

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**OTIMIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-  
AÇÚCAR**

**ADRIANO DAWISON DE LIMA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração Energia na Agricultura.

Botucatu – SP  
Setembro – 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**OTIMIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-  
AÇÚCAR**

**ADRIANO DAWISON DE LIMA**

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração Energia na Agricultura.

Botucatu – SP  
Setembro – 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L732o Lima, Adriano Dawison de, 1972-  
Otimização do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar / Adriano Dawison de Lima. - Botucatu : [s.n.], 2009.

xv, 76 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009

Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva

Inclui bibliografia.

1. Cana-de açúcar. 2. Modelo matemático. 3. Otimização. 4. Palhiço. 5. Energia. I. Silva, Helenice de Oliveira Florentino. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**  
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO: "OTIMIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇUCAR"

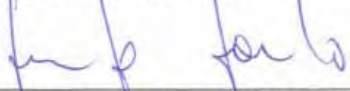
ALUNO: ADRIANO DAWISON DE LIMA


ORIENTADORA: PROFA. DRA. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

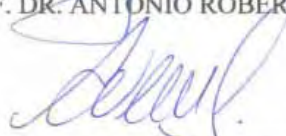
Aprovado pela Comissão Examinadora

  
PROFA. DRA. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

  
PROFA. DRA. LIDIA RAQUEL DE CARVALHO

  
PROF. DR. SERGIO PAULO AMARAL SOUTO

  
PROF. DR. ANTONIO ROBERTO BALBO

  
PROF. DR. ANDRÉS VÉRCIK

*Dedico essa Tese...*

*À minha esposa Renata Alves de Lima e meus filhos Wesley Dawison de Lima e Wellington Dawison Lima, por serem a base e os pilares da minha vitória.*

*Aos meus pais Ronan e Hilda, por me ensinarem a contornar os obstáculos que são impostos na jornada da vida e pelas suas orações destinadas a mim.*

*Aos meus irmãos Dawesley Ricardo de Lima e Júlio César R. de Lima, pelo constante estímulo.*

*Ofereço...*

*A Jesus Cristo, pois quando roguei pelo seu nome ele levou minhas  
ansiedades até Deus ,*

*Agradecimentos...*

*Agradeço em primeiro lugar a Deus por toda ajuda e proteção dada a mim e a minha família.*

*A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helenice de Oliveira Florentino Silva, por ensinar-me a arte da pesquisa e da vivência acadêmica.*

*Aos funcionários da Usina que me cederam gentilmente os dados.*

*Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Lídia Raquel de Carvalho pelo auxílio na análise estatística dos dados.*

*Prof. Dr. Alcides Lopes Leão por ceder o laboratório para as análises de poder calorífico.*

*A amiga Doutoranda Adriana Ferla de Oliveira pelo auxílio das análises de poder calorífico.*

*Aos amigos Doutorandos José Luiz Siqueira e Nágela Magave Siqueira pelo auxílio de campo e laboratorial.*

*Ao amigo Mestrando Thiago Pedro Donadon Homem pelo auxílio nas implementações computacionais.*

*Ao amigo Mestrando Adilson Pacheco de Souza pelo apoio.*

*Ao assistente acadêmico do Departamento de Bioestatística Arthur Bestana Bentivenha, pelo auxílio técnico.*

*Enfim..., aos amigos da pós-graduação, que foram muitos..., pela ajuda e incentivo para que este momento se tornasse uma realidade em minha carreira acadêmica.*

*Aos funcionários da Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos.*

*A FAPESP e Capes pelo auxílio financeiro.*

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE QUADROS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE FIGURAS .....	XI
LISTA DE EXPRESSÕES.....	XII
LISTA DE UNIDADES DE MEDIDAS .....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
1. RESUMO .....	1
2. SUMMARY .....	2
3. INTRODUÇÃO.....	4
4. REVISÃO DE LITERATURA .....	6
4.1. O setor sucroenergético brasileiro .....	6
4.2. Cana-de-açúcar .....	10
4.2.1. Clima .....	11
4.2.2. Solo.....	11
4.2.3. Variedades .....	12
4.2.4. Épocas de cultivo na região Centro-Sul .....	13
4.2.5. Principais características da cana-de-açúcar.....	14
4.2.6. Colheita mecanizada sem queima prévia.....	16
4.2.7. Poder energético do palhiço .....	19
4.3. Modelagem matemática no setor sucroalcooleiro .....	23
4.3.1. Custo de coleta e aproveitamento do palhiço .....	26



4.3.2.	Balanço de energia proveniente do palhiço .....	27
4.3.3.	Modelo de otimização multiobjetivo para a minimização do custo de coleta e maximização do balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar.....	29
4.3.4.	Poder calorífico.....	31
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
5.1	Considerações iniciais .....	33
5.2.	Umidade da cana .....	34
5.2.1.	Material.....	34
5.2.2.	Método.....	34
5.3.	Fibra da cana.....	35
5.3.1.	Material.....	35
5.3.2.	Método (Método do disgestor) .....	35
5.4.	Pol da cana.....	36
5.4.1.	Material.....	36
5.4.2.	Método.....	36
5.5.	Umidade do Palhiço .....	36
5.5.1.	Material.....	37
5.5.2.	Métodos .....	37
5.6.	Método para determinação do PCS. ....	37
5.7.	Procedimentos computacionais .....	38

5.8. Resolução do modelo de otimização multiobjetivo para minimização do custo de coleta e maximização do balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar.....	38
5.9. Programação Multiobjetivo .....	39
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
7. CONCLUSÕES .....	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
9. APÊNDICE A .....	63
9.1. Otimização.....	63
9.2. Programação linear .....	65
9.3. Programação linear inteira.....	67
9.3.1. Método enumerativo <i>Branch-and-Bound</i> .....	71
9.4. Otimização Multiobjetivo.....	72
9.4.2. Superfície de Pareto.....	75

**LISTA DE QUADROS**

	<b>Página</b>
Quadro 1. Indicadores da qualidade da cana-de-açúcar .....	16
Quadro 2. Dados sobre produtividade do palhiço obtidos em diversas bibliografias. ....	19
Quadro 3. Poderes caloríficos médios para os constituintes do palhiço da cana-de-açúcar.....	20
Quadro 4. Valores médios de umidade, massa e poder calorífico útil (PCU) para diversas frações constituintes do palhiço.....	20
Quadro 5. Potencial de produção de eletricidade por tipo de biomassa.....	22
Quadro 6. Definição dos problemas de Programação Linear, Programação Linear Inteira e Programação Linear Mista.....	70

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
Tabela 1. Dados dos talhões da Usina. ....	43
Tabela 2. Área plantada de cada variedade. ....	43
Tabela 3. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação referente à fibra e ao pol segundo as variedades. ....	44
Tabela 4. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação referente ao brix e a umidade segundo as variedades. ....	44
Tabela 5. Média e desvio-padrão referente ao PCS e PCI, segundo variedades. ....	45
Tabela 6. Média e desvio-padrão referente ao PCU e a umidade do palhiço, segundo variedades. ....	45
Tabela 7. Dados das variedades cedidas pela Usina. ....	46
Tabela 8. Desempenho das máquinas para coletar o palhiço ....	46
Tabela 9. Desempenho das máquinas para transportar o palhiço. ....	47
Tabela 10. Dados para o cálculo da estimativa da energia gerada pelo palhiço. ....	47
Tabela 11. Alguns dados necessários para aplicação do modelo (13). ....	48
Tabela 12. Dados das variedades adaptáveis ao solo da Usina. ....	48
Tabela 13. Áreas dos Talhões da Usina. ....	49
Tabela 14. Resultados do Modelo Multiobjetivo com o critério proposto. ....	51

**LISTA DE FIGURAS**

	<b>Página</b>
Figura 1. Uso das terras no Brasil. ....	7
Figura 2. Usinas do Brasil – distribuição por Estado. ....	8
Figura 3. Porcentagem da área ocupada pelas principais variedades de cana-de-açúcar. ....	13
Figura 4. Colheita mecanizada sem queima prévia e operações necessárias para o transporte do palhiço do campo ao centro de processamento. ....	21
Figura 5. Aproveitamento energético do palhiço e bagaço da cana-de-açúcar ....	23
Figura 6. Fluxograma do método <i>Branch-and-Bound</i> multiobjetivo. ....	41
Figura 7. Fronteira de Pareto obtida para o modelo (13) com os dados descritos ....	50
Figura 8. Fronteira de Pareto, solução proposta e custo fornecido pela Usina. ....	51
Figura 9. Representação dos elementos de uma otimização Multiobjetivo bidimensional com dois objetivos. ....	75
Figura 10. Superfície de Pareto para um problema bidimensional com dois objetivos. ....	76

## LISTA DE EXPRESSÕES

	<b>Página</b>
$F = \frac{100 - U - 3b}{1 - 0,01b}$ .....	15
$P = p(3 - 0,01F)$ .....	15
$C_i = \left( \frac{Cecc}{V_i} \right)$ .....	26
$CECC_i = (Q_i C_i)$ .....	26
$CT_{ij} = \left( \frac{Q_i}{V_c} \right) C_{D_j}$ .....	27
$CC_{ij} = (CECC_i + CT_{ij}) L_j$ .....	27
$EB_{ij} = Ec_{Bi} P_{Bi} L_j$ .....	28
$ET_{Bij} = E_{ECij} + E_{Cij} + E_{Tij}$ .....	28
$E_{ECij} = Ec_{EC} L_j P_{Bi}$ .....	28
$E_{Cij} = Ec_c L_j P_{Bi}$ .....	28
$E_{Tij} = Ec_T D_j \left( \frac{V_i L_j}{V_c} \right)$ .....	28
$BE_{ij} = EB_{ij} - ET_{Bij}$ .....	29
$\text{Min} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} ; (-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \right]$ .....	30
$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \alpha_i X_{ij} \geq k\bar{\alpha}$ .....	30
$K\bar{F}_t \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i X_{ij} \leq K\bar{F}_s$ .....	30
$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1$ para todo j .....	30
$PCI = PCS - (600)(9) \left( \frac{h}{100} \right)$ .....	31

$$PCU = PCI \left[ \frac{100 - E}{100} \right] - 6h \dots\dots\dots 32$$

$$U(\%) = (A - B) 100 / A \dots\dots\dots 35$$

### LISTA DE UNIDADES DE MEDIDAS

Centímetro .....	cm
Real por hectare.....	R\$.ha <sup>-1</sup>
Gás Carbônico.....	CO <sub>2</sub>
Graus centígrados .....	°C
Megacaloria por tonelada	Mcal.t <sup>-1</sup>
Megajoule por quilograma.....	MJ.kg <sup>-1</sup>
Megajoule por tonelada.....	MJ.t <sup>-1</sup>
Metro .....	m
Milímetro .....	mm
Quilocaloria por quilograma	kg.ha <sup>-1</sup>
Quilograma .....	kg
Quilograma por hectare .....	kg.ha <sup>-1</sup>
Teor de sacarose .....	pol
Tonelada .....	t
Toneladas por hectare .....	t.ha <sup>-1</sup>



### LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_i$	.....A produção de pol em t.ha <sup>-1</sup> para a variedade de cana-de-açúcar i
$\bar{\alpha}$	.....A média de produção de pol entre as variedades de cana-açúcar pré-selecionadas
$B_i$	.....Produtividade de energia para variedade i, KJ.ha <sup>-1</sup>
$\bar{\beta}$	.....Produção média de energia entre as variedades, em KJ.ha <sup>-1</sup>
$CC$	.....Consumo equivalente de combustível
$CC_{ij}$	.....Custo de coleta do palhico da cana de variedade i plantada no talhão j
$i$	..... Variedades
$j$	..... Talhões
$F_i$	.....Estimativa do teor de fibra da variedade i
$\bar{F}_l$	.....Quantidades mínimas estabelecidas para a fibra
$\bar{F}_s$	.....Quantidades máximas estabelecidas para a fibra
$L_j$	.....Área do talhão j
$PCI$	.....Poder calorífico inferior
$PCU$	.....Poder calorífico útil
$PCS$	.....Poder calorífico superior

## 1. RESUMO

A energia tornou-se um fator determinante do desempenho das empresas, caracterizando-se como uma fonte potencial de vantagem competitiva, a qual tem contribuído de forma significativa para a estrutura de custos. Nos últimos anos, as empresas sucroalcooleiras estão concentrando seus esforços na melhoria de potenciais energéticos, como meio de minimização de custos globais e maximização dos níveis de serviço obtendo maiores lucros, sem perder de vista os fatores ambientais. O objetivo deste trabalho é a investigação e uso de técnicas de otimização para o processo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar, minimizando o custo de recolhimento deste material e maximizando o balanço de energia envolvido no processo. Para isto, foi proposto um modelo de otimização multiobjetivo visando escolher as variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas de forma a minimizar o custo de combustível e maximizar o balanço de energia do processo de recolhimento do palhiço do campo e sua transferência para o centro de processamento para fins energéticos. Os resultados obtidos pelo modelo multiobjetivo foram comparados com dados reais fornecidos por uma Usina na região de Botucatu SP, mostrando que os modelos de otimização podem auxiliar nas tomadas de decisões dentro do setor sucroalcooleiro.

---

**Palavras – chave:** Cana-de-açúcar, modelo matemático, otimização, palhiço, energia.

OPTIMIZING THE USE OF TRASH RAW OF THE HARVEST OF SUGAR-CANE.  
Botucatu, 2009. 91f.

Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências  
Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ADRIANO DAWISON DE LIMA

Adviser: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

## 2. SUMMARY

Energy has become a determining factor in business performance, characterizing itself as a potential source of competitive advantage, which has significantly contributed to the cost structure. In recent years, sugar-ethanol companies are focusing their efforts on the improvement of potential energy as a means of minimizing the overall costs and maximizing the service levels achieving higher profits, without losing sight of environmental factors. The goal is the research and use of optimization techniques to the process of collecting the trash from sugar cane, minimizing the cost of collecting this material and maximizing the balance of power involved in the process. For this, we proposed a model of multiobjective optimization to choose the varieties of sugar cane to be planted to minimize the cost of fuel and maximize the energy balance of the collection of trash from the field and its transfer to

processing center for energy purposes. The results obtained by multiobjective model were compared with actual data provided by a plant in the region of Botucatu SP, showing that optimization models can assist in decision making within the sugar-ethanol companies sector.

---

**Keywords:** Sugar cane, mathematical model, optimization, trash raw, energy.

### 3. INTRODUÇÃO

Energia e Clima estão no centro das preocupações do mundo contemporâneo. A escassez dos recursos energéticos, acompanhado das instabilidades dos preços dos combustíveis fósseis e das alterações climáticas atribuídas à utilização desses combustíveis, tende para um impacto negativo e sem precedentes nas economias Mundiais. Utilizar com mais eficiência os recursos energéticos a partir do aproveitamento de fontes alternativas de energia faz parte dos objetivos e programas dos responsáveis das instituições de pesquisa e governamentais dos mais diversos países, tendo a cogeração de energia como uma medida indispensável para suprir a demanda. Isto decorre da importância que a energia representa como fator determinante do desempenho das empresas, caracterizando-se como uma fonte potencial de vantagem competitiva e contribuindo de forma significativa para a estrutura de custos. Nos últimos anos, muitas empresas estão concentrando seus esforços na melhoria de potenciais energéticos, como meio de minimização de custos globais e maximização dos níveis de serviço obtendo maiores lucros.

O setor sucroalcooleiro está inserido nesta causa, onde a cana-de-açúcar pode ser colhida com ou sem queima prévia. Entretanto, o impacto das queimadas envolve principalmente as questões ambientais e de saúde. Assim, o aumento gradual da colheita de cana crua sem queima prévia passou a ser obrigatória no Estado de São Paulo e com isso a colheita mecanizada tem sido um investimento de interesse para as Usinas, apresentando diferenças nos custos operacionais bastante significativas. Estas dificuldades, aliadas a

quantidade de cana plantada hoje no Brasil, fizeram com que alguns problemas complexos aparecessem, como por exemplo, a quantidade de resíduo deixado no solo que tem provocado danos na própria cultura, o aproveitamento do palhicho para a produção de energia, tem envolvido um número grande de operações, como adensamento, transporte e preparação para a queima em caldeiras, enfrentando restrições devido aos custos elevados.

Uma ferramenta bastante promissora para o auxílio nas tomadas de decisões e também na obtenção de estimativas dentro dessa área, tem sido a modelagem matemática. O presente trabalho propõe a otimização do sistema de recolhimento e transporte da biomassa residual da colheita mecanizada da cana-de-açúcar sem queima prévia, do campo para o centro de processamento, utilizando para isto técnicas de programação linear inteira binária e programação multiobjetivo, visando minimizar o custo deste processo e maximizar o balanço da energia envolvida no sistema.

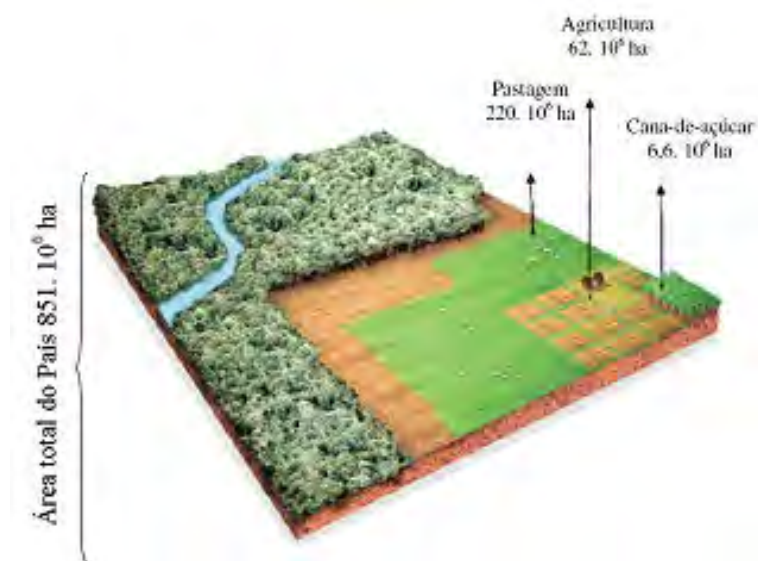
## 4. REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1. O setor sucroenergético brasileiro

De acordo com Goes et al. (2008) o setor sucroalcooleiro modernizou-se nos últimos 30 anos atingindo um elevado estágio de desenvolvimento tecnológico mais dinâmico e promissor da agricultura brasileira, fazendo parte do cenário da agroenergia englobando a produção de açúcar, combustível e eletricidade limpos e renováveis.

Segundo dados da União da Indústria Canavieira - UNICA (2009) o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, são estimados para a safra (2008/2009), 498,1 milhões de toneladas colhidas. A safra será 16% maior do que a (2007/2008), quando foram colhidas 431,2 milhões de toneladas de cana.

Segundo Moraes (2007), o território brasileiro tem  $851.10^6$  ha, dos quais  $463.10^6$  ha são áreas de conservação permanente – Floresta Amazônica, Mata Atlântica, Pantanal Matogrossense, parques e reservas florestais. Restam  $388.10^6$  ha para a agricultura. Desses,  $282.10^6$  ha já estão ocupados com agricultura ou pecuária, restando ainda  $106.10^6$  ha onde se pode produzir. A área de cana-de-açúcar é  $6,6.10^6$  ha o que equivale a 0,78% da área total do País, conforme Fig. 01.



**Figura 1.** Uso das terras no Brasil.  
(Fonte: Moraes, 2007).

A evidência é de que existe área disponível para aumentar em 30 vezes a área atual plantada com cana-de-açúcar, sem prejuízo das áreas de preservação ambiental, as de outras culturas e as de produção de carne (MORAES, 2007).

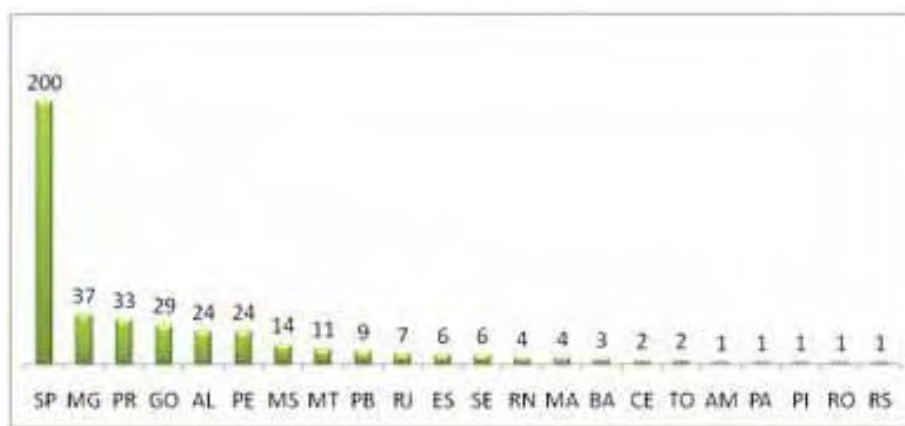
Estimativas da UNICA (2009) para a expansão da produção indicam, para (2010/2011), uma área cultivada de 8,5. 10<sup>6</sup> ha. Para o período de (2015/2016), 11,4. 10<sup>6</sup> ha, e para (2020/2021), 13,9. 10<sup>6</sup> ha, o avanço em área deve-se à melhora da rentabilidade do setor.

Embora a produção do etanol seja a principal opção no momento, a produção do açúcar vem crescendo e mantendo o Brasil como o maior produtor e exportador mundial desse produto, graças ao volume de investimentos aplicados na implantação de novas usinas (GOES et al., 2008).

De acordo com levantamento do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Mapa (2009), o Brasil possui 423 usinas de açúcar e etanol. No total são 249 unidades mistas, produtoras de açúcar e etanol, 158 destilarias exclusivas para fabricação de etanol e 16 usinas que produzem apenas açúcar. O estado de São Paulo segue no topo do ranking de estados com o maior número de plantas industriais, com 200 unidades. Em seguida



vem Minas Gerais, com 37 usinas. Em terceiro lugar está Paraná, com 33 e Goiás com 29. Em quinto lugar estão Alagoas e Pernambuco com 24 unidades cada.



**Figura 2.** Usinas do Brasil – distribuição por Estado.  
(Fonte: Mapa, 2009).

Segundo Rodrigues (2004), desde o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil Colônia até a posição atual de maior produtor mundial de açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro possui considerável importância na economia nacional tendo acompanhado seu desenvolvimento tecnológico, sendo hoje um exemplo do elevado grau de desenvolvimento do agronegócio brasileiro. A importância estratégica do setor sucroalcooleiro está associada ao potencial energético da cana-de-açúcar, potencial este explorado essencialmente através da produção de álcool como combustível de automóveis.

Para Goes et al. (2008) o Brasil domina a tecnologia de ponta para fabricação do etanol, impulsionando o programa de etanol por dois grandes fatores: a mistura obrigatória à gasolina e a expansão do mercado de carros bicombustíveis. A indústria automobilística fez pesados investimentos no melhoramento dessa tecnologia e, nos dias atuais, montadoras oferecem mais de 60 modelos de carros bicombustíveis pelo mesmo preço que as versões movidas à gasolina.

De acordo com Goes et al. (2008) a principal atratividade da substituição do óleo diesel pelo etanol é o grande benefício para o meio ambiente, sendo que o êxito do programa brasileiro está enraizado nas comprovadas vantagens econômicas do etanol de cana-de-açúcar como uma das principais fontes de energia limpa, uma vez que o mundo

passou a reconhecer a necessidade de mudar sua matriz energética, até agora baseada em combustíveis fósseis. Novos estudos demonstram que o álcool gera 9,3 unidades de energia renovável para cada unidade de combustível fóssil utilizada em seu ciclo de produção. Essa relação pode melhorar ainda mais nos próximos anos. O balanço energético de outras matérias-primas, como milho, grãos e beterraba, raramente passam de duas unidades de energia renovável para cada unidade de energia fóssil utilizada na produção.

Segundo Carvalho (2008), a bioeletricidade é o mais importante novo produto do setor sucroenergético, capaz de impulsionar uma nova revolução de desenvolvimento tecnológico, agregando renda, melhorando a competitividade do açúcar e do etanol e, conseqüentemente, promovendo a expansão do mercado. É importante frisar que todas as usinas e destilarias são auto-suficientes na produção de energia elétrica, por meio de co-geração ou bioeletricidade.

Para Procknor (2008), a bioeletricidade é produzida através da queima do bagaço da cana. Isso já acontece nas usinas de açúcar e destilarias de etanol, mas será possível produzir muito mais energia se além do bagaço for também aproveitado o palhiço da cana-de-açúcar, resíduo proveniente da colheita mecanizada da cana sem queima prévia, queimados em caldeiras de alta eficiência, porém o custo de transporte e da preparação do palhiço deve ser cuidadosamente avaliado, para levar mais da metade do palhiço do campo até o centro de processamento é considerado caro devido a baixa densidade do material, tornando inviável o processo de transferência.

Assim para Ripoli et al. (2006), aproximadamente dois terços de todo o potencial energético teórico da cana-de-açúcar, representados pelo bagaço e o palhiço, começam a ser aproveitados na sua totalidade. A composição da energia primária presente na cana-de-açúcar respeita, a grosso modo, a seguinte relação: um terço no caldo de cana, um terço no bagaço e um terço no palhiço. Até aqui, tem-se utilizado os açúcares do caldo para produzir açúcar e etanol, enquanto a maior parte do bagaço é queimada para gerar vapor e bioeletricidade em um processo de baixa eficiência energética.

De acordo com Parra (2005), este desenvolvimento é fruto de investimentos em tecnologias e pesquisas e pode ser visualizado na variedade de canas cultivadas no Brasil, no aumento da mecanização da colheita, nos modernos sistemas de irrigação e no melhor aproveitamento dos subprodutos da produção de álcool e açúcar. O

desenvolvimento brasileiro na produção de álcool e açúcar associado às condições naturais tornou os produtos brasileiros extremamente competitivos.

Segundo Searchinger et al (2008), o setor dos transportes de veículo motorizado no mundo é quase exclusivamente dependente de energia à base de combustíveis fósseis e muita atenção tem sido dada à utilização da biomassa como base para a produção de combustível limpo. Em um cenário em que se destaca a preocupação com o aquecimento global e se visualiza o aproveitamento das potencialidades nacionais, a competitividade da cana-de-açúcar para fins energéticos é o elemento que justifica a expansão expressiva da produção de etanol, inclusive com excedentes exportáveis. O uso mais intenso do etanol como combustível automotivo reduz a demanda de gasolina, aliviando as emissões de gases de efeito estufa e pressões sobre a demanda e o refino de petróleo.

Nesse contexto, espera-se também um aumento importante da produção dos demais derivados da cana-de-açúcar, em especial o palhiço destinado à geração de energia elétrica. No entanto, para que os biocombustíveis possam substituir os combustíveis fósseis, depende da maneira pela qual eles podem ser produzidos, pois, todos envolvem tecnologias de transformação diretamente ou indiretamente da utilização de combustíveis fósseis, e da forma de manejo adequado da sua matéria-prima, cana-de-açúcar.

#### **4.2. Cana-de-açúcar**

Segundo Leão (2002) o acompanhamento do cultivo da cana-de-açúcar é de grande importância, pois constituem fatores que podem elevar o desempenho do canavial pelo aumento da produtividade, proporcionando maiores retornos financeiros ao produtor e ao setor sucroalcooleiro. Deve-se atentar para alguns fatores considerados necessários para o bom desempenho da cultura como por exemplo: preparo do solo adequado, o plantio realizado na época recomendada, o uso de variedades adaptáveis a região de cultivo, o acompanhamento nas fases de crescimento da cana planta ou de primeiro corte e da cana soca cortes subsequentes, com destaque ao controle de pragas (RIPOLI et al.,2006).

A elaboração de estimativas de produtividade para fins de planejamento não é simples. Para projeções que vão desde as áreas de lavoura até o processo

de extração da matéria prima e aproveitamento da biomassa em forma de energia no Setor Sucroalcooleiro, são realizadas as projeções por meio de um acompanhamento sistemático em planilhas eletrônicas por empresas terceirizadas e capacitadas, onde se estima a produção de cada variedade ao longo dos anos, observando-se o número de cortes viável em cada ciclo (BEUCLAIR; PENTEADO, 1984).

O ambiente em que a cultura está instalada promove diferentes resultados nas plantas de cana-de-açúcar dependendo do seu estágio fenológico. Para a obtenção de derivados de cana-de-açúcar de qualidade, torna-se necessário que a variedade cultivada apresente características como: boa produtividade de colmos por hectare, alto teor de sacarose, teor médio de fibra da cana, resistência as principais doenças e pragas, fácil despalha, resistência ao tombamento, boa adaptação aos diferentes tipos de solo e clima, boa brotação de soqueira, rápido crescimento inicial e fechamento, ausência de joçal, ausência de rachaduras e período de utilização industrial (FERNANDES, 2005).

#### **4.2.1. Clima**

Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a que apresenta maior dependência das condições climáticas, sendo que para a cultura de cana-de-açúcar o clima é considerado um grande responsável no seu desenvolvimento. Em termos de exigência climática, considera-se como temperatura base para o bom desempenho da cultura variando de 25 a 30 °C, visto que a luminosidade interfere diretamente no seu desempenho sendo um dos principais fatores determinantes da produtividade agrícola. Existem diversos estudos conduzidos no intuito de relacionar parâmetros climáticos com maior produtividade (ANDRADE, 2006; DOOREMBOS; KASSAN, 1979).

#### **4.2.2. Solo**

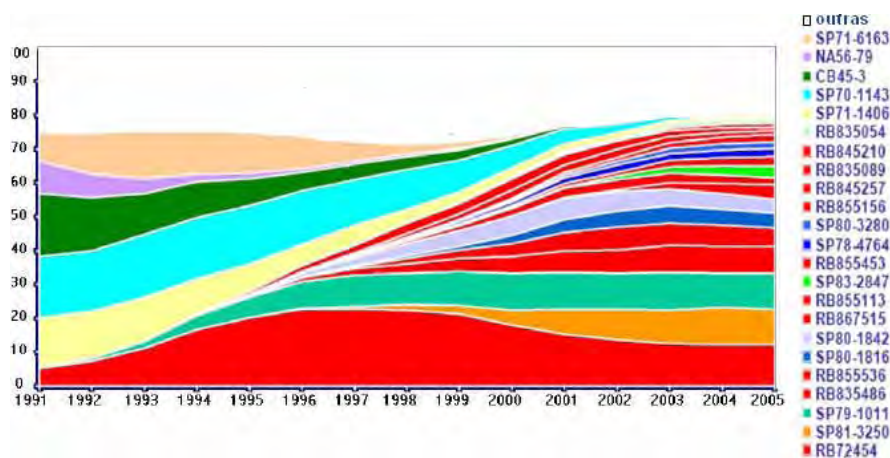
O preparo do solo para a cultura da cana deve ser bem executado, uma vez que um canavial vai proporcionar vários cortes econômicos e o solo vai

ser submetido a análises e se preciso novos tratos culturais de ação superficial, enfatizando a região, o tipo de solo, a situação que se encontra o talhão e a disponibilidade de equipamento, (ANDRADE, 2006; DEMATTÊ, 2004). Segundo Andrade (2006), os canaviais brasileiros apresentam níveis relativamente baixos de perdas de solo graças ao caráter semi-perene da cana-de-açúcar. A tendência é de que a capacidade de conservar e reter o solo nas áreas canavieiras aumente expressivamente nos próximos anos, em consequência da utilização do palhiço da cana, uma vez que parte dele será deixado nos campos como material orgânico após a colheita mecânica.

De acordo com Andrade (2006), por causa dos constantes trabalhos de melhoramento genéticos realizados por empresas especializadas em pesquisas, a cana-de-açúcar tem-se adaptado a diferentes tipos de solos, sendo que para cada tipo haverá uma variedade mais adequada para o plantio.

#### **4.2.3. Variedades**

Goes et al. (2008) relatam que o pioneirismo e a tradição brasileira no cultivo de cana-de-açúcar proporcionaram grandes avanços nos aspectos produtivos desta gramínea. A evolução das cultivares é um exemplo disso. Nos anos 70, com o surgimento do Programa Nacional de Produção de Álcool – Proálcool, os agricultores iniciaram o plantio da cana em áreas novas, de baixa fertilidade, com base na variedade SP70-1143, de características rústicas, que tornou a variedade mais plantada no Estado de São Paulo. No início dos anos 90, seis variedades dominavam as áreas produtivas, dez anos mais tarde esse número praticamente triplicou, veja exemplo na Fig.03.



**Figura 3.** Porcentagem da área ocupada pelas principais variedades de cana-de-açúcar. (Fonte: Canaplan, 2007)

Matsuoka et al. (1998) afirmam que cada variedade tem um grau diferente de adaptabilidade aos mais diversos ambientes em que ela é cultivada, e esta não se refere apenas ao ambiente físico de solo e clima, mas também a todas as condições de manejo da cultura, desde o plantio até a colheita. A substituição de variedades por outras mais produtivas, melhor adaptadas às condições de manejo, tem-se mostrado uma necessidade constante. Além da importância do uso de variedades adaptadas ao sistema de manejo da cultura e da época de plantio.

#### 4.2.4. Épocas de cultivo na região Centro-Sul

Para Andrade (2006), as épocas ideais para o cultivo da cana de ano e meio é de janeiro a março e para a cana de ano é de outubro a novembro.

Conforme Coleti (1987), os estádios de desenvolvimento da cana de ano e meio iniciam-se durante os três meses favoráveis que são janeiro, fevereiro e março, o qual ocorre a brotação; de abril a agosto permanece em repouso, praticamente sem se desenvolver; de setembro a março floresce com grande intensidade, passando para o último estágio que é o processo de maturação. A cana de ano tem um comportamento diferente, onde de outubro a novembro ocorre a brotação; e de março a abril desenvolve-se vegetativamente, passando para o estágio de maturação.

Os dois processos após o primeiro corte tem ciclo das socas de 12 meses. As usinas, destilarias e alambiques trabalham em época de safra de maio a dezembro, onde a cana é madura neste período, proporcionando maiores rendimentos, por isso a cana de ano e meio é mais utilizada que a cana de ano, (ANDRADE, 2006).

#### **4.2.5. Principais características da cana-de-açúcar**

A qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima industrial pode ser definida por uma série de características intrínsecas da própria planta, alteradas pelos manejos agrícolas e industriais, que definem seu potencial para produção de açúcar e álcool. Sob os aspectos tecnológicos, os colmos são constituídos de caldo e de fibra (FERNANDES, 2003). Para Stupiello (1987), a qualidade da cana-de-açúcar depende de um grupo de atributos e não se deve apenas considerar como um sinônimo do conteúdo de sacarose, ainda que seja o parâmetro mais importante. Alguns dos diversos atributos considerados para indicar a qualidade são: Pol da cana, brix do caldo e fibra da cana.

Brix, segundo Fernandes (2003), é o parâmetro mais utilizado na indústria do açúcar e do álcool. Estritamente, expressa a porcentagem aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura.

Fibra é a porção do colmo da cana-de-açúcar insolúvel em água, incluindo toda a matéria estranha que acompanha os colmos (LOPES, 1986; GRAVOIS e MILLIGAN, 1992).

A quantidade de fibra na cana-de-açúcar tem influência direta no processo de moagem, pois se tem que uma porcentagem de fibra muito alta significa uma baixa quantidade de caldo extraído e, conseqüentemente, baixa produção de açúcar. Por outro lado, como a fibra é utilizada para a produção de energia na queima das caldeiras, uma porcentagem muito baixa requer um custo de energia mais elevado no processo (GRAVOIS; MILLIGAN, 1992). A fibra % da cana é calculada a partir da expressão proposta por Novaes et al. (1974):

$$F = \frac{100 - U - 3b}{1 - 0,01b} \dots\dots\dots(1)$$

onde,

F= Fibra % da cana

U= Umidade da cana

b = Brix do extrato do digestor

De acordo com Lopes (1986), Pol é a quantidade em peso de sacarose em 100 ml de solução, medida pelo desvio ótico provocado pela solução, no plano de uma luz polarizada. O índice Pol da cana sofre influência do teor de fibra da cana (STUPIELLO, 1987). O Pol da cana é calculado a partir da expressão proposta por Novaes et al. (1974):

$$P = p(3 - 0,01F) \dots\dots\dots(2)$$

onde,

P = pol % de cana

p = pol do extrato do digestor ( leitura sacarimétrica x fator de pol – tabelado)

F= fibra % de cana.

A quantidade de sacarose presente no caldo é fundamental para um bom processamento e rendimento e, os açúcares redutores, quando em teores elevados, indicam um estágio pouco adiantado de maturação da cana-de-açúcar, o qual é determinado com o auxílio de um refratômetro de campo, representado por uma leitura simples de amostra homogênea do caldo de três colmos por parcela, após passagem por uma moenda, (FORTES, 2004).

O Setor Sucroalcooleiro indica parâmetros que definem a qualidade da cana a ser comprada, veja exemplo no quadro 1.



**Quadro 1.** Indicadores da qualidade da cana-de-açúcar

Indicador	Valor recomendado pela Fermentec <sup>1</sup>
Pol	> 14%
Pureza (Pol / Brix)	> 85%
Fibra	11 a 13%
Umidade	Aprox. 71%

**Fonte:** Fermentec, 2008.

<sup>1</sup>Empresa de Pesquisa & Desenvolvimento em Tecnologia Industrial do Setor Sucroalcooleiro

#### 4.2.6. Colheita mecanizada sem queima prévia

A mudança no tipo de corte da cana-de-açúcar, de manual para mecânico, não é apenas uma mera substituição de uma técnica por outra, Costa Neto (2006) adverte que a mecanização da colheita de cana é inevitável e que uma colhedora de cana equivale a 100 cortadores, podendo chegar a um rendimento de 15 a 20 t.h<sup>-1</sup> contra 5 a 6 t.dia<sup>-1</sup> por pessoa.

Segundo Souza et al. (2005), em termos agrícolas significa otimizar alguns aspectos como: o preparo do solo na lavoura, o dimensionamento dos equipamentos no campo, a equipe de manutenção e apoio, o treinamento do pessoal envolvido e as alterações no transporte e recepção da cana na indústria, sendo também que a mudança no sistema de produção da cana-de-açúcar tem ocorrido principalmente pelo aspecto da emissão de gases poluentes na atmosfera e preservação do meio ambiente atendendo à legislação ambiental.

A cana-de-açúcar, quando cultivada para o corte mecanizado, deve ser adaptada para tal atividade. Devido às limitações das máquinas para o corte da cana-de-açúcar, a cultura deve ter algumas características consideradas prioritárias para o sucesso desse sistema de produção. O cultivo ideal para o corte mecanizado deve preconizar menor densidade de colmos na linha de plantio, alta produtividade e o porte ereto (não estar tombada, acamada), o desafio está em associar as duas primeiras características com boa produção da forragem, fatores na maioria das vezes contraditórios (CAMPOS, M.S.; MARCONATO, 1994; BALSALOBRE et al, 1999).

O sistema de colheita é composto por três subsistemas: o subsistema de corte e carregamento, o subsistema de transporte e o subsistema de recepção. Cada

subsistema tem interfaces que incluem aspectos comuns, os quais estabelecem um fluxo da matéria-prima do campo à indústria e que precisam ser alterados para compor-se ao novo arranjo técnico (RIPOLI; PARANHOS, 1987).

A colheita do colmo é feita por meio do corte basal e apical, desponte; o primeiro pode ser realizado pela colhedora em diferentes alturas, a depender de fatores como regulagem das facas e das condições do terreno, pois, conforme a topografia há maior ou menor aproveitamento da matéria-prima, (BRAUNBECK; CORTEZ, 2005).

Após efetuar a colheita dos colmos, tem início a brotação da soca, e um novo processo de perfilhamento é estabelecido, a brotação constitui fase importante, pois uma boa brotação reflete um bom começo, que trará à área cultivada plantas vigorosas, que resultarão, no final do ciclo, em colheita compensadora (SILVA et al., 2005). A colheita da cana-de-açúcar neste sistema deixa espessa camada de palhiço sobre o solo, estima-se que, no estado de São Paulo, esse valor varia de 13 a 20mg.ha<sup>-1</sup> de matéria seca (TRIVELIN et al., 1996).

O palhiço é o resíduo gerado pelo sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar sem a queima, obtido em grande quantidade de folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidade variável de pedaços de colmo, que são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal. Carvalho et al. (1996) pesquisaram as conseqüências causadas por restos culturais da colheita, com e sem queima prévia, na rebrota e na produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar e chegaram a conclusão de que no palhiço inteiro, resultante do corte de cana crua, ocorreu redução da rebrota inicial nas variedades SP70-1143 e RB72454, porém não afetou o número de colmos finais.

Abramo Filho et al. (1993) estudaram a biomassa da colheita mecanizada de cana crua e depararam com uma camada de 8 a 10 cm de palhiço, fazendo com que a temperatura do solo fosse 5 °C mais baixa que a ambiente. Os autores afirmam que as quantidades físicas de resíduos resultantes da colheita da cana dependem de uma série de condições intrínsecas a máquina colhedora, à planta e ao manejo da cultura. Foi notada também, entre outras observações, uma maior manutenção da umidade do solo e controle de uma grande variedade de plantas daninhas. Manechini (2000), em pesquisas do efeito do palhiço da cana sobre o combate de plantas daninhas, concluiu que se for deixado acima de

66% do resíduo da cana no campo, há um controle de ervas daninhas anuais com eficiência acima de 90%, competindo com herbicida empregado na produção.

Sartori (2001) realizou um estudo sobre o palhiço e constatou que existe uma ampla variação na quantidade de resíduos resultantes da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia no intervalo de 6,0 t.ha<sup>-1</sup> a 22,8 t.ha<sup>-1</sup> de palhiço, variação essa decorrente da variedade plantada, idade da planta e condições climáticas.

Ripoli (2002), no seu estudo sobre o mapeamento de palhiço enfardado de cana-de-açúcar, concluiu que sua variabilidade espacial é muito grande, encontrando valores que variaram de 4,74 a 14,56 t.ha<sup>-1</sup>, com umidade também bastante variável (de 11,1 a 39,6%), alertando ainda que maiores cuidados nas amostragens e decisão da produtividade desse material precisam ser tomados. Abramo Filho et al. (1993) estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram 21,3 t.ha<sup>-1</sup> de palhiço com umidade de 22,34%. Encontrou também 6,92% de terra junto ao palhiço, o que pode danificar os equipamentos e tornar o custo para o emprego do resíduo inviável.

Ripoli (2002) afirma que a cultura canavieira pode gerar biomassa da ordem de 15 a 30% em peso da parte aérea das plantas, dependendo das condições de campo (variedade, idade, número de cortes e condições edafoclimáticas).

O quadro 2 mostra os valores apresentados por diversos autores para a produtividade do palhiço resultante da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia, mostrando a ampla variação destes valores, devido a utilização de diferentes variedades, variações climáticas e de umidades, tipo de solo, etc. Contudo pode-se observar baseado nestes autores que a produtividade do palhiço é em média 21,5 t.ha<sup>-1</sup>.

**Quadro 2.** Dados sobre produtividade do palhiço obtidos em diversas bibliografias.

Autores	Produtividade do palhiço (t.ha <sup>-1</sup> )
Ripoli et al. (1990)	9,70
Ripoli et al. (1991)	21,60
Abramo Filho et al. (1993)	21,30
Molina Jr et al. (1995)	33,85
Ripoli et al. (1995)	33,25
Ripoli et al. (1995)	26,35
Furlani Neto et al. (1996)	13,61
Furlani Neto et al. (1996)	24,32
Ripoli et al. (1998)	11,25
Sartori (2001)	14,40
Torrezan (2003)	27,10

Vários autores afirmam que o volume de palhiço sob a cana soca dificulta a sua emergência, causando falha na rebrota, alterando a temperatura do solo, favorecendo o aparecimento de pragas, estabelecendo necessária reformulação nas práticas de coleta e aproveitamento dessa biomassa, até então não empregadas no manejo da cana colhida com queima (COSTA et al., 2003; ZAMBON (1999)).

#### 4.2.7. Poder energético do palhiço

Para Ripoli et al. (1998) se parte do palhiço fosse deixado no campo, esse poderia melhorar as condições do solo, pois é uma boa fonte de matéria orgânica e nitrogênio. Segundo Castro (2001), o palhiço aproveitado pelas usinas, aumenta o potencial de co-geração de eletricidade através dos canaviais em até duas vezes.

A caracterização do palhiço da cana-de-açúcar como combustível foi realizada pela COPERSUCAR (1998). A análise da palhiço foi realizada em seus três componentes: folhas verdes, folhas secas e ponteiros e mostrou que seus componentes

apresentam diferenças importantes em umidade, teor de álcalis e outras características, mesmo sendo semelhantes na composição básica de celulose, hemicelulose e lignina. Fatores como a variedade de cana, idade, número de cortes, e do uso ou não de vinhoto na fertirrigação e do campo exercem influência importante nas características. Os resultados estão apresentados no quadro 3.

**Quadro 3.** Poderes caloríficos médios para os constituintes do palhiço da cana-de-açúcar

Material	Cinza*	Voláteis*	Carbono fixo*	Teor de umidade	PCS* MJ.kg <sup>-1</sup>
Folhas secas	3,3	85,8	10,8	11,3	17,36
Folhas verdes	3,2	85,2	11,7	66,7	17,38
Ponteiros	4,3	84,1	11,6	82,5	16,27

**Fonte:** Coopersucar, (1998).

\*Base seca

Ripoli et al. (1991) pesquisaram o potencial energético contido em resíduos de colheita de cana crua nas variedades SP70-1284; SP-701143; SP-706163; SP71-1406 e NA5679, no Estado de São Paulo, os resultados estão apresentados no quadro 4.

**Quadro 4.** Valores médios de umidade, massa e poder calorífico útil (PCU) para diversas frações constituintes do palhiço.

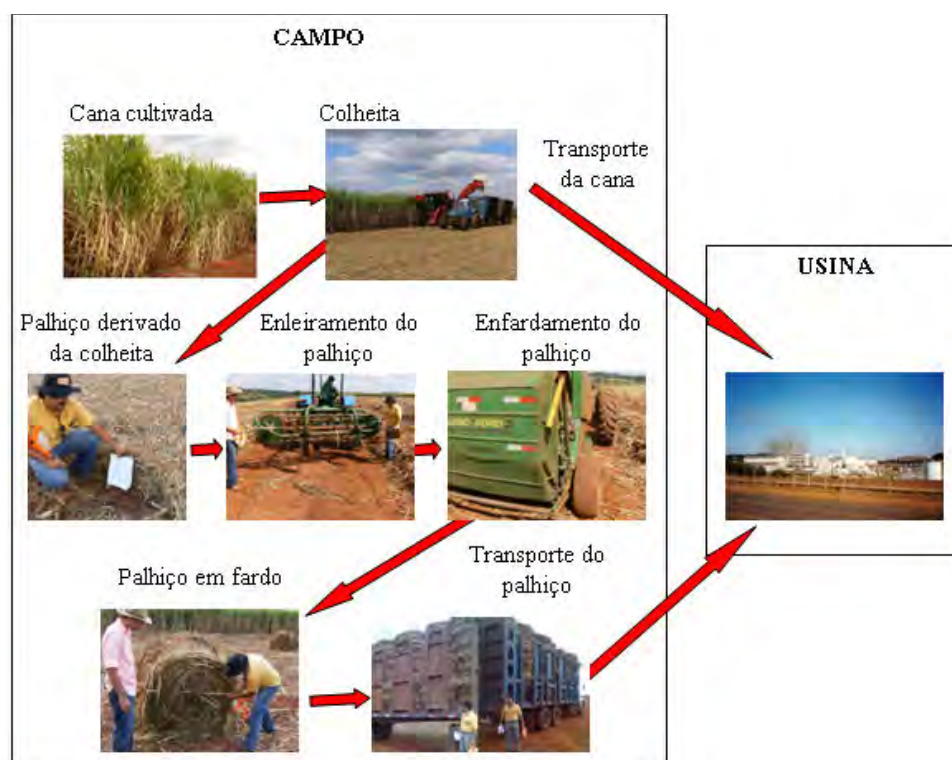
Variáveis	Médias	CV <sup>a</sup>	DP <sup>b</sup>
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	888,0	13,34	118,50
Folhas verdes			
Umidade (%)	66,21	5,90	3,88
Massa (t.ha <sup>-1</sup> )	6,87	29,80	2,05
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	1.344,8	12,41	166,95
Palhas			
Umidade (%)	8,81	27,47	2,42
Massa (t.ha <sup>-1</sup> )	8,74	32,38	2,83
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	3.609,0	0,67	24,25
Palhiço Ponderal			
Umidade (%)	46,11	11,23	5,18
Massa (t.ha <sup>-1</sup> )	21,61	23,80	5,14
PCU (Mcal.ha <sup>-1</sup> )	45.783,4	24,40	11.152,1

**Fonte:** Ripoli et al. (1991)

a = Coeficiente de variação

b = Desvio padrão.

Segundo Bizzo (2007) atualmente, o setor sucroalcooleiro utiliza a energia proveniente do bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade para seu próprio consumo. A queima do bagaço produz, em média, uma quantidade de energia igual a  $4450 \text{ kcal.kg}^{-1}$ . Estudos recentes vem aumentando a perspectiva de utilização da biomassa proveniente da colheita da cana-de-açúcar crua, a coleta do palhicho é realizada após ele secar naturalmente no campo, ao atingir aproximadamente 30% de umidade. Sua recuperação pode ser feita então, de forma mecanizada, através de máquinas enleiradoras, enfardadoras e de carregamento, BIZZO (2007). A Fig.4 ilustra este processo.



**Figura 4.** Colheita mecanizada sem queima prévia e operações necessárias para o transporte do palhicho do campo ao centro de processamento.

O desperdício energético do não aproveitamento do material remanescente na colheita, representado pelos ponteiros, folhas verdes e palhas são 34,9% da

energia produzida em um hectare de cana e tem equivalentes energéticos de cerca de 30 barris/ha de petróleo ou poder calórico de 1,08 toneladas de bagaço, portanto, eliminada a colheita sem a queima prévia, o palhiço remanescente sobre a terra e proveniente da colheita mecanizada facultaria no recolhimento e utilização para co-geração de energia elétrica nas próprias indústrias sucroalcooleiras. (RIPOLI, 1991; RIPOLI; RIPOLI, 1996).

Pereira (2001) estima que o potencial de co-geração pode chegar a 6.000 MW de potência ao adicionar-se o palhiço com o bagaço de cana no momento da combustão.

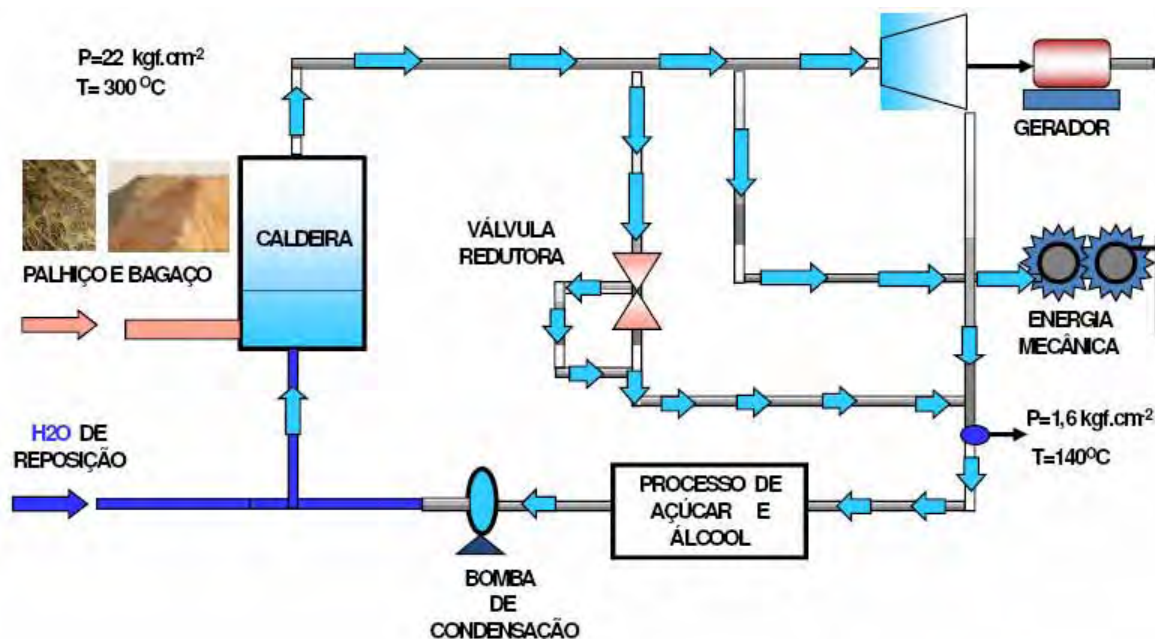
Segundo Bizzo (2007), o poder calorífico do palhiço equivale ao da madeira e é superior ao próprio bagaço da cana, veja exemplo na quadro 5, o que o torna um importante produto para a co-geração de energia elétrica para o próprio setor ou para venda.

**Quadro 5.** Potencial de produção de eletricidade por tipo de biomassa.

<b>Biomassa</b>	<b>Potência Kw</b>
Eucalipto	2.250
Bambu	2.500
Pinus	2.250
Mandioca resíduo	490
Cana – bagaço	1.900
Cana – palhiço	2.250
Cana - etanol	2.850

**Fonte:** Bizzo (2007).

Conforme Bizzo (2007), a biomassa pode ser convertida em energia de forma direta ou indireta. Na forma direta, a biomassa é queimada em caldeiras, o que gera vapor e aciona uma turbina. Já na forma indireta, a produção de gás combustível ocorre a partir da biomassa, que movimenta uma turbina a gás. Segundo Bizzo (2007), o setor sucroalcooleiro utiliza a energia proveniente do bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade para seu próprio consumo, veja ilustração na Fig. 05. A queima do bagaço produz em média  $4450 \text{ kcal.kg}^{-1}$  de energia. Estudos recentes vêm aumentando a perspectiva de utilização da biomassa proveniente da colheita da cana-de-açúcar crua junto com o bagaço proveniente da moagem na usina.



**Figura 5.** Aproveitamento energético do palhico e bagaço da cana-de-açúcar

No que segue, será discutido a modelagem matemática como ferramenta para auxílio nas tomadas de decisões e resolução de problemas no setor sucroalcooleiro.

### 4.3. Modelagem matemática no setor sucroalcooleiro

Vários trabalhos matemáticos foram desenvolvidos no intuito de auxiliar o setor sucroalcooleiro buscando estimar a produtividade da cana-de-açúcar, aumentar os rendimentos, baixar os custos e racionalizar as relações entre os diferentes fatores de produção visando o máximo desempenho (BEAUCLAIR; PENTEADO 1984; BITTENCOURT et al., 1989; HUMBERT, 1968; MATIOLI, 1998; PENATTI, 1991; SCARPARI, 2002, dentre outros).



No Brasil, a partir da década de 1990, pode-se perceber o surgimento de algumas contribuições sobre a utilização de métodos de otimização na indústria sucroalcooleira.

Iannoni; Morabito (2006) estudaram o sistema de recepção de cana de uma usina, utilizando simulação discreta para analisar a logística de transporte de cana.

Higgins; Davies (2005) aplicaram simulação computacional para planejar a capacidade do sistema de transporte de cana-de-açúcar.

Kawamura et al. (2005) apresentaram um modelo de programação linear, multi-período, para tratar decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de comercialização de açúcar e álcool.

Cock et al. (2000) apresentaram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise do custo total de processamento das variedades.

Colin et al. (1999) apresentaram um modelo de programação linear para otimização do sistema logístico de distribuição e armazenamento de açúcar, considerando um depósito central e diversos depósitos secundários.

Yamada (1999) utilizou redes Petri atemporizadas para modelar todas as etapas de produção de açúcar e álcool, procurando validar a utilização desta técnica tanto para as etapas discretas quanto para as etapas contínuas desse processo produtivo.

Higgins et al. (1998) aplicaram um modelo de programação matemática para a determinação da programação da colheita de cana-de-açúcar ao longo de uma safra.

Yoshizaki et al. (1996) aplicaram programação linear para modelar o problema da distribuição centralizada de álcool no sudeste do Brasil.

Grisotto (1995) apresentou um modelo de otimização do tempo de viagem de caminhões utilizados no transporte de cana-de-açúcar.

Lopes (1995) modelou um sistema de transporte, carregamento e reboque a fim de identificar e analisar as variáveis que influenciam o custo de cada uma das operações envolvidas.

Mathew; Rajendran (1993) utilizaram simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira, onde se pretendeu determinar um bom intervalo entre as paradas para manutenção da usina.

Barata (1992) utilizou programação linear para desenvolver um modelo de avaliação técnico-econômica aplicado às questões relacionadas ao corte e a reforma de canaviais.

Abel et al. (1981) desenvolveram um modelo de programação da colheita de cana-de-açúcar, utilizando transporte ferroviário.

Whan et al. (1976) desenvolveram um modelo de composição de variedades de cana-de-açúcar, objetivando otimizar o retorno financeiro de uma fazenda e tendo em conta a programação da colheita que seria adotada na safra (curva de sacarose).

Além destes trabalhos, outros mais recentes apresentam modelos e métodos de otimização matemática aplicados à programação e integração do corte de cana com o transporte e aproveitamento da energia desta matéria-prima. (HIGGINS, (2006); LIMA (2006); LIMA; FLORENTINO, (2006); MILAN et al., (2006); SPADOTTO; FLORENTINO, (2006); HIGGINS; DAVIES, (2005); FLORENTINO (2005), TOLENTINO et al., (2005))

Desta forma, percebe-se que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro. O destaque é para modelos de planejamento da colheita, modelos de programação do transporte de cana, de distribuição e armazenagem de açúcar e álcool, de seleção de variedades e de programação da reforma do canavial. Com a proibição da queima da biomassa proveniente da colheita mecanizada de cana crua, várias usinas em parceria com órgãos de pesquisas, estudam a forma correta de retirada do palhico do campo e aproveitamento para a geração de energia, realizando ensaios de maquinários que torne mais viável essa operação de transferência.

A seguir serão apresentados alguns modelos matemáticos que serão úteis para o desenvolvimento deste trabalho.

### 4.3.1. Custo de coleta e aproveitamento do palhiço

Neste item são apresentadas formas matemáticas para o cálculo do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar. Baseado no trabalho de Ripoli (1991) foi mostrado que o processo de coleta do palhiço passa pela etapas de enleiramento, compactação, carregamento do caminhão e transporte do campo e é dado em R\$.m<sup>-3</sup>, e calculado por :

$$C_i = \left( \frac{Cecc}{V_i} \right) \dots\dots\dots(3)$$

onde,

Cecc é o custo por tonelada para enleirar, compactar e carregar o caminhão com palhiço em (R\$.t<sup>-1</sup>), e V<sub>i</sub> é o volume ocupado por uma ton. do palhiço da variedade i depois de compactada, em m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup>.

O custo calculado em (03) pode ser convertido em R\$.ha<sup>-1</sup> como se segue:

$$CECC_i = (Q_i C_i) \dots\dots\dots(4)$$

onde,

Q<sub>i</sub> é uma estimativa do volume do palhiço produzido pela variedade i por hectare de cana, m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>.

O custo (C<sub>Dj</sub>) para o caminhão percorrer uma única vez a distância D<sub>j</sub> do talhão j para a usina, em R\$, é determinado da seguinte forma:

$$C_{D_j} = (D_j C_o P)$$

onde,

D<sub>j</sub> é a distância em km, C<sub>o</sub> é o consumo de combustível do caminhão a ser usado no transporte (L.km<sup>-1</sup>) e P é o preço do combustível em R\$.L<sup>-1</sup>

Assim, o custo para transportar o palhiço de um hectare de cana da variedade  $i$  produzido no talhão  $j$  (em  $R\$.ha^{-1}$ ) é calculado por:

$$CT_{ij} = \left( \frac{Q_i}{V_c} \right) C_{D_j} \dots\dots\dots(5)$$

onde,

$V_c$  é volume disponível do caminhão em  $m^3$ .

Pode se observar que  $\left( \frac{Q_i}{V_c} \right)$  é o número de vezes que o caminhão necessita percorrer a distância  $D_j$  para transportar o palhiço gerado em um hectare de cana da variedade  $i$ , do talhão  $j$  ao centro de processamento. Portanto o custo de coleta do palhiço da cana de variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  é calculado por:

$$CC_{ij} = (CECC_i + CT_{ij}) L_j \dots\dots\dots(6)$$

onde,

$CECC_i$  = custo para enleirar, compactar e carregar o caminhão com palhiço da variedade  $i$ , ( $R\$.t^{-1}$ );

$CT_{ij}$  = custo para transportar o palhiço de um hectare de cana da variedade  $i$  produzido no talhão  $j$ , ( $R\$.ha^{-1}$ );

$L_j$  = área do talhão  $j$ .

#### 4.3.2. Balanço de energia proveniente do palhiço

Neste item é apresentada uma forma para o cálculo do balanço de energia para o processo da coleta do palhiço baseado no trabalho de Ripoli (1991), considerando que a variedade  $i$  foi plantada no talhão ( $j$ ) de medida  $L_j$  (ha). O balanço de

energia é calculado pela diferença da energia produzida pelo palhiço e a energia em forma de combustível gasta pelos maquinários envolvidos no processo.

A energia da biomassa residual de colheita da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ ,  $EB_{ij}$  é calculada pela expressão:

$$EB_{ij} = Ec_{Bi} P_{Bi} L_j \dots\dots\dots(7)$$

onde,

$Ec_{Bi}$  é a estimativa da energia calorífica gerada por uma tonelada de palhiçoda variedade  $i$  ( $MJ.ton^{-1}$ ),  $P_{Bi}$  é a estimativa da massa do palhiço gerada por um hectare de cana da variedade  $i$ , em  $ton.ha^{-1}$  e  $L_j$  é a área do talhão  $j$  (ha).

A energia gasta no processo de transferência da biomassa da variedade  $i$ , plantada no talhão  $j$ , para o centro de processamento ( $ET_{Bij}$ ), é dada pela soma da energia utilizada para enleirar e compactar ( $E_{ECij}$ ), carregar ( $E_{Cij}$ ), e transportar ( $E_{Tij}$ ) esta biomassa.

$$ET_{Bij} = E_{ECij} + E_{Cij} + E_{Tij} \dots\dots\dots(8)$$

onde,

$E_{ECij}$ ,  $E_{Cij}$ ,  $E_{Tij}$  São as energias gastas para enleirar e compactar, carregar e transportar o palhiço da variedade  $i$  do talhão  $j$  para o centro de processamento.

E são calculadas da seguinte forma:

$$E_{ECij} = Ec_{EC} L_j P_{Bi} \dots\dots\dots(9)$$

$$E_{Cij} = Ec_C L_j P_{Bi} \dots\dots\dots(10)$$

$$E_{Tij} = Ec_T D_j \left( \frac{V_i L_j}{V_c} \right) \dots\dots\dots(11)$$

onde,

$Ec_{EC}$  é a energia consumida pelas máquinas, sob a forma de combustível para enleirar e compactar o resíduo por unidade massa ( $MJ.ton^{-1}$ ),  $Ec_T$  é a energia

consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte do resíduo ( $\text{MJ.km}^{-1}$ ),  $V_i$  é o volume de palhico da variedade  $i$  por unidade área ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ),  $V_c$  é a capacidade de carga do caminhão ( $\text{m}^3$ ).

Ripoli (1991) apresentou o balanço da energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar supondo uma variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ :

$$BE_{ij} = EB_{ij} - ET_{Bij} \dots\dots\dots(12)$$

onde,

$BE_{ij}$  é o balanço de energia da biomassa residual de colheita de cana-de-açúcar, da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ ;  $EB_{ij}$  = energia da biomassa residual de colheita da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ ;  $ET_{Bij}$  = energia gasta no processo de transferência da biomassa da variedade  $i$ , plantada no talhão  $j$ , para o centro de processamento.

#### **4.3.3. Modelo de otimização multiobjetivo para a minimização do custo de coleta e maximização do balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar**

Florentino (2005) apresenta um modelo multiobjetivo para escolha de variedades de cana que minimiza o custo de coleta do palhico e maximiza o balanço de energia da biomassa residual. Como visto, para a coleta do palhico da cana-de-açúcar a ser processado para a geração de energia, são necessárias três operações: enleiramento, compactação e acondicionamento do palhico no caminhão. Depois de realizadas estas etapas a biomassa residual é transportada para o centro de processamento.

O problema abordado consiste em determinar quais das  $n$  variedades  $i$  devem ser plantadas nos  $k$  talhões  $j$  de medida  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) do centro de produção ( $j = 1, 2, \dots, k$ ), que ofereça o menor custo possível para o processo de transferência do palhico do campo para o centro de processamento e maximiza o balanço de energia desse processo. Devendo satisfazer as restrições de sacarose e de fibra da cana que são recomendações da empresa para manter a qualidade da cana e a demanda de açúcar e álcool, considerando toda a área destinada para o plantio da cana.

Sendo  $X_{ij}$  a variável de decisão em que  $X_{ij} = 1$  implica que a cana de variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e em caso contrário  $X_{ij} = 0$ , tem-se o modelo:

$$\text{Min} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} ; (-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \right] \dots\dots\dots(13)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \alpha_i X_{ij} \geq k\bar{\alpha} \dots\dots\dots(14)$$

$$K\bar{F}_l \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K F_i X_{ij} \leq K\bar{F}_s \dots\dots\dots(15)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \text{ para todo } j \dots\dots\dots(16)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{e} \quad j = 1, 2, \dots, K$$

onde,

$i = 1, 2, \dots, n$  são os índices que representam as variedades;

$j = 1, 2, \dots, K$  são os índices que representam os talhões;

$CC_{ij}$  = custo de coleta do palhiço da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ , calculado pela equação (04);

$BE_{ij}$  = balanço de energia da biomassa residual de colheita de cana-de-açúcar, da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ ;

$\bar{\alpha}$  = quantidade mínima estabelecida para o teor de POL da cana;

$\alpha_i$  = estimativa de produção de sacarose da variedade  $i$ , ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$\bar{F}_l$  e  $\bar{F}_s$  = quantidades mínima e máxima estabelecidas para o teor de fibra da cana;

$F_i$  = estimativa do teor de fibra da variedade  $i$ .

A função objetivo (13) consiste em minimizar o custo para o processo de transferência do palhço do campo para o centro de processamento e simultaneamente maximizar o balanço de energia. A restrição (14) garante que a demanda de açúcar fermentescível seja atendida. A restrição (15) garante que o teor de fibra da cana permaneça no limite recomendado pela usina. As restrições (16) garantem que toda a área destinada para o plantio seja usada e também que seja plantada apenas uma variedade de cana por talhão. Esse modelo pode ser resolvido por técnicas de programação linear inteira multiobjetivo, que está discutida no apêndice A.

#### 4.3.4. Poder calorífico

Para Mialhe (1980) poder calorífico é a quantidade de calor liberada durante a combustão “queima” de uma substância.

Doat (1977) propôs um modelo matemático para a transformação do poder calorífico superior (PCS) em poder calorífico inferior (PCI), com base nas informações sobre a quantidade de hidrogênio do combustível, calor absorvido para vaporização da água e da proporção da água formada na combustão.

$$PCI = PCS - (600)(9)\left(\frac{h}{100}\right) \dots\dots\dots(17)$$

onde,

PCI = poder calorífico inferior;

PCS = poder calorífico superior;

h(%) = teor de hidrogênio do material;

600 = valor médio da energia absorvida por kg de água para atingir a temperatura de vaporização;



9 = múltiplo do peso do hidrogênio no combustível, fornecendo o peso da água formada na combustão.

O mesmo autor propõe, ainda, a transformação do poder calorífico inferior em poder calorífico útil (PCU), onde se considera a umidade do material, pela equação:

$$PCU = PCI \left[ \frac{100 - E}{100} \right] - 6h \dots\dots\dots(18)$$

onde,

PCU = poder calorífico útil, (kcal.kg<sup>-1</sup>);

E = umidade do material com base em peso úmido, (%);

6 = fator de conversão referente à energia de evaporação da água de formação.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 Considerações iniciais**

O objetivo principal deste trabalho é a investigação e uso de técnicas de otimização para o processo de coleta do palhiço da cana de açúcar, minimizando o custo de coleta deste material e maximizando o balanço de energia envolvido no processo. Para isto foi proposto a comparação dos resultados obtidos utilizando o modelo da seção (4.3.3) e os dados calculados e fornecidos pela Usina. Para a implementação computacional do modelo foi necessário calcular alguns parâmetros referentes a algumas variedades de cana-de-açúcar, como brix, pol, fibra, etc.

Foram analisados cultivares do Município de Taquarituba no Estado de São Paulo. Na análise os tratamentos foram representados pelos quatro cultivares de cana-de-açúcar: SP 80-1816, RB72- 454, SP 80-3280, SP81- 3250, sendo avaliado na mesma época de colheita, em outubro do ano de 2007. Os dados foram analisados segundo um delineamento experimental em blocos ao acaso com quatro repetições, foram colhidos 10 colmos por variedade em 4 pontos aleatórios do talhão, o talhão foi tido como repetição, a seguir, os colmos foram submetidos ao desponte na altura da gema apical (ponto de quebra) e a desfolha, posteriormente os colmos, as palhas e as pontas foram amarrados e etiquetados de acordo com cada variedade.

Os colmos foram encaminhados para o Laboratório de Bebidas do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), Campus de Botucatu, para serem processados segundo a metodologia do Sistema de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose, conforme atualizações semestrais da CONSECANA quanto às determinações tecnológicas. Para esta primeira etapa foram considerados os seguintes parâmetros: pol %, brix%, fibra %, umidade% da cana-de-açúcar.

Em uma próxima etapa as pontas e as palhas foram trituradas, homogeneizadas e conduzidas ao Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos do Departamento de Ciências Ambientais (FCA/UNESP), Campus de Botucatu, para ser analisado o poder calorífico desta biomassa.

Obtidos todos os dados das avaliações, os resultados foram encaminhados para o Instituto de Biociências, Departamento de Bioestatística (IBB/UNESP), Campus e Botucatu, para serem submetidos às análises estatísticas.

## **5.2. Umidade da cana**

### **5.2.1. Material**

- Balança de precisão
- Desintegrador de cana
- Estufa Spencer para secagem do bagaço

### **5.2.2. Método**

A determinação do teor de umidade do bagaço se faz necessário para a obtenção posteriormente da quantidade de fibra contida em cada variedade de cana. Neste método (ABCPM1), uma amostra de aproximadamente 100g das fibras desintegrada foi pesado em uma balança com precisão de 200g no cesto da estufa previamente tarado.

Determinou-se a massa (A) e posteriormente a massa (B) da permanência desta por 24h em estufa à temperatura de  $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ou até o peso constante ser atingido. Logo após as amostras foram colocadas para o resfriamento até a temperatura ambiente em um dessecador, a pesagem foi realizada com a mesma precisão anterior. O teste foi feito em triplicata e o cálculo do teor de umidade foi realizado utilizando a equação:

$$U(\%) = (A - B) 100 / A \dots\dots\dots(19)$$

### 5.3. Fibra da cana

#### 5.3.1. Material

- Desintegrador de cana
- Balança de precisão
- Digestor
- Proveta de vidro graduada de 100 ml, aferida
- Béquer de 200 ml
- Funil de malha fina
- Refratômetro
- Funil de vidro sem haste
- Béquer de 250 ml
- Béquer de 1000 ml
- Algodão hidrófilo

#### 5.3.2. Método (Método do digestor)

Neste método uma amostra de 500 g desintegrada foi pesada e transferida para o corpo do digestor. Foram adicionados 1.000 ml de água destilada e em seguida ligado o digestor por 15 minutos, retira-se a amostra e deixa esfriar até atingir temperatura ambiente, filtra no funil de tela sobre um béquer de 1.000 ml, recolhendo cerca

de 400 ml de extrato. O teste foi feito em triplicata. Foi utilizado o método de Novaes et al. (1974), que considera a umidade do material conforme a equação 01 do item( 4.2.5).

#### **5.4. Pol da cana**

##### **5.4.1. Material**

- Sacarímetro
- Tubo de polarização de 200 mm
- Funil de vidro sem haste
- Béquer de 250 ml
- Bastão de vidro
- Papel de filtro
- Agentes: subacetato de chumbo, seco, (sal de horne)

##### **5.4.2. Método**

Neste método tomou-se uma amostra de cerca de 200 ml de extrato do digestor, como descrito para a determinação da fibra em Novaes et al. (1974) , foi adicionado cerca de 0,5 g de subacetato de chumbo e posteriormente agitado. Foram filtrados em papel de filtro dobrado em pregas, colocado no funil sobre o béquer, desprezando os primeiros 25 ml do filtrado. Com o filtrado límpido e transparente, foi feita a leitura sacarimétrica, enchendo o tubo de polarização laçado com 3 porções da solução, ou seja, o teste foi realizado em triplicata. Foi utilizado o método de Novaes et al. (1974), conforme a equação 02 do item (4.2.5).

#### **5.5. Umidade do Palhiço**

### **5.5.1. Material**

- Balança eletrônica de precisão
- Moinho
- Estufa Spencer
- Béquer de 200ml
- Béquer de 500ml
- Béquer de 1.000ml
- Cadinho de porcelana
- Bomba calorimétrica

### **5.5.2. Métodos**

A determinação do teor de umidade é muito importante, visto que materiais lignocelulósicos são altamente higroscópicos. Neste método (ABCPM1), uma amostra de aproximadamente 2g das fibras selecionados a 40/60 mesh foi pesada em uma balança com precisão de 0,0001g no pesa filtro previamente tarado. Determinou-se a massa(A) e posteriormente a massa(B) da permanência desta por 24h em estufa à temperatura de  $103^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ou até o peso constante ser atingido. Logo após as amostras são colocadas para o resfriamento até a temperatura ambiente em um dissecador, a pesagem foi realizada com a mesma precisão anterior. O teste foi feito em triplicata e o cálculo do teor de umidade foi realizado utilizando a equação (19).

### **5.6. Método para determinação do PCS.**

As amostras utilizadas para a análise do PCS foram moídas, secas e peneiradas em peneira ABNT 70, segundo norma ABNT – NBR 8633 e prensadas na forma de pastilhas com aproximadamente 1g cada uma e foram levadas em estufa de  $105^{\circ}\text{C}$  até a estabilização do peso indicando, que a amostra está seca.

Após esse procedimento, as amostras foram novamente pesadas e queimadas em bomba calorimétrica ALEMMAR Modelo KL-5. A metodologia para a obtenção do calorífico superior foi baseada no Manual de Instruções do Calorímetro e adaptado segundo a norma ABNT-NBR 8633.

Obtido o poder calorífico superior (PCS) das amostras, aplicou-se o método de Doat (1977) para a obtenção do poder calorífico inferior (PCI), que leva em conta a quantidade de hidrogênio contida no material, calor absorvido para vaporização da água nele contido e da proporção da água formada na combustão, conforme a Equação 17 do item (4.3.4) Para transformação do poder calorífico inferior (PCI) em poder calorífico útil (PCU), também foi utilizado o método de Doat (1977), que considera a umidade do material conforme a equação 18 do item (4.3.4).

### **5.7. Procedimentos computacionais**

No desenvolvimento deste trabalho também foram utilizados procedimentos computacionais.

Tais procedimentos foram realizados utilizando os softwares e computadores do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu. Foram utilizados os programas MATLAB 6.1.0.450 (R 12) (THE MATHWORKS INC. (1992)) e Excel em micro-computadores Pentium IV com 128 MB de RAM e 20 GB de disco rígido, adquiridos com os projetos FAPESP, processos 01/10393-2 e 04/08993-0.

### **5.8. Resolução do modelo de otimização multiobjetivo para minimização do custo de coleta e maximização do balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar.**

Para o desenvolvimento do trabalho proposto foi necessário a resolução do modelo indicado na seção (4.3.3). Para a resolução deste modelo foi

necessário definir as características do local de plantio: solo, clima, variedades, número e dimensões dos talhões, fibra, pol.

Foi obtida a lista de variedades adaptáveis ao tipo de solo e clima considerado e tomados os dados calculados para os parâmetros do modelo. Os dados não calculados foram abordados da literatura.

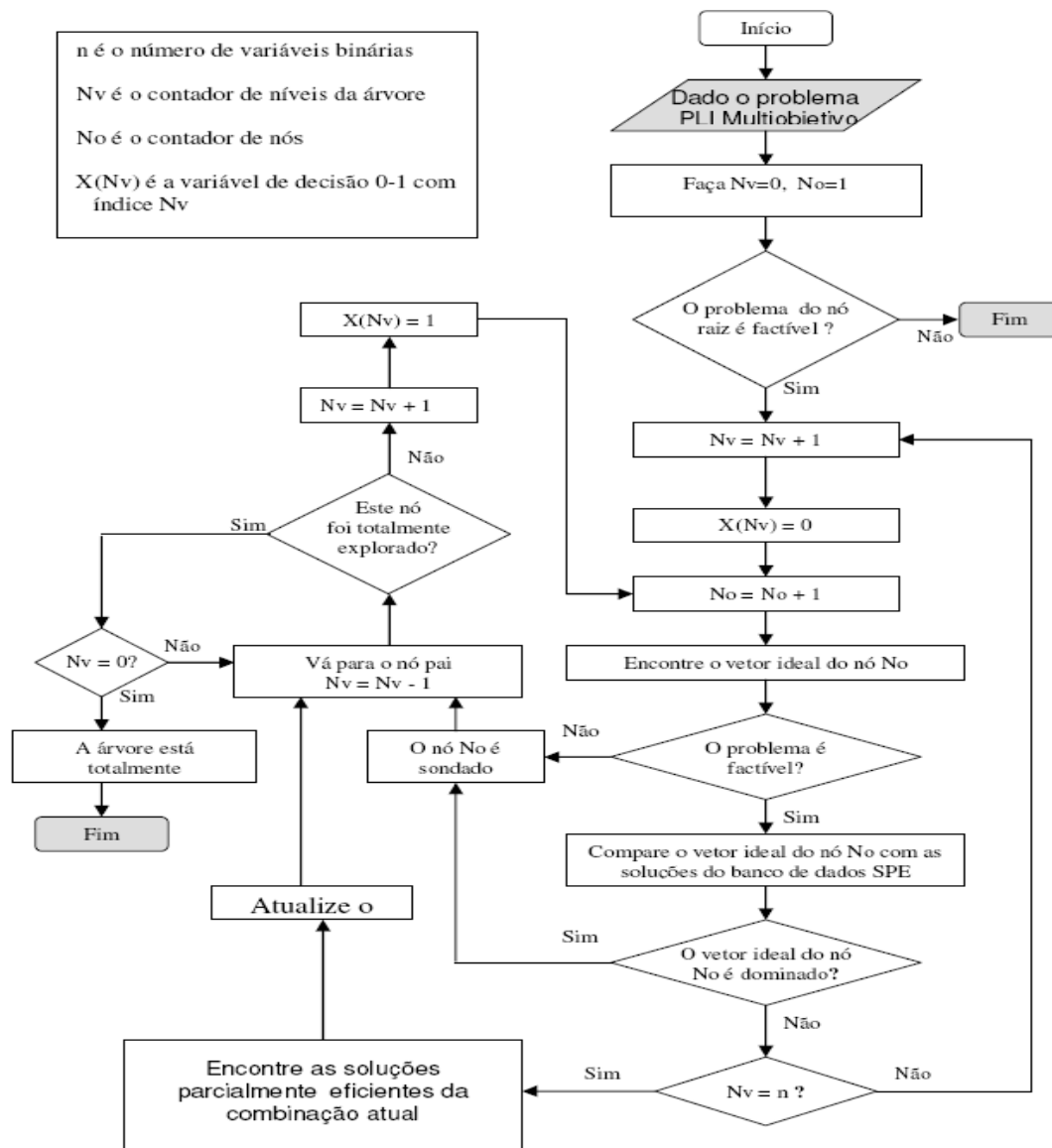
O método obtido para a resolução do modelo está descrito no próximo item.

### **5.9. Programação Multiobjetivo**

Para determinar as soluções parcialmente eficientes em um determinado nó de um problema de otimização multiobjetivo, otimiza-se uma das funções objetivos do subproblema linear correspondente, checando a dominância, no caso de existir solução ótima alternativa. A partir desta primeira solução eficiente, com o procedimento Simplex, busca-se todas as soluções eficientes neste nó (ZELENY (1974, 1982)). Como já foi citado, estas soluções receberão a denominação de soluções parcialmente eficientes para o problema geral. À medida que as soluções parcialmente eficientes são encontradas, durante o processo de exploração da árvore, elas são armazenadas em um banco de dados (SPE) e ao final deste processo os elementos deste banco de dados são comparados e assim as soluções que são comprovadamente não-dominadas são tomadas para compor o conjunto de soluções eficientes (SE) do problema PLI multiobjetivo 0-1. Para que o banco de dados SPE não cresça muito, são feitas atualizações de forma a descartar soluções já armazenadas no banco que são dominadas por uma nova solução encontrada e também eliminar soluções parcialmente eficientes redundantes, ou seja, permanece no SPE apenas soluções com valores diferentes nas funções objetivos. A sondagem dos nós da árvore ocorre quando a solução obtida para o subproblema for infactível, ou se for verificado que a sua ramificação não produzirá resultados promissores, comparados com outros já obtidos. Para esta análise, é criado em cada nó um vetor (com  $p$  componentes) cujas componentes são os resultados da otimização individual de cada função objetivo, este é chamado vetor ideal do nó (ou vetor utópico). Se o vetor ideal de um nó for dominado por qualquer uma das soluções armazenadas no SPE, então este nó é sondado. Se o nó for sondado, o procedimento de volta deve ser iniciado para avaliar outras combinações das variáveis binárias. Os



problemas de grande escala requerem um excessivo recurso computacional. Com isto, foram desenvolvidos algoritmos interativos capazes de restringir a área de busca para uma parte interessante do conjunto de soluções, guiado pela preferência de um Decisor (Tomador de Decisões) (VILLAREAL; KARWAN (1981), SOLAND (1983), RAMESH et al. (1989), MACOTTE; SOLAND (1986), GABBANI; MAGAZINE (1986), KARAIIVANOVA et al. (1993)). Mas, uma dificuldade no uso deste tipo de algoritmo em problemas de grande porte é uma extensa interação que este tipo de método requer com o Decisor. Este processo é repetido até que todas as possíveis combinações tenham sido examinadas, como pode ser visto na descrição do algoritmo a partir do fluxograma apresentado na Fig. 6.



**Figura 6.** Fluxograma do método *Branch-and-Bound* multiobjetivo.

**Fonte:** Mavrotas e Diakoulaki (1998)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito no item 5 deste texto, as amostras de cana-de-açúcar e palhiço foram cedidas por uma usina da região de Botucatu SP para serem analisadas, assim como os dados de produção e custos. A usina está situada em Taquarituba SP, distante em cerca de 140 Km de Botucatu SP.

A safra analisada foi a de 2007/2008. Nesta safra a usina colheu as seguintes variedades: SP 80-1816, RB 72454, SP 80-3280 e SP 81-3250, plantadas em 16 talhões, conforme mostram as tabelas 1 e 2.

A Tabela 1 apresenta dados referentes ao número e dimensões dos talhões da usina. Os talhões foram enumerados e serão identificados pelo índice  $j$ ,  $j= 1, 2, \dots, 16$ . As distâncias referidas na tabela 1, são as distâncias do centro dos talhões a sede da Usina. As variedades são enumeradas e identificadas pelo índice  $i$ ,  $i= 1, \dots, 4$ , em que 1 refere-se a variedade SP 80-1816, 2 refere-se a RB 72454, 3 a SP 80-3280 e 4 a SP 81-3250.

**Tabela 1.** Dados dos talhões da Usina.

Talhão(j)	Medida (ha)	Distância (km)	Variedade(i)
1	8,49	3,49	3
2	4,52	2,49	4
3	58,18	16,08	3
4	4,22	3,49	4
5	5,74	2,59	3
6	6,61	2,59	2
7	30,41	15,33	1
8	5,08	8,3	2
9	12,01	9,24	2
10	54,95	12,63	4
11	38,66	16,43	1
12	3,78	8,25	2
13	10,43	7,8	1
14	6,15	8,59	3
15	8,79	2,25	4
16	57,79	17,2	3
<b>Total</b>	<b>315,81</b>		

A Tabela 2 resume em quais talhões e a área total que cada variedade foi plantada para atender a usina.

**Tabela 2.** Área plantada de cada variedade.

i	Variedade	Área plantada (ha)	Talhões
1	SP 80-1816	71,19	7, 11, 13
2	RB 72454	46,98	6, 8, 9, 12
3	SP 80-3280	114,48	1, 3, 5, 14, 16
4	SP 81-3250	83,16	2, 4, 10, 15

Nas tabelas 3, 4, 5 e 6 a seguir, estão apresentados os resultados obtidos em laboratório e as análises estatísticas correspondentes, com as conseqüentes discussões relativas a fibra, pol, brix, umidade, PCS, PCI e PCU das amostras das variedades de cana plantadas na Usina.

A Tabela 3 apresenta a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação para os dados medidos em laboratório e referentes à fibra e pol das variedades estudadas.

**Tabela 3.** Média, desvio-padrão e coeficiente de variação referente à fibra e ao pol segundo as variedades.

Variedades	Fibra (%)	Pol (%)
SP80-1816	13,93 ± 0,88 a	16,41 ± 0,74 b
RB72-454	11,45 ± 0,35 b	18,09 ± 1,07 a
SP80-3280	11,46 ± 0,22 b	16,76 ± 0,29 ab
SP81-3250	11,02 ± 0,36 b	17,89 ± 0,36 a
CV (%)	4,14	3,98

Para a fibra detectou-se diferença entre a variedade SP80-1816 e as demais, sendo que a média dessa é maior que as demais médias, Tabela 3.

Para a pol, as variedades SP81-3250 e RB72-454 diferiram estatisticamente da variedade SP80-1816, sendo esta última menor. Já a SP80-3280 não diferiu de nenhuma delas.

A Tabela 4 apresenta a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação para os dados medidos em laboratório e referentes ao Brix e a umidade das variedades estudadas.

**Tabela 4.** Média, desvio-padrão e coeficiente de variação referente ao brix e a umidade segundo as variedades.

Variedades	Brix (%)	Umidade (%)
SP80-1816	6,47 ± 0,17 b	69,04 ± 0,97 a
RB72-454	7,03 ± 0,29 a	70,57 ± 0,97 a
SP80-3280	6,80 ± 0,13 ab	69,60 ± 0,97 a
SP81-3250	7,15 ± 0,19 a	69,13 ± 0,97 a
CV (%)	3,00	2,78

Para o Brix, as variedades RB72-454 e SP81-3250 diferiram estatisticamente da variedade SP80-1816, sendo esta última menor. Já a variedade SP80-3280 não diferiu das demais médias. Quanto a umidade, não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias, veja na Tabela 4.

A Tabela 5 apresenta a média e desvio-padrão para os dados medidos em laboratório e referentes ao PCS e PCI do palhiço gerado pelas variedades

estudadas. A Tabela 5 apresenta a média, desvio-padrão e umidade do palhiço destas variedades.

O poder calorífico do palhiço amostrado apresentou como médias de seus constituintes os valores das Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5.** Média e desvio-padrão referente ao PCS e PCI, segundo variedades.

<b>Variedades</b>	<b>PCS(Mcal.ton<sup>-1</sup>)</b>	<b>PCI(Mcal.ton<sup>-1</sup>)</b>
SP80-1816	4582,70 ± 24,42 a	4247,90 ± 24,42 a
RB72-454	4511,34 ± 35,60 b	4176,79 ± 35,60 b
SP80-3280	4426,97 ± 50,49 c	4092,17 ± 50,47 c
SP81-3250	4331,77 ± 19,79 a	3996,97 ± 19,69 a
CV (%)	0,78	0,84

Para o PCS e o PCI, as variedades SP80-1816 e SP81-3250 diferiram de RB72-454 e SP80-3280, RB72-454 também diferiu de SP80-3280, sendo esta última a menor das médias.

**Tabela 6.** Média e desvio-padrão referente ao PCU e a umidade do palhiço, segundo variedades.

<b>Variedades</b>	<b>PCU(Mcal.ton<sup>-1</sup>)</b>	<b>Umidade do palhiço (%)</b>
SP80-1816	2671,99 ± 26,25 a	47,49 ± 0,90a
RB72-454	2649,95 ± 19,88 a	30,59 ± 0,63 c
SP80-3280	2602,14 ± 32,25 a	28,82± 0,51 d
SP81-3250	1947,85 ± 71,81 d	32,95± 0,40 b
CV(%)	1,56	1,82

Para PCU, SP81-3250 diferiu das demais médias, sendo esta menor que as demais. Para umidade, houve diferença entre todas as variedades médias, sendo SP80-1816 a maior, vindo depois SP81-3250, RB72-454 e SP80-3280.

Na Tabela 7, estão apresentados os cálculos de alguns parâmetros obtidos para caracterização das variedades plantadas na usina.

**Tabela 7.** Dados das variedades cedidas pela Usina.

<b>i</b>	<b>Variedade</b>	<b>V<sub>i</sub></b> m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup>	<b>P<sub>Bi</sub></b> t.ha <sup>-1</sup>	<b>Ec<sub>Bi</sub></b> Mcal.t <sup>-1</sup>	<b>A<sub>i</sub></b> t.ha <sup>-1</sup>	<b>Q<sub>i</sub></b> m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup>	<b>F<sub>i</sub></b> t.ha <sup>-1</sup>
1	SP 80-1816	7,964	33,36	2671,99	16,42	125,566	13,94
2	RB 72-454	8,610	37,58	2649,95	20,40	116,148	12,90
3	SP 81-3280	9,369	36,72	2602,14	18,46	106,731	12,63
4	SP 80-3250	10,619	34,25	1947,85	18,38	94,174	11,32

$i$  = índice associado às variedades,  $V_i$  = estimativa do volume de uma tonelada de palhiço da variedade  $i$  (obtido a partir da massa específica do palhiço),  $P_{Bi}$  = produtividade do palhiço da variedade  $i$ ,  $Ec_{Bi}$  = poder calorífico útil do palhiço da variedade  $i$ ,  $A_i$  = produtividade de açúcar fermentescível (POL) da variedade  $i$ ,  $Q_i$  = estimativa do volume de biomassa por unidade de área plantada de cana para a variedade  $i$  e  $F_i$  = produtividade de fibra da variedade  $i$ .

As Tabelas 8 e 9 apresentam o consumo de combustível para o processo de recolhimento e transporte do palhiço da cana-de-açúcar com a finalidade de calcular o balanço de energia deste processo para a Usina considerada.

A Tabela 8 apresenta dados de consumo de combustível para cada operação envolvida no processo de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar.

**Tabela 8.** Desempenho das máquinas para coletar o palhiço.

<b>Operação</b>	<b>Consumo de combustível (L.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tempo gasto (h)</b>	<b>Consumo total de combustível (L)</b>
Enleirar	3,8	91,20	346,56
Compactar	4,5	108,00	486,00
Carregar caminhão	1,8	43,20	77,76
Carregar trator	5,51	132,24	728,64
Carregadeira	4,36	104,64	456,23

A Tabela 9 apresenta dados de consumo dos automóveis e distâncias percorridas para o transporte do palhiço da cana-de-açúcar do campo para o centro de processamento.

**Tabela 9.** Desempenho das máquinas para transportar o palhico.

Operação	Consumo de combustível (L.km <sup>-1</sup> )	Distância (km)	Consumo total de combustível (L)
Transportar com o caminhão	0,37	1974,48	731,29
Transportar com o trator	0,23	816,28	188,52

A Tabela 10 resume alguns dados das variedades que serão necessários para o cálculo da estimativa da energia gerada pelo palhico da cana-de-açúcar plantada na Usina.

**Tabela 10.** Dados para o cálculo da estimativa da energia gerada pelo palhico.

i	Variedade	V <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	P <sub>Bi</sub> (t.ha <sup>-1</sup> )	E <sub>cBi</sub> (MJ.t <sup>-1</sup> )	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	L <sub>j</sub> (ha)
1	SP 80-1816	7,96	33,36	11184,95	354,20	71,19
2	RB 72454	8,6	37,58	11092,69	299,28	46,98
3	SP 80-3280	9,37	36,72	10892,56	316,18	114,48
4	SP 81-3250	10,62	34,25	8153,70	320,85	83,16

Utilizando as equações descritas no item (4.3.2) e os dados das tabelas acima, calculou-se o custo e o balanço de energia para o processo de coleta do palhico desta Usina, determinando respectivamente os seguintes valores 327,8 reais por hectare e 130177795,9 MJ. O custo de combustível utilizado foi de 2,15 reais por litro.

Os resultados do custo de coleta do palhico e do balanço de energia obtido no aproveitamento dessa biomassa, calculados para a Usina, serão comparados com resultados obtidos com o uso do modelo matemático (13).

Para a implementação computacional de (13), todos os parâmetros do modelo terão que ser calculados ou obtidos na literatura. Nas Tabelas a seguir serão apresentados os valores médios obtidos para estes parâmetros.



A Tabela 11 apresenta alguns dados de custos e consumos de combustíveis das máquinas e demandas da Usina necessários para o uso do modelo (13).

**Tabela 11.** Alguns dados necessários para aplicação do modelo (13).

Cecc	Co	P	Ec <sub>EC</sub>	Ec <sub>C</sub>	Ec <sub>T</sub>	$\bar{A}$	$\bar{F}_1$	$\bar{F}_S$	Vc
R\$.t <sup>-1</sup>	L.km <sup>-1</sup>	R\$.L <sup>-1</sup>	MJ.t <sup>-1</sup>	MJ.t <sup>-1</sup>	MJ.Km <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup>
3,69	0,370	2,15	7,56	57,54	5,25	18,41	11,00	15,00	60,00

Cecc = custo para enleirar, compactar e carregar o palhico, Co = consumo de combustível do caminhão usado no transporte do palhico, P = preço de um litro de combustível, Ec<sub>EC</sub> = energia consumida pelas máquinas sob a forma de combustível, para enleirar e compactar uma tonelada de resíduo, Ec<sub>C</sub> = energia consumida pela máquina sob a forma de combustível, para carregar o caminhão com uma tonelada do resíduo, Ec<sub>T</sub> = energia consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte do resíduo,  $\bar{A}$  = demanda de pol da Usina.

A Tabela 12 apresenta as variedades que são adaptáveis ao local da Usina e os dados destas variedades que são necessários para o cálculo de parâmetros do modelo.

**Tabela 12.** Dados das variedades adaptáveis ao solo da Usina.

i	Variedade	V <sub>i</sub>	P <sub>Bi</sub>	Ec <sub>Bi</sub>	A <sub>i</sub>	Q <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>
		m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	Mcal.t <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>
1	SP 80-1816	7,964	33,36	2671,99	16,42	354,20	13,94
2	RB 72454	8,610	37,58	2649,95	20,40	299,28	12,90
3	SP 80-3280	9,369	36,72	2602,14	18,46	316,18	12,63
4	SP 81-3250	10,619	34,25	1947,85	18,38	320,85	11,32
5	RB855536	9,78	26,43	2211,95	17,05	258,46	12,51
6	RB855113	10,87	29,38	2310,37	17,54	319,38	10,91
7	SP791011	8,91	24,09	1977,47	15,80	214,72	10,33
8	RB835486	9,56	21,53	2444,20	12,84	205,77	9,28
9	RB711406	12,32	33,20	2008,83	20,77	410,29	16,12
10	SP701143	7,05	22,14	1924,80	15,01	155,98	11,59

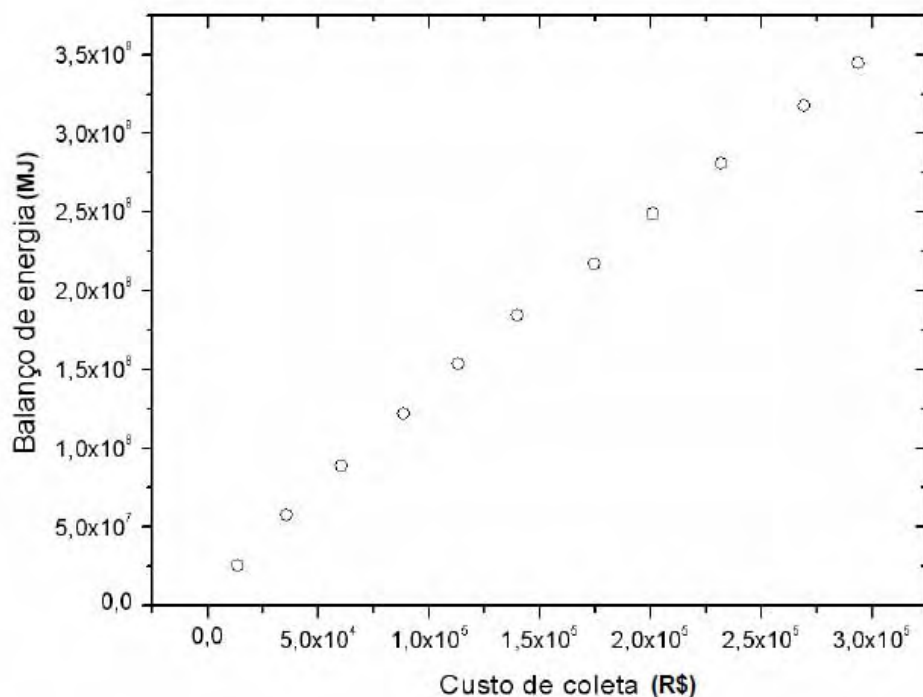
A Tabela 13 apresenta as áreas dos talhões da Usina que serão utilizados nos cálculos dos parâmetros do modelo (13).

**Tabela 13.** Áreas dos Talhões da Usina.

<b>Talhão(j)</b>	<b>Medida (ha)</b>
1	8,49
2	4,52
3	58,18
4	4,22
5	5,74
6	6,61
7	30,41
8	5,08
9	12,01
10	54,95
11	38,66
12	3,78
13	10,43
14	6,15
15	8,79
16	57,79
<b>Total</b>	<b>315,81</b>

A aplicação do modelo (13) visa determinar quais variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos talhões da Usina de forma a obter o menor custo possível de coleta e do transporte do palhiço gerado e que ofereça um balanço ótimo de energia no seu aproveitamento. Para isto é necessário satisfazer as restrições da demanda de sacarose e de fibra impostas pela usina, empregar toda a área destinada para o plantio da cana e plantar apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão.

Utilizando os dados da tabelas 11, 12 e 13 e as técnicas de otimização multiobjetivo descritas no Apêndice 9, o modelo (13) foi implementado computacionalmente gerando os resultados apresentados na Fig. 7.



**Figura 7.** Fronteira de Pareto obtida para o modelo (13) com os dados descritos

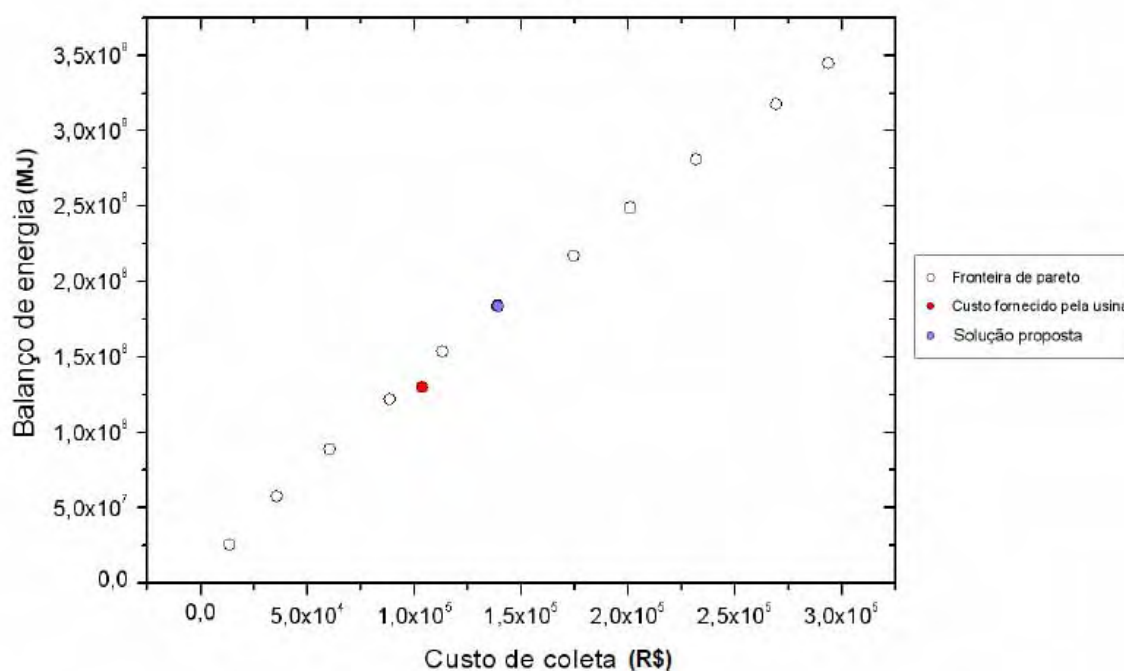
A Fig. 7 apresenta a forma da curva da fronteira de pareto, mostrando a variação do custo de combustível para coleta do palhiço gerado na Usina e a sua relação com o balanço de energia em forma de combustível deste processo. O custo varia de 42,20 a 929,95 reais por hectare, dependendo da escolha das variedades plantadas e em quais talhões. A vantagem de ter esta fronteira é que o gestor do problema pode escolher uma solução eficiente, com custo e balanço de energia conhecidos e desejados.

É proposto um critério para escolha de uma solução eficiente para o modelo, que consiste em fixar um ponto próximo do ponto médio do balanço de energia (ou custo) como limitante deste balanço e determinar o menor custo gerado como este valor proposto. Os resultados obtidos com esta proposta estão apresentados na tabela 14 e ilustrado na Fig. 8.

**Tabela 14.** Resultados do Modelo Multiobjetivo com o critério proposto.

Talhão j	Variedade i	Descrição da variedade	Quantidade a ser plantada (ha)
(2)	3	SP 80-3280	10,43
(1,4,5,6,11,13,14,15,16)	9	RB 711406	233,33
(3,7,8,9,10,12)	10	SP 701143	72,05
Total			315,81
Custo (R\$. ha <sup>-1</sup> )		139563,49	
Balanco de energia (MJ)		185001423,5	
Fibra (%)		14,17	
Pol (%)		18,41	

A Fig. 8 apresenta algumas soluções eficientes da fronteira de pareto, a solução obtida com o critério proposto para este problema e o custo fornecido pela Usina.

**Figura 8.** Fronteira de Pareto, solução proposta e custo fornecido pela Usina

Na tabela 14 pode-se notar que o modelo multiobjetivo (13), com o proposto critério de escolha de solução, decide-se plantar 10,43 ha da variedade SP 80-

3280, 233,33 ha da variedade RB 711406 e 72,05 ha da SP 701143, tendo uma estimativa para o teor de fibra de 14,17 % e para o pol de 18,41 % que estão dentro das recomendações das Usinas. O balanço de energia estimado é de 185001423,5 MJ para retirada de todo o palhico e o custo de coleta do palhico de 441,42 reais por toneladas.

Observando a Fig. 7 pode-se notar que a solução proposta apresenta um custo 34,66% maior do que o custo da Usina, mas com um balanço de energia 42,11% melhor do que a obtida pela Usina. Outra observação que pode ser feita na Fig. 7 é que a solução apresentada pela Usina não está dentre as soluções eficientes, ou seja, não faz parte da fronteira de pareto. Utilizando o modelo proposto para determinar uma solução na fronteira de pareto que apresente um custo próximo do custo da usina, obtêm-se uma solução com um balanço de energia 9,4 % maior do que o apresentado pela usina e plantando a variedade SP 80-1816 nos talhões 10 e 15, a variedade RB711406 nos talhões 2, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 14 e 16 e a variedade SP701143 nos demais talhões.

## 7. CONCLUSÕES

A mecanização total da colheita de cana-de-açúcar pode ser considerada como certa, sendo apenas uma questão de tempo. Isto fará com que o palhicho seja disponível para algum fim que não a queima no campo. A geração de energia por meio do palhicho da cana-de-açúcar será inevitável, visto as questões ambientais, a grande disponibilidade desta biomassa, o seu potencial energético e a escassês das fontes energéticas. O excedente energético produzido poderá ser negociado para a concessionária responsável pela distribuição de energia na região.

O modelo de otimização proposto oferece um conjunto de soluções para escolha de variedades a serem plantadas. Esta escolha pode ser feita de acordo com o custo de combustível para coleta do palhicho ou com o balanço de energia do processo de recolhimento desta biomassa, conforme interessar ao gestor desta área na Usina.

Portanto, a modelagem matemática tem sido uma excelente ferramenta para auxílio nas tomadas de decisões dos gestores do setor sucroalcooleiro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, D. J. et al. A routing and scheduling problem for rail system: A case study. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 32, n. 9, p. 767-774, set. 1981.

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHELLI, L.L. Resíduos de colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, n.67, p.23-25, abr./jun. 1993.

ANDRADE, L. A. de B. Cultura da cana-de-açúcar. In: Cardoso, M. das G.(Ed.). **Produção de aguardente de cana-de-açúcar**. 2. Ed. rev. e amp. Lavras: UFLA, 2006. cap.1, p.25-67.

BALSALOBRE, M.A.A.; FERNANDES, R.A.T.; SANTOS, P.M. Corte e Transporte de cana-de-açúcar para consumo animal. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 7, 1999, Piracicaba, SP. **Anais...**Piracicaba: FEALQ, 1999. p.7-26, 1999.

BARATA, M. Q. F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

BEAUCLAIR, E.G.F. de; PENTEADO, C.R. Cronograma de corte da cana-de-açúcar através da programação linear. In: SEMINÁRIO DA TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2., Piracicaba, 1984. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1984. p.424-434.

BITTENCOURT, V.C.; CLARET, A.C.; CARMELLO, Q.A. de C.; CARVALHO, A.J.L. Produtividade da cana-de-açúcar e fertilidade do solo. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, v.8, n.20, p. 41-45. Nov/dez. 1989.

BIZZO, W. A. Tecnologias da biomassa para conversão de energia. In: DIVERSIFICAÇÃO energética: uma estratégia de desenvolvimento para o Rio Grande do Norte. Natal: UFRN, 2007.

BOYD, S. , VANDENBERGHE, L., 2004, **Convex Optimization, Cambridge University Press**, ISBN 0521833787.

BRAUNBECK, O. A. ; CORTEZ, L. A. B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: **Frank Rosillo-Calle; Sergio V. Bajay; Harry Rothman;. (Org.)**. Uso de biomassa para produção de energia na indústria brasileira. 1 ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2005, v. 1, p. 215-246.

BRUNSTEIN, I.; TOMIYA, E. H. Modelo econômico de empresa sucroalcooleira. **Gestão & Produção**, v. 2, n. 3, p. 264-280, set./dez. 1995.

CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa Operacional.:Técnicas de otimização em aplicadas a sistemas agroindustriais**. 2º .ed. – São Paulo: Atlas, 2004.

CAMPOS, M.S.; MARCONATO, A. Sistema de cana crua x sistema cana queimada. **STAB:açúcar, álcool e sub-produtos**, Piracicaba, v.12, n.3, p.10-16, maio/jun.1994.

CARVALHO, C. C.L. Cenário Sucroalcooleiro. As velas , não o vento, fazem chegar. **STAB:Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, n.27, p.64-65, 2008.

COLETI, J. T. Técnica cultural de plantio. In: PARANHOS, S, B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. cap.3, p.284-332.

COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. A. M.; SHIMIZU, T. Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar. **Produção**, v. 9, n. 1, p. 23-30, maio 1999.

COCK, J. H.; LUNA, C. A.; PALMA, A. The trade-off between total harvestable production and concentration of the economically useful yield component: cane tonnage and sugar content. **Field Crops Research**, v. 67, n. 3, p. 257-262, ago. 2000.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH3 de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.631-637, 2003.

COSTA NETO, J. D. da. A cana em tempo bom. **Revista CREA-PR**, Curitiba, n. 41, p. 16-19, out. 2006.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA,AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - PROJETO BRA/96/G31. Enfardamento da palha. In: PROJETO BRA/96/G31: Geração de Energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, n.6, p.44-46, jul./ago. 1998a.



DANTIZIG, G. B. **Programming in a linear structure, comptroller, United States Air Force**. Washington, D. C., 123 p, 1949.

DEMATTÊ, J. L. I. Manejo e conservação de solos, na cultura de cana. **Visão agrícola**. Cana-de-açúcar, Piracicaba, v1. n.1. p.8-17, 2004.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropical. **Bois et Forets des Tropiques**, v.172, p.33-55, mar/Avr. 1977.

DOORENBOS, J; KASSAN, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. (Riego e Drenaje)**. Boletim Nº 33. Roma, 1979, FAO, 212p.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003. 240 p.

FERNANDES, O.W, B. **Avaliação de variedades de cana-de-açúcar para produção de cachaça artesanal e a interferência dos resultados no comportamento do produtor na região de Salinas – MG: Uma contribuição extensionista**. 83p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia, Educação Profissional Agrícola) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Saropédica, 2005.

FLORENTINO, H. O. **Programação linear inteira em problemas de aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar**. 2005. 64 f. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/LANDSAT7/**. 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

FURLANI NETO, V.L. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.94, n.3, p.8-9, 1994.

FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI T.C.; VILA NOVA, N.A. Colheita mecânica: perdas de matéria-prima em canaviais com e sem queima prévia. **Revista da STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.14, n.6, 1996

GABBANI, D., MAGAZINE, M. Na interactive heuristic approach for multi-objective integer programming problems. **Journal of the Operational Research Society**. 37, p. 285-291, 1986.

GOES, T.; MARRA,R.; SILVA, S.G. Setor sucroalcooleiro no Brasil: situação e perspectivas. **Revista canavieiros**, Setãozinho, SP, n.2, ISSN 1413-4969, p.39-51. Ano XVII. Abr./Maio/Jun. 2008.

GRAVOIS, K.A; MILLIGAN, S.B. Genetic relationships between fiber and sugarcane yield components. **Crop Science**, Madison, v.32, n.1, p.62-67, 1992.

GRISOTTO, M. E. **Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhos**. 1995. 121f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash** / - Piracicaba: PNUD-CTC , 1º.ed. 2005.p. il. 27cm. (Série Caminhos para Sustentabilidade).

HAUPT, R.L., HAUPT, S.E. 1998, **Practical Genetic Algorithms**. Wiley-Interscience publication, New York.

HIGGINS, A. J. et al. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, v. 57, n. 2, p. 153-162, maio 1998.

HIGGINS, A. J.; DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 47, n. 2, p. 85-102, maio 2005.

HIGGINS, A. J. Scheduling of road vehicles in sugar transport: A case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, v. 170, n. 3, p. 987-1000, maio 2006.

HUMBERT, H.P. **The growing of sugarcane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779p.

IANNONI, A. P.; MORABITO. R. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 42, n. 3, p. 191-210, maio 2006.

KARAIVANOVA, J.N., NARULA, S.C., VASSILEV, V. An interactive procedure for multiple objective integer linear programming problems. **European Journal Research**. 68, p. 344-351, 1993.

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H. Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry. **International Transactions in Operational Research**, v. 13, n. 5, p. 425-439, set. 2006.

KARMAKAR, N. A new polynomial time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, v.4, p.376-395, 1984.

LIMA; A.D.de. **Modelos matemáticos aplicados a problemas na cultura da cana-de-açúcar e no aproveitamento da energia da biomassa**. 2006. (Dissertação de Mestrado em

Agronomia, Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu-SP, 2006.

LIMA, A. D.; FLORENTINO, H. O. Modelos matemáticos aplicados à cultura da cana-de-açúcar. In: Congresso nacional de matemática aplicada e computacional, 29, 2006, Campinas. **Resumos...** Campinas: 2006. p. 58.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisão : Modelagem em Excel.** 2º ed.- 1º ed.- Rio de Janeiro: Elsevier, 2004

LEÃO, R.M. **Álcool, energia verde.** São Paulo: IQUAL, 2002, 255p.

LOPES, C. H. **Glossário de termos técnicos para indústrias sucroalcooleiras.** Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Álcool, 1986. 32p.

LOPES, M. B. **Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar.** Piracicaba, 1995. 143 f.. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

MACOTTE, O., SOLAND, R. An interactive branch and bound algorithm for multiple criteria optimization. **Management Science.** 32, p. 61-75, 1986.

MANECHINI, C. The impact of cane trash on weed control. **International Cane Energy News,** Argentina, p. 7-9, Apr. 2000. Disponível em: <[www.winrock.org/clean\\_energy/files/icen2000.pdf](http://www.winrock.org/clean_energy/files/icen2000.pdf)>. Acesso em: 8 jan. 2009.

MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. **Computers in Industry,** v. 21, n. 3, p. 331-334, abr. 1993.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para o estado de São Paulo.** 1998. 122p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1998.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H.; MATSUDA, Y. Variedades de cana: minimizando os riscos da adoção. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos.** v. 17, n. 2, p. 18-19, nov/dez 1998.

MAVROTAS, G., DIAKOULAK, D. A branch and bound algorithm for mixed zeroone multiple objective linear programming. **European Journal of Operational Research.** 107, p. 530-541, 1998.

MIALHE, L. G. Combustão e combustíveis. In: **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: Ceres, 1980. Cap.9, p.1987-212.

MILAN, E. L; FERNANDEZ, S. M.; ARAGONES, L. M. P. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 374-386, out., 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA), SECRETARIA DE PRODUÇÃO E AGROENERGIA - DEPARTAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR E AGROENERGIA. **Usinas de Álcool e Açúcar / Legislação de Biodiesel – Posição 22/07/2009**. Disponível em: [http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/SERVICOS/USINAS\\_DESTI\\_LARIAS/USINAS\\_CADASTRADAS/UPS\\_22-07-2009\\_0.PDF](http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/SERVICOS/USINAS_DESTI_LARIAS/USINAS_CADASTRADAS/UPS_22-07-2009_0.PDF). Acesso dia 28/07/2009.

MOLINA JÚNIOR, W.F.; RIPOLI, T. C.; COELHO, J. L. D.; BRITO, J. O. Energia Potencial da biomassa não industrializável de canaviais para emprego como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 24., Viçosa, 1995. **Resumos**. Viçosa: SBEA,1995. p.142.

MOLINA JÚNIOR, W. F.; RIPOLI, T. C.; GERALDI, R. N.; AMARAL, J. R. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético . **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.13, n.5, p.28-31, maio/jun. 1995.

MORAES, C. Há área disponível para a cana-de-açúcar. **Revista canavieiros**, Sertãozinho, SP, n.15, set.2007.

NOVAES, F.V.; OLIVEIRA, E.R.; STUPIELLO, J.T. et al. **I Curso de Extensão em Tecnologia de Aguardente de Cana: apontamentos**. Piracicaba, ESALQ, 1974. 104p.

PARETO, V. **Cours d'Economic Politic**. Lausanne: Rouge, França. 1889.430p.

PARRA, J. O Papel da C E T na Evolução da Cultura da Cana de Açúcar no Brasil. **In: Um balanço de 30 anos do Proálcool**. Campinas, 2005.

PENATTI, C.P. **Uso do ácido fosfórico ou superfosfato triplo como fonte de fósforo para a cultura da cana-de-açúcar**. 1991. 105p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1991.

PEREIRA, R., **Potencial de biomassa pode atingir 6 mil MW**, O Estado de São Paulo, Economia, São Paulo, 18 de novembro, 2001.

PROCKNOR, C. Soluções da fábrica. Ciclos regenerativos para uso da palha. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.26, n.6, p.16-18, 2008.

RIPOLI, T.C.; BALASTREIRE, L.A.; MOLIN, J.P.; MOLINA JÚNIOR, W.F. **Sugar cane biomass energy in Brazil**. In: INTERNATIONAL CONGRESS O AGRICULTURAL ENGINEERING, 13., 1998, Morocco. **Anais...** Morocco: ICAE, 1998. v. 4, p.51-57.

RIPOLI, M.L.C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2002.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C. Variação de temperatura de queimada de canavial. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 3., 1995, Piracicaba. **Resumos...** Piracicaba: EDUSP, 1995. v. 1, p. 408.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JR, W. F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATTOS, J. R. Equivalente energético do palhiço da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 249-252.

RIPOLI, T. C.C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (Saccharum spp) Equacionamento dos balanços energético e econômico**. 1991. 150p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1991.

RIPOLI, T.C.; BALASTREIRE, L.A.; MOLIN, J.P.; MOLINA JÚNIOR, W.F. Sugar cane biomass energy in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS O AGRICULTURAL ENGINEERING, 13., 1998, Morocco. **Anais...** Morocco: ICAE, 1998. v. 4, p.51-57.

RIPOLI, T. C.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATOS, J.R. Equivalente energético do palhiço da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., Piracicaba, 1990. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1990. p.249-257.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; STUPIELO, J.P.; NOGUEIRA, M.C. SACCOMANO, J. B. Potencial energético de residuos de cosecha de al caña verde. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.10, n.1, p.23-26, set./out. 1991.

RIPOLI, T. C.C; PARANHOS, S. B. Colheita. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar, cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 517-597.

RIPOLI, T. C.; RIPOLI, M. L.C; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livroceres, 2006, 216p.

RIPOLI, M.L.C. ; RIPOLI, T.C.C. . **V Coletânea de artigos sobre mecanização e máquinas agrícolas**. Piracicaba: Ripoli, T.C., 1996. v. 1. 324 p.

RIPOLI, T.C.; TILLMAN, C. A. C.; MILAN, M. O. O corte manual da cana verde. **Açúcar & Álcool**, n.77, p.28-30, dez/jan. 1994. 1995.

RODRIGUES, R. Século XXI, O novo tempo da agroenergia renovável. **Visão Agrícola**. n. 1, p. 4-7, jan./jun. 2004.

SARTORI, M.M.P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 201.

SCARPARI, M.S. **Modelo para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (Saccharum spp) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2002.

SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOKGOZ, S.; HAYES, D.; YU, T. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. **Science**, Washington, v.319, p. 1238-1240, 2008.

SILVA, D. K. T. ; DAROS, E. ; ZAMBON, J. L. C. ; WEBER, H. ; IDO, O. T. ; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C. ; OLIVEIRA, R. A. . análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do paraná na safra de 2002/2003. **Scientia Agraria (UFPR)**, v. 6, p. 47-53, 2005.

SOLAND, R.M. The design of multiactivity systems. **European Journal of Operational Research**. 12, p. 95-104, 1983.

SOUZA, Z. M. de ; PAIXÃO, A. C. S. ; PRADO, R. M. de ; CESARIN, L.G. ; SOUZA, S. R. de . Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1062-1068, 2005.

SPADOTTO, A. F.; FLORENTINO, H. O. Empacotamento do palhiço da cana-de açúcar. In: Congresso nacional de matemática aplicada e computacional, 19., 2006, Campinas. **Resumos...** Campinas: 2006. p. 59.

STUPIELLO, J. P. Cana como matéria prima. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Cargill, 1987. V. 2, p. 759-804.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003.

88 p. Dissertação (Mestrado agronomia) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2003.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUÊS, J.C.S.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-<sup>15</sup>N e uréia-<sup>15</sup>N aplicado ao solo em complemento a vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, p.89-99, 1996.

TOLENTINO, G.; FLORENTINO, H. O.; SARTORI, M. M. P. Programação multiobjetivo aplicada à problemas de biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar. In: SEAGRO, 11., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina, 2005. p. 182.

UNIÃO DA INDÚSTRIA CANAVIEIRA – ÚNICA. **Estimativa da safra 2009/2010**. Disponível em <[www.unica.com.br/download.asp?mmdCode=5660AF52-8DD9-44D1-A25A-C768A18CB53B](http://www.unica.com.br/download.asp?mmdCode=5660AF52-8DD9-44D1-A25A-C768A18CB53B)> Acesso dia 23/abr./2009.

VILLAREAL and M. H. KARWAN. An interactive dynamic programming approach to multi-criteria discrete programming. *J. Math. Anal. Appl.* 81, 524-544. (1 981).

ZAMBON, J.L.C. Avaliação de genótipos de cana-de-açúcar no Estado do Paraná. II – série RB85. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.18, n.1, p.20-22, 1999.

ZELNY, M. *Linear Multiobjective Programming*. Lecture notes in economics and mathematical systems series, **Springer**, New York, 1974.

ZELNY, M. *Multiple Criteria Decision Making*. **McGraw Hill**, New York, 1982.

WHAN, B. M.; SCOTT, C. H.; JEFFERSON, T. R. Scheduling sugar cane plant and ratoon crops and a fallow – a constrained markov model. **Journal of agricultural engineering research**, v. 21, n. 3, p. 281-289, set. 1976.

YAMADA, M. C. **Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando à aplicação em estudos de simulação**. 1999. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. Decentralizing ethanol distribution in southeastern Brazil. **Interfaces**, v. 26, n. 6, p. 24-34, nov./dez. 1996.

## 9. APÊNDICE A

### 9.1. Otimização

Para Boyd e Vandenberghe (2004), o termo otimização se refere ao estudo de problemas que têm a seguinte forma:

Dado uma função  $f : A \rightarrow R$  para um conjunto  $A$  de números reais, determinar um elemento  $X_0$  pertencente a  $A$  de forma que  $f(x_0) \leq f(x)$  para todo  $x$  pertencente a  $A$  (minimização) ou  $f(x_0) \geq f(x)$  para todo  $x$  pertencente a  $A$  (maximização). Muitos problemas do mundo real e problemas teóricos podem ser modelados utilizando-se esta formulação.

Caracteristicamente,  $A$  é um subconjunto do espaço  $R^n$ , comumente verificado por um conjunto de restrições, igualdades e desigualdades que os elementos de  $A$  devem satisfazer. Os elementos de  $A$  são chamados de soluções viáveis e a função  $f$  chamada de função objetivo ou função custo, sendo esta função responsável por determinar um elemento de  $A$  que soluciona o problema formulado. A função pode ser de maximizar onde é definida a sua função ótima.

Desta forma, podemos tentar definir a otimização como um processo para se fazer alguma coisa melhor (HAUPT; HAUPT, 1998). Esta definição é



bastante ampla, uma vez que pode ser aplicada em qualquer ramo de atividade, como por exemplo:

- nos esportes: fala-se em otimizar o desempenho dos atletas;
- em computação: fala-se em otimizar o tempo de processamento de determinada tarefa.

Quando um pesquisador surge com uma nova idéia é através de um processo de otimização que se busca, de alguma forma, melhorar esta idéia. Em alguns casos, a otimização consiste em experimentar variações sobre um conceito inicial e usando as informações obtidas aprimorar cada vez mais este conceito.

Um processo de otimização visando à busca da “melhor solução”, se aplica bem a problemas que possuam várias soluções de valor máximo ou mínimo em diferentes regiões do espaço de busca. Como por exemplo, a compra de um computador, onde os computadores apresentam os mais variados preços e os mais variados desempenhos. Cabe neste caso ao comprador determinar a relação preço/desempenho (melhor solução) que ele irá aceitar para realizar a compra.

Quanto ao número de objetivos que serão empregados em uma otimização, os problemas podem ser divididos em duas grandes classes: monobjetivo, o problema envolve uma única função objetivo ou multiobjetivo: duas ou mais funções objetivo. Os problemas com um único objetivo é o caso mais simples de otimização, pois a comparação direta do valor de cada solução apresentada para o problema permite determinar qual a melhor solução;

Um problema geral de otimização é expresso em programação matemática como:

$$\text{Minimize } f(x) \text{ (ou Maximize } f(x)) \text{ .....(20)}$$

sujeito a

$$g(x) \leq 0 \text{ (= 0 ou } \geq 0)$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

onde,

a função  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é chamada função objetivo e as funções  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$  são chamadas restrições e estas limitam o espaço de soluções do problema, chamadas de soluções factíveis (ou soluções viáveis), sendo  $x$  o vetor de variáveis de decisão.

Serão abordados dois tipos de problemas de otimização: o problema de programação linear e o problema de programação linear inteira.

O problema de programação linear é um problema da forma (20) onde a função objetivo  $f$  é linear, definida como  $f(x) = c^T x$ , podendo ser maximizada ou minimizada. O sistema de inequações  $g(x) \leq 0$  é linear podendo também ser da forma:  $Ax - b = 0$  ou  $Ax - b \geq 0$ .

A forma padrão de um problema de programação linear é:

$$\text{Minimize } c^T x \dots\dots\dots(21)$$

sujeito a

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

onde,

$$c \in \mathbb{R}^n, \quad A \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad e \quad b \in \mathbb{R}^m.$$

## 9.2. Programação linear

Segundo Puccini (1978), a programação linear trata-se de uma técnica de otimização largamente utilizada na resolução de problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A sua grande difusão deve-se à linearidade do modelo, tornando-a de fácil aplicação em uma considerável quantidade de problemas, sem perdas significativas na solução.

Para Caixeta filho, 2004, a programação linear é vista como o aprimoramento de uma técnica de resolução de sistemas de equações lineares via inversão sucessiva de matrizes, com a vantagem de incorporar uma equação linear adicional representativa de um dado comportamento que deve ser otimizado.

A programação linear é a área da matemática que estuda a modelagem e as técnicas de resolução de problemas de programação linear, definido em (21). A resolução de um modelo de programação consiste em determinar o vetor  $x$  que satisfaça as restrições impostas e otimize a função objetivo e esta será chamada solução ótima do problema.

Na modelagem de um problema de programação linear devem estar bem definidos:

- O conjunto de variáveis manipuláveis: variáveis de decisão;
- O objetivo a ser alcançado representado pela função objetivo: função linear das variáveis de decisão, que deve ser maximizada ou minimizada;
- As restrições do problema: equações lineares representadas através das variáveis de decisão.

As técnicas utilizadas para determinar numericamente a solução ótima de um problema de Programação Linear são baseadas em dois métodos: o método simplex e o método de pontos interiores.

O método Simplex foi apresentado por Dantzig (1949) como uma forma sistemática de resolução da programação linear. Hoje existem várias modificações e adaptações desse método, a grande vantagem desse algoritmo é a facilidade de implementação e a existência de vários softwares comerciais.

O método de pontos interiores foi proposto por Karmarkar (1984) e é baseado em transformações projetivas e a grande vantagem é a sua natureza polinomial.

O algoritmo Simplex, proposto por George Dantzig nos anos 40, constituiu um grande avanço científico tecnológico e deu grande impulso ao campo da pesquisa operacional que nesta época estava dando os primeiros passos.

O método simplex é um procedimento algébrico e iterativo que fornece a solução exata de qualquer problema de programação linear em um número finito de iterações. É também capaz de indicar se o problema tem solução ilimitada, se não tem solução ou se possui infinitas soluções. Este algoritmo pode ser visto como um processo combinatório que busca encontrar as colunas da matriz de restrições que induzem uma base e, portanto, uma solução básica ótima.

### **9.3. Programação linear inteira**

Segundo Florentino (2005), para qualquer problema de decisão, com um objetivo a ser minimizado ou maximizado, no qual as variáveis de decisão devem assumir valores discretos é classificado como problema de programação inteira. Esses problemas podem ser restritos ou irrestritos. As equações que representam o objetivo e as restrições podem ser lineares ou não lineares, e as características destas equações e restrições são muito importantes para a seleção ou desenvolvimento de métodos de resolução dos problemas de pli.

Segundo Lachtermacher (2004), programação linear inteira, PLI são problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são apresentadas por valores inteiros. Esses problemas podem apresentar dois tipos básicos.

- Programação Inteira Pura: Todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro;
- Programação Inteira Mista: apenas uma parte das variáveis são do tipo inteiro, enquanto outras são do tipo real.

A programação linear inteira pode ser entendida como um caso específico da programação linear, onde as variáveis devem ser inteiras ou ao menos parte destas variáveis. O valor da solução ótima encontrada em problema relaxado, ou seja, em um problema de programação linear será maior que o valor ótimo encontrado no mesmo problema, porém utilizando a programação linear inteira PLI. Isto acontece devido os valores dos coeficientes das variáveis de decisão ser inteiros, ou seja, a fração que é

encontrada no problema de programação linear, contribui para o aumento do valor função objetivo.

Para Caixeta-Filho (2004) a programação inteira pura, ou simplesmente programação inteira, é uma variação da programação linear, que também é adequada para solução de problemas que envolvam a programação mista, estrutura linear com características inteiras e não inteiras, e particularmente para problemas que envolvam escolhas que possam ser representadas por variáveis binárias do tipo zero ou um.

De maneira geral, os problema passível de solução por programação linear inteira devem ter as seguintes características:

- a função objetivo linear;
- restrições lineares;
- variáveis positivas;
- algumas ou todas variáveis inteiras.

Existe um caso especial de variáveis inteiras: as variáveis binárias que apenas podem tomar os valores 0 (zero) ou 1 (um). Quando todas as variáveis de um modelo são binárias, o modelo diz-se de Programação Inteira Binária. As variáveis binárias são muito úteis para exprimirem situações dicotômicas (sim ou não, fazer ou não fazer, etc.).

Existe uma literatura muito ampla que aborda técnicas e aplicações da programação inteira. Algumas das diversas aplicações são: problemas de planejamento e produção de empresas, dimensionamento de lotes, sequenciamento de itens, sequenciamento de tarefas, corte de estoque entre outros. (PERIN; RANGEL (1989), GRAMANI et al. (2001), RANGEL; FERREIRA (2003), VIEIRA et al. (2003), CAVALI; RANGEL(2004); FLORENTINO (2005); TOLENTINO(2007).

De forma geral, o problema de programação linear inteira é:

Minimize  $cx$

sujeito a

$$Ax=b$$

$$x \geq 0 \quad i \in N = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$x_i \text{ inteira,} \quad i \in I \subseteq N$$

onde,

$c \in \mathbb{R}^n$ ,  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,  $b \in \mathbb{R}^m$ ,  $b \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ ,  $N$  é o conjunto de índices das variáveis do problema e  $I$  é o conjunto de índices das variáveis restritas a assumirem valores inteiros. O objetivo pode ser de minimização ou maximização da função  $cx$  e as restrições definidas pela expressão  $Ax = b$ , poderiam incluir também as desigualdades:  $\leq$  e  $\geq$ . Dependendo das características do conjunto  $I$ , o problema (23) pode ser definido como: Problema de Programação Linear (PL), quando  $I$  é um conjunto Vazio; Problema de Programação Linear Inteira (PLI), quando  $I = N$ ; Problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), quando  $I \subset N$  ou Problema de Programação Inteira 0-1, quando as variáveis são restritas a assumirem os valores 0 ou 1.

Dependendo das características do Conjunto  $I$ , o problema pode ser definido como: Problema de Programação Linear ou Problema de Programação Linear Inteiro ou Problema de Programação Linear Inteira Mista, Veja exemplo no quadro 6.

**Quadro 6.** Definição dos problemas de Programação Linear, Programação Linear Inteira e Programação Linear Mista

Conjunto I	Descrição das variáveis $x_i, i \in N$	Classificação do problema
I é um conjunto vazio	Não existe variável $x_i, i \in N$ , restrita a assumir valores inteiros	Problemas de Programação Linear (PPL)
I = N	Todas as variáveis do problema são restritas a assumirem valores inteiros	Problema de Programação Linear Inteira (PPLI) ou Inteira Pura
	Caso particular onde as variáveis são restritas a assumirem valores 0 ou 1 (ou seja $x_i \in \{0, 1\}$ )	Problema de Programação Linear Inteira 0-1 (PPLI 0-1) ou (Inteira Binária)
I $\subset$ N	Uma parte das variáveis, $x_j, j=1, \dots, h; j \in N= \{1, \dots, h, h+1, \dots, n\}$ são restritas a assumirem valores inteiros	Problema de Programação Linear Inteira Mista (PPLIM)

**Fonte:** Florentino (2005)

Para Florentino (2005) existem vários métodos para a resolução de problemas de programação inteira: Algoritmo de Gomory, Algoritmo *Branch-and-Bound*, Geração de Colunas, Métodos de Pontos Interiores, etc. Em geral, estes métodos estão dentro de uma das três classificações: Métodos de Planos de Corte, Métodos Enumerativos ou Algoritmos Heurísticos (aproximativos). Em problemas de grande porte e outros de médio porte, estes métodos podem apresentar um tempo computacional muito longo, o que em geral é indesejável. Para amenizar esses problemas, muitas vezes são usadas algumas estratégias na formulação do modelo ou nos algoritmos de resolução do problema para melhorar o desempenho computacional. Assim, surgiram os algoritmos híbridos e as relaxações, como por exemplo o método de *Branch-and-Cut*, a Relaxação Lagrangeana, dentre outros. Sherali e Driscoll (2000) apresentaram uma excelente revisão bibliográfica da programação inteira, mostrando a evolução de todos os métodos desta área até o ano 2000.

Os métodos de programação linear inteira apresentam maiores dificuldades computacionais que os problemas lineares puros, mas existem muitos softwares comerciais e livres que resolvem tais problemas.

### 9.3.1. Método enumerativo *Branch-and-Bound*

O método enumerativo *Branch-and-Bound* foi apresentado por Land e Doig (1960) e tem sido atualmente uma das técnicas mais utilizadas para resolver PLI e PLIM. A idéia central deste algoritmo é enumerar todos os pontos do espaço de definição do problema considerado, dado que este é limitado, descartando infactibilidades e pontos não promissores para a otimalidade e procurando a solução factível que dê o melhor valor para a função objetivo.

O Algoritmo de *Branch-and-Bound* é um procedimento muito utilizado na resolução de problemas do tipo PLI. Existem diversas variantes deste método para tratamento de diversos tipos de problemas específicos. A idéia geral é o de dividir o conjunto de soluções viáveis, em subconjunto sem intersecções entre si, calculando-se os limites superiores e inferiores para cada subconjunto e eliminar certos subconjuntos de acordo com regras preestabelecidas, LACHTERMACHER (2004).

De acordo com Caixeta-Filho (2004) o método de *Branch-and-Bound*, algoritmo de bifurcação e Limite, é o mais disseminado para problemas de programação linear inteira, com os seguintes passos a serem observados.

1. Resolva a questão como se fosse um problema trivial de programação linear, com as variáveis relaxadas. Examine a solução relaxada ótima obtida e verifique se as variáveis que deveriam ser inteiras apresentam efetivamente valores inteiros. Em caso positivo, o problema, está resolvido. Se não, siga para o próximo passo.

2. Se a solução obtida contém uma variável não-inteira, por exemplo,  $X_j$ , então  $i_1 < X_j < i_2$ , onde  $i_1$  e  $i_2$  são inteiros consecutivos e não negativos. Dois novos modelos de programação linear inteira são então criados, acrescentando ao problema de programação linear inteira original ou a restrição.



3. Se alguma das primeiras aproximações continuar a apresentar soluções não-inteiras, o problema de programação linear inteira originado por esta primeira aproximação torna-se candidato a uma bifurcação adicional.

4. se o problema for de maximização, a bifurcação continua até ser obtida uma primeira aproximação inteira (que é uma solução, não necessariamente ótima, do problema original). O valor da função objetivo correspondente a esta primeira aproximação inteira torna-se um limite inferior para o problema. Todos os modelos cujas primeiras aproximações, inteiras ou não, conduzam a valores da função objetivos menores que o limite inferior devem ser descartados.

5. Se o problema for de minimização, o procedimento permanece o mesmo, exceto que os limites a serem utilizados deveram ser superiores e não mais inferiores. Assim, o valor da função objetivo a partir da primeira solução inteira torna-se o limite superior do problema, devendo ser eliminados os modelos com valores da função objetivo maiores que o limite superior corrente.

#### **9.4. Otimização Multiobjetivo**

Para Osyczka, 1985, as otimizações Multiobjetivo podem ser definidas como o problema de encontrar o vetor de variáveis que satisfaçam as restrições e otimizem o vetor de funções cujo elementos representam as funções objetivos. Esta função forma a descrição matemática dos critérios de avaliação, que são normalmente conflitantes entre si. Assim, o termo ótimo significa, entre as soluções obtidas, o valor da função objetivo que é aceita pelo indivíduo que realiza o processo de otimização.

A grande maioria dos problemas de otimização no mundo real são caracterizados pela utilização de mais de um objetivo em sua solução. Em determinadas situações, os objetivos em estudos são conflitantes, ou seja, ao se buscar a melhoria de um determinado objetivo existe a degradação de um ou mais dos outros objetivos envolvidos no processo. Este fato pode tornar extremamente difícil o processo de otimização. Os problemas com mais de um objetivo (Multiobjetivos): neste caso o processo de otimização é um pouco mais complexo, pois necessita que a pessoa responsável pela otimização faça uma tomada de decisão para a escolha da “melhor solução” dentre as possíveis.

Podem-se citar como exemplo de problema de objetivos conflitantes os investimentos financeiros. Para este caso, dentre os objetivos existentes, o investidor pode escolher a minimização dos riscos do investimento e a maximização dos lucros a serem obtidos. É sabido, entretanto, que as aplicações que apresentam baixos riscos, geralmente apresentam baixa rentabilidade. Desta forma, a busca por um aumento de rentabilidade pode levar a um aumento do risco, o que corresponde a uma degradação do objetivo inicial de minimizar o mesmo. Neste processo de otimização, é necessário se encontrar um ponto de equilíbrio entre o risco que se deseja aceitar e o rendimento a se obter, escolha esta que deve ser realizada pelo investidor.

A otimização Multiobjetivo, também chamada otimização Multicritérios, é o caminho natural para a solução desta classe de problemas. Este tipo de otimização tem a sua origem no século dezanove, com os trabalhos de Edgeworth e Pareto (PARETO, 1896).

No problema multiobjetivo, não existe uma solução única para o problema e dificilmente os diferentes objetivos serão otimizados levando-se em conta uma única escolha. Assim, algum tipo de tomada de decisão é necessária para se atingir uma solução eficiente. Este fato, faz com que otimização multiobjetivo apresente um certo grau de nebulosidade, uma vez que não existe, neste tipo de otimização, uma definição amplamente aceita de ótimo, como no caso de problemas com um único objetivo.

Esta falta de um conceito de ótimo para otimizações Multiobjetivo acarreta uma dificuldade na comparação dos resultados obtidos, devido ao fato de que a decisão sobre qual é a melhor solução sempre envolver a tomada de decisão por parte do indivíduo que está realizando o processo de otimização.

Um problema Multi\_Objetivo pode ser expresso, de uma forma geral, pela seguinte equação:

$$\text{Minimizar } F(X) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \dots\dots\dots(22)$$

onde,

$x \in E$ ;

$(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , são  $n$  parâmetros de otimização;

$E \in \mathbb{R}^n$  é o espaço de soluções.

Denotando-se por  $Y$  os vetores objetivos obtidos por  $\{ F(X) \mid x \in E \}$  tem-se:

$$f : E \rightarrow Y$$

onde,

$E$  é mapeado por  $F$  em  $Y$ .

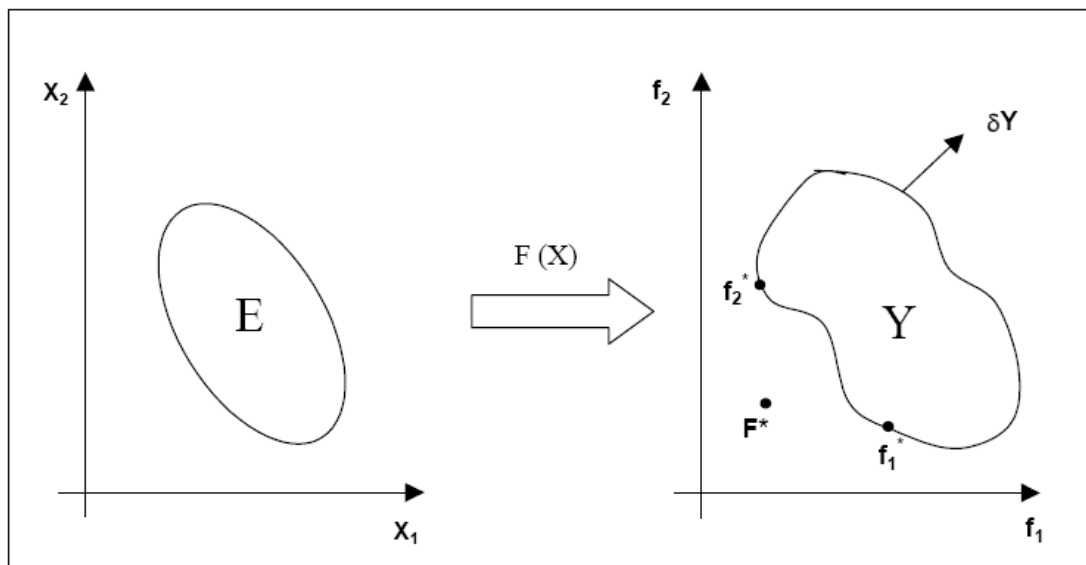
$Y \in \mathbb{R}^k$  é usualmente denominado como o espaço de atributos, sendo  $\delta Y$  definido como a fronteira de  $Y$ . Para um problema real, geralmente  $F$  é não-linear e multi-modal e  $E$  pode ser definido por restrições não-lineares e conter variáveis contínuas e/ou discretas.

Definindo-se  $f_1^*(X)$ ,  $f_2^*(X)$ , ...,  $f_k^*(X)$  como o valor mínimo individual de cada função objetivo, uma solução  $F^*(X)$  pode ser escrita como:

$$F^*(X) = (f_1^*(x), f_2^*(x), \dots, f_k^*(x))$$

Em geral não existe  $x$  que minimiza simultaneamente todos os objetivos, assim  $F^*(x)$  é um utópico ou ideal. Entretanto, este tipo de solução raramente é factível, principalmente para os problemas reais, onde na maioria das vezes os objetivos são conflitantes entre si.

A Fig. 09 corresponde a uma representação gráfica dos termos apresentados, utilizando-se como exemplo um problema bidimensional contendo dois objetivos.



**Figura 9.** Representação dos elementos de uma otimização Multiobjetivo bidimensional com dois objetivos.

Há muitas estudos empregados na área de otimização Multiobjetivo: conjunto convexo e não-convexo; solução não-dominada; superfície de Pareto entre outras. No problema (22) uma solução  $u \in E$  domina uma solução  $v \in E$  se e somente se  $f_i(u) \leq f_i(v)$  e existe pelo menos um índice  $i$  tal que  $i=1, \dots, k$ .

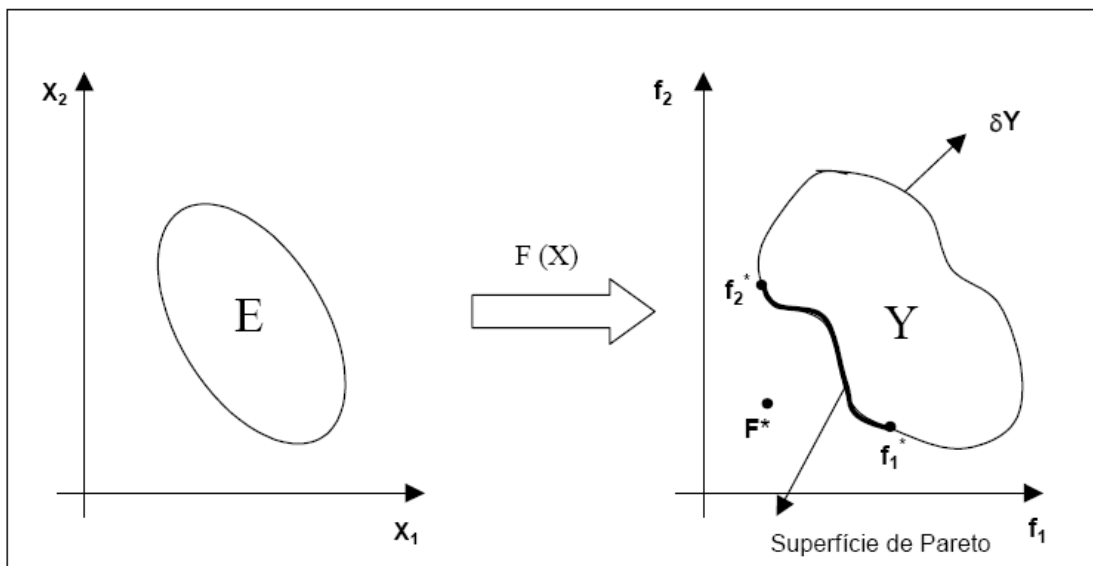
#### 9.4.2. Superfície de Pareto

O conjunto formado por soluções do problema Multi\_Objetivo que não são dominadas por nenhuma outra solução é denominado conjunto de soluções não-dominadas ou conjunto ótimo de Pareto.

A região em  $R^k$  formada pelos vetores objetivos das soluções ótimas de Pareto é conhecido como superfície de Pareto. A Fig. 07 apresenta a superfície de Pareto para um problema bidimensional com dois objetivos.

É claro que qualquer solução que se deseja para um problema Multiobjetivo deve ser, sempre que possível, um membro da superfície de Pareto. Desta forma, se a solução final é selecionada desta superfície, não existe nenhuma outra solução que seja melhor que ela em todos os atributos e cabe ao indivíduo responsável pela otimização a decisão de qual destes pontos utilizar.

Existe uma diferença entre um conjunto de soluções não-dominadas e a superfície de Pareto. Quando fazemos referência ao conjunto de soluções não-dominadas estamos tratando apenas de uma amostra do espaço de busca, enquanto a superfície de Pareto é definida em relação a todo o espaço de busca. Logo o conjunto de soluções não-dominadas é um subconjunto da superfície de Pareto. A Fig. (10) corresponde a uma representação gráfica dos termos apresentados, utilizando-se como exemplo um problema bidimensional contendo dois objetivos.



**Figura 10.** Superfície de Pareto para um problema bidimensional com dois objetivos.

A escolha de uma solução para um problema Multiobjetivo será sempre dependente do decisor responsável pelo processo de otimização.

Assim, os vários tipos de problemas Multiobjetivo existentes no campo da engenharia e em outros setores, têm sua solução baseada na forma como a pessoa responsável pelo processo de otimização emprega seu conhecimento acerca do problema, principalmente no que se refere à forma como os objetivos do problema serão relacionados, (ANDERSSON, 2000). Veja método na seção (5.9).