x[8,14]	*	0	0	1
120	x[8,15]	*	0	0	1
121	x[9,1]	*	1	0	1
122	x[9,2]	*	1	0	1
123	x[9,3]	*	1	0	1
124	x[9,4]	*	1	0	1
125	x[9,5]	*	0	0	1
126	x[9,6]	*	0	0	1
127	x[9,7]	*	1	0	1
128	x[9,8]	*	1	0	1
129	x[9,9]	*	0	0	1
130	x[9,10]	*	1	0	1
131	x[9,11]	*	1	0	1
132	x[9,12]	*	0	0	1
133	x[9,13]	*	1	0	1
134	x[9,14]	*	1	0	1
135	x[9,15]	*	1	0	1
136	x[10,1]	*	0	0	1
137	x[10,2]	*	0	0	1
138	x[10,3]	*	0	0	1
139	x[10,4]	*	0	0	1
140	x[10,5]	*	0	0	1
141	x[10,6]	*	1	0	1
142	x[10,7]	*	0	0	1
143	x[10,8]	*	0	0	1
144	x[10,9]	*	1	0	1
145	x[10,10]	*	0	0	1
146	x[10,11]	*	0	0	1
147	x[10,12]	*	1	0	1
148	x[10,13]	*	0	0	1
149	x[10,14]	*	0	0	1
150	x[10,15]	*	0	0	1
151	cbe		1.85458e+007	0	
152	ct		55797.6	0	