

UNIVERSIDADE ESTADUAL "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O APROVEITAMENTO DO PALHIÇO  
DA CANA-DE-AÇÚCAR, POSTO NA UNIDADE INDUSTRIAL, PARA  
FINS DE COGERAÇÃO.**

**HERMAS AMARAL GERMEK**

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

BOTUCATU  
Fevereiro de 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**TÍTULO: ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O APROVEITAMENTO DO  
PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR, POSTO NA UNIDADE  
INDUSTRIAL, PARA FINS DE COGERAÇÃO.**

**HERMAS AMARAL GERMEK**

Orientador: Prof. Dr. Elias José Simon  
Co-orientador: Prof. Dr. Tomaz Caetano Cannavam Rípoli

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

BOTUCATU  
Fevereiro 2005

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

G373a Germek, Hermas Amaral, 1951-  
Análise de decisão sobre o aproveitamento do palhiço da  
cana-de-açúcar, posto na unidade industrial, para fins de  
cogeração / Hermas Amaral Germek. -- Botucatu, [s.n.],  
2005.

xv, 107 f. : il. color., gráfs., tabs.

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

Orientador: Elias José Simon.

Co-orientador: Tomaz Caetano Cannavam Rípoli.

Inclui bibliografia.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia elétrica e  
calor - Cogeração. 3. Energia da biomassa. 4. Cana-de-  
açúcar. 5. Cana-de-açúcar - Colheita. I. Simon, Elias  
José. II. Rípoli, Tomaz Caetano Cannavam III. Universidade  
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de  
Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III.  
Título.

CDD 333.7938

UNIVERSIDADE ESTADUAL "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O APROVEITAMENTO DO  
PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR, POSTO NA UNIDADE  
INDUSTRIAL, PARA FINS DE COGERAÇÃO.**

AUTOR: HERMAS AMARAL GERMEK

ORIENTADOR: PROF. DR. ELIAS JOSÉ SIMON

CO-ORIENTADOR: PROF.DR. TOMAZ CAETANO CANNAVAM RÍPOLI

Aprovado pela Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Tomaz Caetano Cannavam Rípoli – ESALQ/USP – Piracicaba – Presidente

---

Prof. Dr. Walter Molina Junior – ESALQ/USP- Piracicaba

---

Prof. Dr. José Carlos Teixeira da Silva – FE/UNESP-Bauru

---

Prof. Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair – ESALQ/USP – Piracicaba

---

Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova – ESALQ/USP – Piracicaba

Data da Realização: 11 de fevereiro de 2005

Horário: 8:30h

Local: Sala de apresentação da Pós-graduação-FCA/UNESP

## AGRADECIMENTOS

(ordem alfabética)

Alcides Lopes Leão - Prof. Dr. – FCA/UNESP – Botucatu – SP  
Alfredo Colenci Junior – Prof. Dr. – CEETEPS/FATEC – USP – São Paulo – SP  
Antonio Celso Sturion – Eng. Agr. MSc. – Piracicaba – SP  
Clovis Massachi Muraishi - Us. Açucareira Guaira - SP  
Daniel Henrique Gonçalves - Prof. MSc. Ribeirão Preto - SP  
Eder Ricardo Biasoli – Prof. Dr. FUNDUNESP - São Paulo - SP  
Edgard Gomes F. de Beauclair - Prof. Dr. - ESALQ/USP - Piracicaba - SP  
Elias José Simon - Prof. Dr.- FCA/UNESP - Botucatu - SP  
Elmo da Silva - CTC Copersucar - Piracicaba - SP  
Guilherme Cella - Techpetersen – Piracicaba - SP  
Inês Andrade - Biblioteca FCA/UNESP - Botucatu - SP  
Jaime Luiz Bassinello - Eng. Agr.Us. Açucareira Guaira - SP  
Jaqueline de Moura Gonçalves – PG/FCA/UNESP – Botucatu – SP  
José Carlos Teixeira da Silva - Prof. Dr. - FE/UNESP - Bauru - SP  
José Paulo Stupiello - Prof. Dr. ESALQ/USP / STAB – Piracicaba – SP  
Kleber Pereira Lanças - Prof. Dr.- FCA/UNESP – Botucatu - SP  
Laura Laganá - Profa. – CEETEPS / Superintendência - São Paulo - SP  
Luiz Gonzaga Benetti - Grupo Andrade - Ribeirão Preto - SP  
Marcelo Fuzato - Prof. CEPEC's - Piracicaba - SP  
Marco Antonio Carleto - Us.Santa Adélia - Jaboticabal - SP  
Maria Cecília Ribeiro Nantes - Economista. Doméstica. - Ribeirão Preto - SP  
Marilena do Carmo Santos – PG/FCA/UNESP – Botucatu – SP  
Marlene Rezende de Freitas – PG/FCA/UNESP – Botucatu – SP  
Nilson Augusto Villa Nova - Prof. Dr. ESALQ/USP – Piracicaba - SP  
Odivaldo José Seraphim - Prof. Dr.- FCA/UNESP – Botucatu - SP  
Plínio Nogueira de Arruda Sampaio – FATEC/TQ – Taquaritinga - SP  
Sílvia Amaral Germek - FUNDUNESP - São Paulo - SP  
Solange Bason – FATEC-TQ – Profa.Taquaritinga – SP  
Tomaz Caetano Cannavam Rípoli - Prof. Dr.- ESALQ/USP – Piracicaba - SP  
Vitório Laerti Furlani Neto - UFSCar - Araras – SP  
Walter Francisco Molina Jr. Prof. Dr.- ESALQ/USP – Piracicaba - SP

CADA UM SABE PORQUE.

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais:  
Emílio e Yone (in Memorium)

À Ediméia

As minhas irmãs:  
Cecília e Silvia

À minha esposa:  
Maria Aparecida

A meus filhos  
Rita Isabel, Carolina, Hermas JR e Guilherme

Aos demais membros da família

**Pensamento**

Para a maior parte da humanidade,  
o mundo não será um lugar aprazível no século  
XXI.

Mas não precisa ser assim.

Com previsão e uma ação decisiva,  
pode-se criar um mundo melhor para todos.

## SUMÁRIO

|                                                                                               | Páginas |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Lista de Tabelas .....                                                                        | x       |
| Lista de Figuras .....                                                                        | xii     |
| RESUMO .....                                                                                  | xiii    |
| SUMMARY .....                                                                                 | xiv     |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                           | 1       |
| 1.1. Caracterização e importância do problema .....                                           | 1       |
| 1.2. Objetivos.....                                                                           | 2       |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                                | 4       |
| 2.1. Considerações de ordem geral .....                                                       | 4       |
| 2.2. A cana-de-açúcar .....                                                                   | 14      |
| 2.3. O setor produtor de cana-de-açúcar .....                                                 | 14      |
| 2.4. A operação de pré-colheita utilizando a queima da lavoura, o ambiente e a<br>saúde ..... | 17      |
| 2.5. A lavoura de cana-de-açúcar e os resíduos da pós-colheita .....                          | 19      |
| 2.6. Matriz energética brasileira .....                                                       | 22      |
| 2.7. A tecnologia de geração de vapor, combustível e rendimentos .....                        | 26      |
| 2.8. Energia da biomassa .....                                                                | 30      |
| 2.9. Comércio de energia no Brasil e a legislação.....                                        | 34      |
| 2.10. Sistema de recolhimento do palhço na lavoura de cana-de-açúcar .....                    | 38      |
| 2.11. Métodos matemáticos de análise de experimentação e a abordagem<br>metodológica .....    | 41      |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.12. Avaliação de eficiência dos equipamentos de cogeração.....                                                        | 49 |
| 3.. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                             | 53 |
| 3.1. Método.....                                                                                                        | 53 |
| .....                                                                                                                   | 53 |
| 3.2. Tratamentos.....                                                                                                   | 53 |
| 3.3. Levantamento de dados de campo .....                                                                               | 56 |
| 3.3.1. Ficha de levantamento de dados de campo junto às unidades industriais ....                                       | 57 |
| 3.4. O modelo matemático de simulação .....                                                                             | 57 |
| 3.4.1. Diagrama de blocos do estudo .....                                                                               | 58 |
| 3.4.2. Cálculos .....                                                                                                   | 60 |
| 3.4.2.1. Cálculo do custo operacional do sistema de transferência de palhiço .....                                      | 60 |
| 3.4.2.2. Cálculos dos custos do sistema de limpeza a seco, investimentos – $b_1$ e operacional – $b_2$ .....            | 62 |
| 3.4.2.3. Cálculos dos custos de investimento - $d_1$ e operacional - $d_2$ do sistema de desfardamento de palhiço ..... | 66 |
| 3.4.2.4. Cálculos dos custos de investimento - $e_1$ e operacional - $e_2$ do sistema de desfibramento de palhiço ..... | 67 |
| 3.3.3. Valores potenciais de disponibilidade de palhiço recolhido .....                                                 | 70 |
| 3.3.3.1. Valores mínimos, em toneladas, de palhiço safra .....                                                          | 70 |
| 3.3.3.2. Valores Máximos, em toneladas, de palhiço safra .....                                                          | 70 |
| 3.3.4. Determinação da equação objetivo .....                                                                           | 71 |
| 3.3.5. Definindo as equações de restrição .....                                                                         | 74 |
| 3.3.5.1. Considerações e diagrama de blocos da recepção de cana em colheita integral .....                              | 75 |
| 3.3.5.2. Equações restritivas do palhiço do sistema de colheita integral .....                                          | 76 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.5.3. Considerações e diagrama de blocos da recepção do palhiço no sistema de recolhimento a granel .....  | 77  |
| 3.3.5.4. Equações restritivas do palhiço do sistema de recolhimento a granel.....                             | 78  |
| 3.3.5.5. Considerações e diagrama de blocos da recepção do palhiço no sistema de recolhimento em fardos ..... | 79  |
| 3.3.5.6. Equações restritivas do palhiço do sistema de recolhimento em fardos ..                              | 80  |
| 3.5. Cálculo do potencial de geração de energia do palhiço com relação ao bagaço..                            | 81  |
| 3.5.1. Cálculo da potência gerada pelo bagaço .....                                                           | 83  |
| 3.5.2. Cálculo da potência gerada pelo palhiço .....                                                          | 84  |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                               | 87  |
| 4.1. Resultados quanto a aplicação da equação objetivo .....                                                  | 91  |
| 4.2. Resultados da avaliação da relação energética entre o palhiço e o bagaço .....                           | 96  |
| 5. CONCLUSÕES .....                                                                                           | 98  |
| 6. RECOMENDAÇÕES .....                                                                                        | 99  |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                           | 100 |
| ANEXOS                                                                                                        |     |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Páginas |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 01. Poder calorífico superior – PCS e poder calorífico inferior – PCI das folhas de cana-de-açúcar Zulauf, (1985) .....                                                                                                                                                                            | 24      |
| 02. Poder calorífico e umidade de diferentes resíduos canavieiros estocados .....                                                                                                                                                                                                                  | 32      |
| 03. Peso específico aparente do bagaço Huggot, (1984) .....                                                                                                                                                                                                                                        | 33      |
| 04. Valores médios de PCS – poder calorífico superior e PCU – poder calorífico útil de algumas biomassas, em kcal/kg .....                                                                                                                                                                         | 35      |
| 05. Valores econômicos - PROINFRA de 2003, sugeridos para a comercialização de energia alternativa no Brasil nas diversas regiões brasileiras. (Valores em R\$/MWh).....                                                                                                                           | 38      |
| 06. PCI - poder calorífico inferior do bagaço da cana-de-açúcar a diferentes umidades e o correspondente aumento energético. Peres (1982).....                                                                                                                                                     | 49      |
| 07. Características do vapor d'água em função da pressão Huggot, (1984) .....                                                                                                                                                                                                                      | 51      |
| 08. Levantamento e dados de campo dos custos e capacidades das máquinas Caterpillar tipo pá carregadeira utilizada no manuseio do bagaço no pátio da unidade industrial do grupo Andrade de Pitangueiras-SP .....                                                                                  | 60      |
| 10. Resumo dos valores calculados em R\$/tonelada em função dos custos e capacidades das máquinas Caterpillar tipo pá carregadeira com base nos valores obtidos no manuseio do bagaço no pátio da unidade industrial do grupo Andrade de Pitangueiras-SP, considerando 30 operações por hora ..... | 61      |
| 11. Resumo dos dados calculados para a unidade modelo .....                                                                                                                                                                                                                                        | 70      |
| 12. Valores de custos de investimento e operacionais calculados ou adotados com base nos dados de campo e expressos em TPH – Toneladas de palhiço hora .....                                                                                                                                       | 71      |
| 13. Resultados da aplicação da equação (25) de relação bagaço/palhiço considerando a produtividade agrícola média do Estado de São Paulo de 71,3t/ha .....                                                                                                                                         | 83      |
| 14. Resumo das equações de restrição das rotas adotadas para uma unidade industrial idealizada de capacidade de processamento 60 TCH de cana, ou seja uma Destilaria de 120.000 de álcool por dia .....                                                                                            | 87      |
| 15. Resumo dos resultados com referência ao custo do investimento do processo de adequação do palhiço para uma unidade industrial padrão de 60TCH .....                                                                                                                                            | 91      |
| 16. Resumo dos resultados com referência ao faturamento bruto da comercialização da energia elétrica com base na tabela Proinfra, correspondente ao processo de adequação do palhiço de uma unidade industrial de 60TCH .....                                                                      | 92      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 17. Resumo dos resultados com referência ao custo unitário, correspondente ao processo de adequação do palhiço, expresso em R\$/TPH .....                                                                                                                                                                                                                 | 92 |
| 18. Resumo dos resultados com referência ao índice da relação do custo de implantação do processo de adequação do palhiço - IRT e do faturamento bruto para uma unidade industrial padrão de 60TCH .....                                                                                                                                                  | 92 |
| 19. Custos estimados das rotas tecnológicas de colheita integral de cana, recolhimento a granel e em fardos em R\$/EBP- Equivalente barril de petróleo e em R\$/TP- Tonelada de palhiço. Áreas agrícola, industrial e total .....                                                                                                                         | 94 |
| 20. Potência gerada (KW) para 100TCH, nos diferentes usos possíveis da biomassa ....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 95 |
| 21. Resultados obtidos da aplicação da fórmula "c" deduzida por este estudo aplicando-se os valores percentuais variáveis de recolhimento do palhiço da lavoura (fpr%) em função da relação percentual de toneladas de palhiço por tonelada de cana (tTC%) também deduzida neste estudo, considerando o Poder Calorífico do palhiço de 1.500kcal/kg ..... | 95 |
| 22. Valores percentuais de incremento de potência devido ao uso do palhiço como fonte adicional de combustível, do tipo biomassa, ao bagaço .....                                                                                                                                                                                                         | 96 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                             | Páginas |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 01: Sistema de alimentação de bagaço nas caldeiras segundo Hugot (1984) .....                                                                                                                                                                               | 07      |
| 02. Foto das frações que constituem o palhiço e que causam obstrução do sistema rotativo de alimentação das caldeiras. Foto Stupiello (2001) .....                                                                                                          | 10      |
| 03. Foto do sistema de recolhimento de palhiço a granel, após enleiramento. Foto: Stupiello (2001) .....                                                                                                                                                    | 11      |
| 04. Foto do sistema de enleiramento do palhiço que antecede o processo de recolhimento a granel ou em fardos. Foto Ripoli (2001) .....                                                                                                                      | 11      |
| 05. Fotos do sistema de recolhimento com enfardamento do palhiço por sistemas, cilíndrico ou retangular e o mecanismo de manuseio e transporte de carga seca. Foto Ripoli (2003) .....                                                                      | 12      |
| 06. Foto do sistema de colheita integral da cana-de-açúcar e matéria estranha vegetal com o sistema de corte de palmito e limpeza desligado. Foto: Stupiello (2001)..                                                                                       | 12      |
| 07. Esquema de limpeza de cana-de-açúcar a seco existente no Brasil. Fonte:Techpetersen .....                                                                                                                                                               | 13      |
| 08. Fotos com detalhes de um sistema de limpeza a seco de colmos de cana-de-açúcar, implantada no Brasil..Techpetersen .....                                                                                                                                | 18      |
| 09. Foto de duas caldeiras de alta pressão 65kg/cm <sup>2</sup> com o sistema de alimentação de bagaço da câmara de queima de leito fluidizado e das esteiras de distribuição do bagaço operando com pá carregadora. Usina Santa Adélia. Foto Carleto 2004. | 29      |
| 10. Comparação de custos operacionais (R\$/EBP), em função das variações das Eficiências de Campo dos sistemas, do palhiço posto na usina .....                                                                                                             | 40      |
| 11. Procedimentos para desenvolvimento do modelo .....                                                                                                                                                                                                      | 46      |
| 12. Diagrama de blocos da fabricação de açúcar, melaço e eletricidade proposta por Paturau (1992) .....                                                                                                                                                     | 52      |
| 13. Foto do equipamento de pá carregadora utilizada no sistema de descarregamento do palhiço e no manuseio do material no pátio de bagaço. Foto Stupiello (2001) ...                                                                                        | 55      |
| 14. Diagrama de blocos do processo de cogeração estudado empregando formas diferentes de colheita do palhiço a ser utilizado como combustível nas caldeiras, na forma de biomassa, delimitando a área de abrangência do estudo .....                        | 59      |
| 15. Foto do conjunto do sistema rotativo de alimentação de combustível nas caldeiras que se obstrui com as frações de palhiço da Usina Vale do Rosário-SP. Foto do autor (2004) .....                                                                       | 72      |
| 16. Custos do palhiço posto no pátio da unidade industrial expressos em R\$/TP – toneladas de palhiço, obtidos da transformação dos valores expressos em R\$/EBP – equivalente barril de petróleo, dos estudos realizados por Ripoli (2003) .....           | 74      |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 17. Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de colheita integral .....                 | 76 |
| 18. Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de recolhimento de palhiço a granel .....  | 78 |
| 19. Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de recolhimento de palhiço em fardos ..... | 80 |

**ANÁLISE DE DECISÃO SOBRE O APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR, POSTO NA UNIDADE INDUSTRIAL, PARA FINS DE COGERAÇÃO.** Botucatu, 2005. 107 p. Tese (doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: HERMAS AMARAL GERMEK

Orientador: PROF. DR. ELIAS JOSÉ SIMON

Co-orientador: PROF. DR. TOMAZ CAETANO CANNAVAM RÍPOLI

## **RESUMO**

O estudo aborda as novas tendências da gestão ambiental em reduzir a poluição, evitando-se as queimadas de cana-de-açúcar e o aproveitamento de resíduos agrícolas para fins de geração de energia alternativa, de ciclo limpo, com o emprego de biomassa, atendendo as recomendações da Agenda 21 e do protocolo de Kyoto de reduzir fontes poluidoras e melhorar a qualidade de vida e da saúde da população com o emprego de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL. Mostra que a modelagem matemática de simulação de processos operacionais é um instrumento eficaz de gerenciamento auxiliando na tomada de decisões, possibilitando ao setor sucroalcooleiro introduzir este instrumento de gestão, pouco empregado pelo mesmo, reduzindo, com isto, riscos e custos na definição de rotas tecnológicas de processos pelas empresas. Apresenta uma equação de simulação de diversas rotas tecnológicas para adequar o tamanho do particulado do palhiço, ao sistema existente que alimenta as caldeiras e que permite avaliar as vantagens econômicas de se empregar o palhiço, e/ou a matéria estranha vegetal da colheita da cana-de-açúcar, como fonte de biomassa para fins de cogeração, juntamente com o bagaço e para isto, define a rota de menor custo. Nas simulações realizadas foi possível determinar que a rota tecnológica de menor custo de adequação dessa biomassa foi a da colheita integral seguida do recolhimento em fardos e a granel que não apresentaram diferenças significativas entre si, ressaltando que análise da simulação deve abranger ambos os setores agrícola e industrial resultando em uma visão mais adequada. Determinou-se, por equações lineares que o palhiço pode contribuir com o incremento da disponibilidade energética adicional ao bagaço na ordem de 5,59% a 55,94% dependendo das características do canavial e do percentual de recolhimento adotado, além do que o aproveitamento do palhiço e resíduos vegetais canavieiro permite gerar recursos financeiros adicionais na produção sucroalcooleira.

---

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Palhiço; Cogeração; Energia alternativa; Biomassa; Colheita.

**OPERATIONS RESEARCH OF THE "PALHIÇO" OF SUGAR-CANE,  
IN THE INDUSTRY UNITY, TO CO-GENERATION.** Botucatu,  
2005. 107 p. Tese (doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) -  
Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: HERMAS AMARAL GERMEK

Adviser: PROF. DR. ELIAS JOSÉ SIMON

Co-adviser: PROF. DR. TOMAZ CAETANO CANNAVAM RÍPOLI

## **SUMMARY**

This study reflects on the new tendencies of environmental management in reducing pollution avoiding burning the sugar-cane and taking the advantage of agricultural residues, in order to generate clean cycle of alternative energy with the utilization of biomass, meeting the recommendations of "Agenda 21" and Kyoto Protocol, to reduce pollutant sources and improve the population's health and life quality, making a good use of – Clean Development Mechanism (MDL). The study shows that the mathematical modeling of operational process simulation is an effective instrument of management that supports a taking of stand, to enable the sugar-cane sector to introduce this not much utilized instrument, reducing the risks and costs in the definition of technological routes of processes by the companies. It presents an equation of simulation of several technological route to adapt the size of the fragment of the "palhiço", to the existent system that it feeds the kettles and that it allows to evaluate the economical advantages of using the "palhiço", agricultural residue of the crop of the sugar-cane, as biomass source for co-generation aim, together with the bagasse and for this purpose, it defines the route of smaller cost. In the accomplished simulations it was possible to determine that the technological route of smaller cost of adaptation of the "palhiço" (crop residues) was the one of the crop in bales following by the crop in bulk and finally for the system of crop of integral sugar cane. Emphasizing that analysis of the simulation should include both agricultural and industrial sections for not incurring in mistakes of isolated evaluation. It was also determined by linear equations that the "palhiço" can contribute with the increment of the additional energy readiness to the bagasse in the strip from 5,59% to 55,94% depending on the to suck cane plantation and of the percentile of adopted withdrawal, and the "palhiço" utilization is viable

---

Keywords: Sugar-cane; Palhiço; Co-generation; Alternative Energy; Biomass; harvesting.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Caracterização e importância do problema

A energia alternativa, consubstanciada na proposta de MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, contempla como princípio a preservação ambiental e a redução da dependência dos recursos da natureza, fazendo frente aos anseios da sociedade atual.

O Brasil domina a tecnologia de produção de álcool que é considerada uma fonte energética alternativa de ciclo limpo. Possui terras agriculturáveis a serem cultivadas para a geração de combustível alternativo visando atender a demanda mundial e o comércio de crédito de carbono como “*commodity*” ambiental.

Entretanto, atualmente, para a colheita manual tem sido aplicada a pré-operação de queima dos canaviais perdendo a energia contida nesta fração da biomassa denominada por palhiço e fere os princípios de conservação ambiental preconizados nas recomendações da Agenda 21.

Além disso, a legislação estadual, Lei 11.241 de 19/09/2002, prevê que a partir do ano 2020 a pré-operação de queimada dos canaviais deverá ser totalmente abolida no Estado de São Paulo. (DOE 2002) e o processo já teve seu início com metas anuais de redução cada vez maiores sobre a área a ser colhida.

O palhiço, e que concentra boa parte da energia atualmente perdida nas queimadas, foi definida por Ripoli e Ripoli (2004) como sendo: “material remanescente sobre a superfície do talhão após a colheita, principalmente, a mecanizada, constituído de folhas verdes, palhas, ponteiros e ou suas frações; frações de colmos (industrializável ou não); eventualmente frações de raízes e partículas de terra a eles aderida”.

No entanto, o tamanho do particulado que constitui o palhiço é bem diferente do bagaço o qual é bastante homogêneo e diz respeito a fibra contida nos colmos e na matéria-estranha vegetal que passou pelos processos de desfibramento e esmagamento nas moendas. Apresenta, em média, 50% de umidade. Tal característica do palhiço tem causado obstrução no sistema rotativo, de alimentação mecânica das caldeiras, e dificultando a eficiência da queima das caldeiras de alta pressão que operam com leito fluidizado ao invés de grelhas.

A alternativa que vem sendo empregada para contornar o problema de obstrução e de eficiência de queima tem sido a mistura do palhiço com os colmos de cana-de-açúcar antes do processo de desfibramento, permitindo o fracionamento do tamanho do particulado. Este sistema é antagônico, pois prejudica a eficiência de extração bem como aumenta o teor de fibra industrial, reduzindo a capacidade de moagem de acordo com a fórmula de Hugot (1984).

Assim, torna-se necessário um estudo para determinar rotas tecnológicas de menor custo para o aproveitamento dos resíduos da colheita e otimização das tecnologias de produção sucroalcooleira de cogeração, adequando o tamanho do particulado da fração da biomassa a ser agregada ao bagaço.

A hipótese deste estudo é que, por meio da técnica de modelagem matemática, pode-se chegar à rota tecnológica de menor custo, ou seja rota econômica para o aproveitamento do palhiço como fonte de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro, para ser comercializada junto às concessionárias privadas, bem como conhecer qual será o incremento de geração de energia que o palhiço oferecerá com relação ao bagaço.

## **1.2. Objetivos**

Os objetivos, deste estudo, foram os de:

- Verificar se a utilização da modelagem matemática poderá ser empregada na avaliação do melhor sistema operacional a ser adotado, reduzindo os custos, risco e tempo de testes.

- Examinar qual seria o procedimento operacional de menor custo de processamento na adequação do palhiço para diferentes formas de ser recebido na unidade industrial.
- Determinar a potência gerada pelo palhiço quanto ao incremento de energia potencial que existe no palhiço em relação ao bagaço devido à sua importância na matriz energética de fontes alternativas do tipo biomassa.

Desta forma, acredita-se que o aproveitamento do palhiço como fonte adicional de combustível misturado ao bagaço poderá se tornar efetivamente uma fonte de biomassa para ser empregada na cogeração e propiciar a agregação de renda pela comercialização da energia elétrica na rede pública e com isso colaborar na eliminação da pré operação de queimada dos canaviais para a colheita da matéria prima e melhorar a qualidade do ambiente atendendo à legislação ambiental brasileira, às recomendações da Agenda 21 e ao protocolo de Kyoto. E no futuro, também, propiciar a comercialização do "*commodity*" ambiental tendo em vista que mais de 55% dos países causadores da poluição mundial assinaram o acordo de redução de 8% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera tendo como base o ano de 1990 e que passa a vigorar mundialmente a partir de fevereiro de 2005.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Considerações de ordem geral**

De acordo com as informações da ONU (1992), em 1972, um grupo de empresas analisando os cenários e as tendências do futuro das gerações com os modelos de desenvolvimento dos países, da forma em que estavam sendo feitas, explorando os recursos da natureza sem um equilíbrio sustentável, o mundo entraria em crise comprometendo este futuro. Esta reunião ficou conhecida como o encontro de Estocolmo e a partir disso, os marcos teóricos possibilitaram entender a evolução dos cenários e as tendências do desenvolvimento mundial. Neste encontro ficou evidenciado que os recursos da natureza eram finitos, principalmente, no que diz respeito à disponibilidade de água potável e energia de fontes fósseis.

Na sequência, os cientistas e estudiosos começaram a determinar a melhor forma de se ter o desenvolvimento dos países de modo sustentável, preservando a natureza e assim o futuro das gerações e, em 1992, ocorreu no Brasil o encontro de diversos países e organizações mundiais, denominado ECO-92 e produziu as recomendações denominadas como Agenda 21, ONU (1992). Dentre estas recomendações ficou evidenciado que o desenvolvimento sustentável exige que o mercado e o ambiente sejam questões integradas, devendo haver ações que minimizem a pobreza, incentivando a agricultura sustentável, mudando os padrões de consumo, otimizando os recursos disponíveis, minimizando os rejeitos, com o uso de tecnologias ambientalmente saudáveis e menos dependentes dos recursos finitos da Terra.

Recomenda, ainda a Agenda 21, ONU (1992), a proteção da atmosfera terrestre evitando a destruição da camada de ozônio e a poluição do ar, priorizando as fontes renováveis de energia, a prática de conservação do uso do solo, com aumento da produtividade, a rotação de culturas, a redução de agrotóxicos e o combate ao desmatamento, evitando a utilização de queimadas que degradam o solo e as fontes de água, com perdas da vida silvestre e da biodiversidade, além do aquecimento global, reconhecendo que as florestas e plantas são sorvedouros de CO<sub>2</sub>. Assim deverá, por meio da educação, ser fomentada a conscientização ambiental promovendo o desenvolvimento sustentável, fortalecendo valores e ações ambientalmente corretas nas atitudes de tomadas de decisões. Estes fatos são bem destacados no estudo da Agenda 21

Por dez anos os países em desenvolvimento procuraram seguir estas recomendações, segundo Eston (1990), visando a redução dos impactos ambientais e suas formas de empregar estas recomendações, muitas das quais, nunca executadas, e em 2002, em uma nova reunião foi formalizado o Protocolo de Kyoto, onde, os países signatários se comprometeram a reduzir 8% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera tendo como base o ano de 1990. Alguns destes países não encontraram solução imediata de redução do CO<sub>2</sub> na atmosfera, que compromete a camada de ozônio que protege a Terra dos raios solares prejudiciais a saúde e promotores do aquecimento global. Entretanto, o Brasil, um país continental com grandes extensões de terra agriculturável pode perfeitamente explorar, por meio da agricultura sustentável, atividades que venham a atender as necessidades mundiais e, assim, colaborar com a melhoria da qualidade de vida da Terra, aproveitando-se das oportunidades que estão sendo apresentadas frente à problemática mundial. O Brasil já domina a tecnologia de produção do álcool carburante produzido por meio de fonte alternativa e renovável e de ciclo limpo (cana-de-açúcar), que conta com uma área plantada de aproximadamente 5 milhões de hectares e que representa, apenas, 1,3% da área total disponível para a atividade agrícola. O uso do álcool como fonte renovável de energia é de fundamental importância no balanço da matriz energética mundial dada a sua contribuição dos benefícios ambientais e a geração de postos de trabalho, pois, permite reciclar o CO<sub>2</sub> da atmosfera por meio do processo fotossintético, atendendo uma das recomendações da Agenda 21.

No Brasil, a exploração canavieira sempre contemplou economicamente o valor do açúcar contido na matéria-prima que é processado para a obtenção de açúcar, de álcool ou aguardente e seus derivados. Estudos mostram que a energia contida na matéria-prima e que lhe confere alto poder calorífico nunca ou quase nunca foi valorizada no Brasil, pois não havia até a poucos anos o comércio regular e de longo prazo que incentiva a sua transformação em energia elétrica, para ser comercializado na rede pública. Deste modo, apesar de existir tecnologia de cogeração de alta eficiência no mundo, as unidades industriais brasileiras não foram concebidas para plena exploração do potencial energético da cultura canavieira. A tecnologia adotada é a de incineração do bagaço para a geração de energia elétrica utilizada internamente e da queima do palhiço, para facilitar o corte manual. Germek (1985).

Recentemente, segundo Koblitz (2004), o Brasil revisou a sua matriz energética e acompanhando a tendência mundial de valorização de fontes renováveis, tais como a eólica, e de biomassas, passou, a partir de 2000, a contemplar o uso de fontes renováveis de energia sob novas leis e decretos. Estes definiram formas de comercialização da energia elétrica brasileira por meio de leilões, assegurando por longo prazo, as garantias para a amortização do capital investido no sistema de cogeração abrindo espaço e oportunidade para comercialização de 1.100MW de energia de fontes de biomassa, na qual a fibra da cana se destaca juntamente com os resíduos do processamento de cereais e de serragem da madeira.

Na lavoura, os sistemas de colheitas foram modelados por Sartori (2001) e valorizados seus custos por Ripoli (2003) e outros autores, porém não se encontrou material que orientasse qual seria o menor custo do processamento do palhiço na unidade industrial recebido no pátio até a alimentação do sistema de cogeração misturado ao bagaço.

Algumas tentativas estão sendo empreendidas no setor sucroalcooleiro, segundo Cela (2003) tais como a mistura do palhiço na matéria-prima, e assim reduzindo o tamanho dos particulados que constituem o palhiço e que tem causado problema de entupimento do sistema alimentador de bagaço das caldeiras, (figura 1), dificultando seu emprego na forma originária da lavoura mas isso reduz a capacidade e a eficiência do processo de extração e pode comprometer a qualidade do produto final como fica evidenciado nos comentários de Hugot (1984) e explicitados na sua equação de avaliação da capacidade de moagem.

A equação de Hugot (1984) para avaliar a capacidade de extração de um tandem de moagem é a seguinte:

$$C = [0,8K \{c n (1-0,06 n D) L D^2 \sqrt{N} \}] \div f$$

sendo:

C = Capacidade de Moagem em TCH.

K = fator relativo a alimentação forçada

f = Fibra na cana expresso em fração decimal.

c = Coeficiente relativo ao preparo da cana.

n = rpm Rotação por Minuto do primeiro terno.

L = Comprimento dos rolos em metros.

D = Diâmetro dos cilindros em metros.

N = Número total de rolos

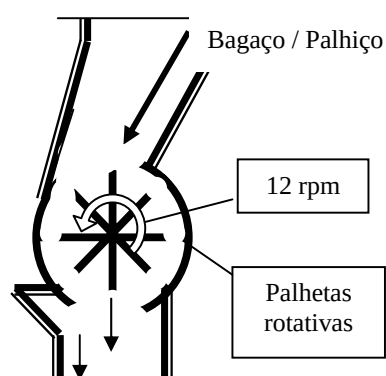


Figura 1: Sistema de alimentação de bagaço nas caldeiras segundo Hugot (1984).

Na impossibilidade de testar sistema e procedimentos no mundo real devido a seus elevados custos e riscos bem como estudar variações e compreender o sistema de modo a prever as situações futuras pode-se empregar a técnica da modelagem matemática, ou simulação para a busca de soluções, e que foi desenvolvida a partir do problema para definir a blindagem de reatores nucleares, que ocorreu em 1940 e que foi solucionada por Von Neumann e Ulam de acordo com Silva (2003) no projeto conhecido como análise de "Monte Carlo" em que os custos e riscos não permitiam a elaboração de testes no mundo real. Depois deste estudo a modelagem matemática e simulação passaram a fazer parte como instrumento de gestão na tomada de decisão das pesquisas.

Segundo Sartori (2001), Vieira (2003), Ripoli (2004), apesar do país dominar a tecnologia de produção sucroalcooleira, e dos trabalhos do setor agrícola sobre o poder

calorífico disponível no palhiço da cana-de-açúcar serem altamente significativos, a energia nele contida vem sendo pouco aproveitada pelo setor industrial na cogeração para fins de comercialização na rede pública.

Avaliando a situação brasileira nota-se que atualmente o Brasil conta com uma área de 851 bilhões de hectares dos quais 376 milhões de hectares estão disponíveis para a agricultura e apenas 5 milhões de hectares são utilizados pela cultura da cana-de-açúcar o que representa cerca de 1,3 % da área disponível para a atividade agrícola. Vieira (2003).

O Brasil foi o único país do mundo que conseguiu desenvolver, em nível comercial, uma alternativa energética para os combustíveis fósseis segundo Eston (1990), pois o ciclo cana/etanol é considerado um produto de ciclo limpo e apresenta seguinte análise para justificar a afirmação: "Um hectare de plantação produz, por ano, 75 toneladas de cana-de-açúcar, que fornecem 8,5 toneladas de açúcar ou 5.400 litros de álcool e 19,5 toneladas de bagaço, com 50% de umidade. No processo de produção agrícola, a queima do canavial produzem 1,2 tonelada de CO<sub>2</sub> e absorve 0,9 tonelada de oxigênio da atmosfera". A queima deste bagaço, que produz quase a mesma energia que o álcool, libera quatro toneladas de CO<sub>2</sub>. Por sua vez, os 5.400 litros de álcool, ou 4,27 toneladas, sendo queimados, produz 8,2 toneladas de CO<sub>2</sub>. Portanto, o ciclo combustível total da cana-de-açúcar emite para a atmosfera 13,4 toneladas de CO<sub>2</sub>. Pois bem: esta mesma quantidade de cana retira da atmosfera para crescer, 109 toneladas de CO<sub>2</sub> e devolve 70 toneladas de oxigênio. Resumindo, o ciclo cana/etanol retira da atmosfera cerca de oito vezes o CO<sub>2</sub> que produz, enquanto a queima da gasolina produz três toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de combustível sem nenhuma compensação, e produz outros poluentes muito mais nocivos". Este autor comenta ainda que a pré operação de queima do canavial em condições não reguláveis e otimizadas para a colheita gera 1,2 toneladas de CO<sub>2</sub> e que é perdido para a atmosfera e que poderia ser aproveitado, com a queima otimizada em caldeiras para a geração de vapor também proporcionaria a geração de energia elétrica adicional pelas unidades industriais.

Vieira (2003) informa que das 308 unidades industriais, 128 estão localizadas no Estado de São Paulo e foram responsáveis pela moagem de 192 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2002/2003 o que representa 60% da produção brasileira em uma área de 2,35 milhões de hectares plantados com esta cultura. A safra de 2002/2003 foi responsável pela produção de 448 milhões de sacas de 50kg de açúcar e de 12,5 bilhões de litros de álcool

sendo as 128 unidades industriais do Estado de São Paulo responsáveis pela participação de 64% do açúcar, 66% do álcool anidro e 56% do álcool hidratado do país.

A fibra da cana-de-açúcar e o palhiço oriundos desta nova situação de corte mecanizado com recolhimento do resíduo da colheita irão permitir uma maior cogeração de energia elétrica nas unidades industriais. Isso trará benefícios para o desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro brasileiro e de sua matriz energética com novas fontes de energia renovável e limpa de acordo com Ripoli (2004)

Para Feller (2003) a colheita da cana crua pode seqüestrar da atmosfera 1,6 toneladas de carbono por hectare por ano enquanto que o plantio direto de grãos pode seqüestrar de 0,4 a uma tonelada de carbono por ano por hectare.

Neste sentido, a unidade industrial típica, produtora simplesmente de açúcar e de álcool deverá no futuro se transformar em uma ilha de produção de energia alternativa, com o aproveitamento energético total da cana-de-açúcar, Germek (1985)

O emprego das técnicas de pesquisa operacional ou “*operations research*” permitirá a construção de modelos operacionais com abordagem científica para fins de resolução de problemas para a administração executiva, contribuindo para a tomada de decisões, Wagner (1986).

A área industrial tem cobrado do setor agrícola matéria-prima rica em sacarose e com a menor quantidade de resíduos estranhos, visando facilitar a produção de açúcar e álcool de acordo com Stupiello (2001).

A colheita mecanizada, sem a queima do canavial é crescente cada vez mais no setor sucroalcooleiro, diminuído a quantidade de terra contida nesta matéria-prima, mas tem aumentado a quantidade de resíduo vegetal, trazendo benefícios ao meio ambiente e à saúde do ser humano, de acordo com Ripoli (2004). Este resíduo vegetal, remanescente da cultura canavieira, rico em energia representa uma fonte alternativa para a cogeração de energia elétrica agregando valor na agroindústria sucroalcooleira. Este material é definido como palhiço, (figura 2), por ser constituído de palha, folhas verdes, ponteiros, terra e outros materiais vegetais e representa uma fonte de biomassa para a geração de energia, segundo Ripoli (1991).



Figura 2: Foto das frações que constituem o palhço e que causam obstrução do sistema rotativo de alimentação das caldeiras. Foto Stupiello (2001).

Diversos estudos foram desenvolvidos para definir o melhor sistema de recolhimento deste material para ser empregado na cogeração de energia, destacando-se os sistemas de recolhimento do palhço a granel empregando-se colhedoras de forragem, autopropelidas ou de arrasto, recolhimento com enfardamento feito por meio de autopropelidas ou de arrasto do tipo de fardo prismático ou cilíndrico ou por sistema de enfardamento por meio de prensas algodojeiras e de colheita integral com as colhedoras operando com os sistemas de corte do palmito e limpezas, por ventilação, desligados, Ripoli (2001).

Os estudos neste sentido foram esgotados segundo Ripoli et al (2003) no que diz respeito ao custo da tonelada deste material posto no pátio da unidade industrial ou do custo da energia contido na tonelada do palhço na unidade industrial para cada sistema de recolhimento que pode ser expresso pela equação:

$$BE=[1-(CC/EP)].100$$

sendo:

BE = Eficiência energética.

CC = Equivalente energético da quantidade de combustível consumido pelas máquinas e veículos envolvidos em um determinado sistema.

EP = Equivalente energético do palhço posto na usina.

Para Ripoli et al (2003), o sistema de recolhimento de palhiço a granel, (figura 3), emprega combustível nas operações de enleiramento, (figura 4), de recolhimento propriamente dito, de transporte e de descarregamento e com maior porcentagem de terra no material e que irá afetar no teor de energia contida no palhiço e produz maior compactação do solo, além de problemas nos equipamentos e processos da agrotransformação.



Figura 3: Foto do sistema de recolhimento de palhiço a granel, após enleiramento.  
Foto: Stupiello (2001).

Este mesmo autor comenta que o sistema de enfardamento (figura 5) também exige combustível nas operações de enleiramento, (figura 4), de enfardamento, de carregamento, de transporte e de descarregamento no pátio, causando também compactação do solo devido ao uso de máquinas e equipamentos nestas operações como a do sistema anterior.



Figura 4: Foto do sistema de enleiramento do palhiço que antecede o processo de recolhimento a granel ou em fardos. Foto Ripoli (2001).



Figura 5: Fotos do sistema de recolhimento com enfardamento do palhicho por sistemas, cilíndrico ou retangular e o mecanismo de manuseio e transporte de carga seca. Foto Ripoli (2003).

O sistema de colheita integral, (figura 6), é o que compacta menos o solo por utilizar uma única passagem na operação de corte e colheita, evitando a agregação de terra no material a ser transportado. A terra na matéria-prima causa problemas de erosão de equipamento, bombas e de tratamento do caldo. De acordo com Ripoli et al (2003). Além disso, de acordo com este autor, a eliminação da limpeza da matéria prima na lavoura diminui o consumo de combustível na operação e permite reduzir o custo da colhedeira de cana-de-açúcar, que está sendo uma tendência tecnológica do setor eliminando o sistema de corte superior dos colmos e de ventilação, simplificando a estrutura de apoio e manutenção de colheita.



Figura 6: Foto do sistema de colheita integral da cana-de-açúcar e matéria estranha vegetal com o sistema de corte de palmito e limpeza desligado. Foto: Stupiello (2001).

Entretanto, segundo Ripoli (2004) este sistema de colheita integral, (figura 6), exige a limpeza de pré-tratamento das impurezas de origem vegetal, (figura 7) antes do

processo de extração, junto à unidade industrial e consumirá energia com o acionamento de motores elétricos, mas economizará em diesel, combustível fóssil. Há que se destacar que a energia elétrica é produzida por cogeração deste próprio material residual da colheita e da extração - bagaço e palhiço.

Cuba, um dos países do Caribe produtor de açúcar e de derivados da cana-de-açúcar, segundo Lazzarini (1999) emprega este sistema de limpeza mecânica, (figura 7), com eficiência, que são conhecidos como centros de "acópio" ou recepção e de limpeza e que o Brasil poderá vir adotar tal prática, já que o preparo do terreno para o cultivo da cana-de-açúcar tem sido aplicado para evitar a incorporação de terra na matéria-prima e o material a ser separado deverá ser constituído de colmos picados e palhiço.

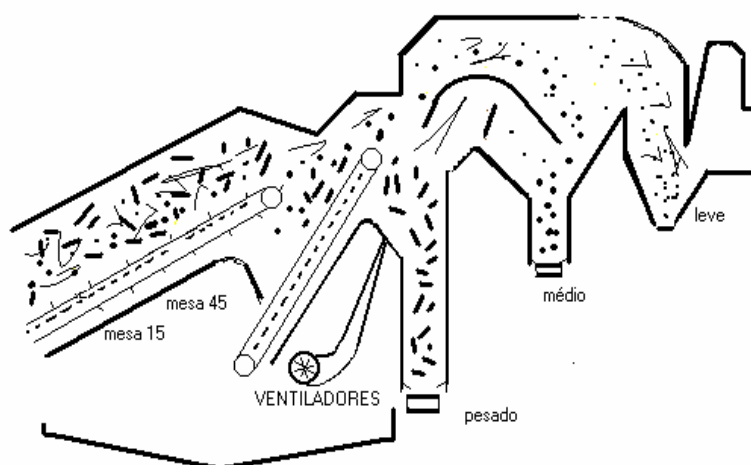


Figura 7: Esquema de limpeza de cana-de-açúcar a seco existente no Brasil  
Fonte:Techpetersen.

Há que se destacar que o atual sistema de pagamento de cana pelo teor de sacarose - PCTS, aos fornecedores, só leva em consideração o teor de açúcar e penaliza a fração fibra industrial e, os trabalhos de melhoramento da cana-de-açúcar têm esbarrado no antagonismo da elevação do teor de fibra na cana com o aumento do teor de sacarose. Stupiello (2001).

## 2.2. A cana-de-açúcar

Situando agronomicamente a cultura que está sendo estudada neste trabalho, a cana-de-açúcar é classificada botanicamente como pertencente à grande família Poacea do gênero Saccharum e as principais espécies são a officinarum L., a spontaneum L., sinense Roxb., Barberi Jesw., robustum Jesw e edule Hask. É originária da Oceania particularmente da Nova Guiné a conhecida como cana nobre ou tropicais. Graner et al (1973).

Estes autores descrevem como sendo uma planta propagada por meio de pedaços de colmos denominados toletes. Os colmos são formados por nós e entre-nós (meritálo) que na base apresentam uma zona de radículas de onde saem as raízes finas e fibrosas formando um sistema fasciculado muito desenvolvido. O colmo é cilíndrico, grosso e no topo saem as folhas da base dos nós, de forma alternada com bainhas invaginantes com pelos lignificados conhecidos como joçal; podendo ou não apresentar inflorescência do tipo panícula. Existem diversas variedades cultivadas no Brasil fruto do cruzamento híbrido das espécies na busca de variedades resistentes às moléstias e com elevado teor de sacarose armazenados nas células do meritálo. Para Delgado (1985), da planta emprega-se na agroindustrialização os açúcares do meritálo e as fibras do colmo e a existência do "joçal" que dificulta a colheita ncentivou o uso generalizado das queimadas visando a sua eliminação para a colheita manual,

O atual perfil varietal apresenta baixo teor de fibra, principalmente nas mais ricas em açúcar e precoces, força os geneticistas, segundo Stupiello (2001), à procura por fontes alternativas de energia.

## 2.3. O setor produtor de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é produzida no Brasil desde a sua colonização, trazida pelos portugueses e é considerada um dos principais agronegócios brasileiros que na safra 2002/2003 produziu 448 milhões de sacas de 50kg de açúcar e 12,5 bilhões de litros de álcool e, segundo Vieira (2003), é considerado um dos principais produtos que influenciam positivamente na balança de divisas brasileira.

A produtividade média da cultura da cana-de-açúcar em 2002, segundo Vieira (2003), foi de 71,3t/ha no Estado de São Paulo, mostrando que esta matéria-prima energética é muito bem adaptada às condições edafo-climáticas brasileiras.

A cana-de-açúcar produz, além do açúcar e do álcool, uma série de produtos e sub-produtos, segundo Paturau (1982) e Lazzarini (1999). E que além de ser responsável pela produção de diversos produtos e sub-produtos a atividade canavieira gera muitos postos de trabalho, principalmente no campo e para pessoas menos qualificadas que tem dificuldade de arranjar trabalho que exige maior grau de capacitação, com quem também concorda Vieira (2003).

Inicialmente, na época colonial o corte da cana-de-açúcar era realizado pelos escravos, e para aumentar o rendimento do corte foi introduzido o uso do fogo como forma de despalha e eliminação do joçal, porém esta prática traz o inconveniente agrícola de reduzir a quantidade de matéria orgânica e o ressecamento do solo e piora a qualidade tecnológica industrial, de acordo com Graner (1973).

No início do Proálcool - Programa Nacional do Álcool, começou a ser introduzido o corte manual após a queimada da lavoura como forma de aumentar o rendimento do trabalhador de acordo com Delgado (1985).

Com os problemas surgidos em Guariba-SP, nos anos 70, onde os cortadores de cana realizaram greves na busca de melhores condições de trabalho igualando direitos iguais aos da cidade e que cortavam manualmente a cana-de-açúcar queimada, começou o setor a empregar máquinas para o corte mecânico da lavoura, podendo ser queimada ou crua. A introdução do corte mecânico se deu pelo Estado de São Paulo em escala comercial em 1973, seguido do Estado de Alagoas, segundo Ripoli (1977).

Este autor comenta que o corte mecânico é crescente no setor canavieiro e que no Estado de São Paulo e na safra 1990/2000 operavam 390 unidades. Na safra 2001/2002 a quantidade subiu para 508 respondendo pela mecanização de 30 a 35% das lavouras paulista, porém a declividade do terreno tem sido a principal restrição à introdução desta sistemática de corte.

O aumento do corte mecânico e a limpeza na lavoura da cana-de-açúcar provoca maior uso de diesel no sistema para movimentar as máquinas e equipamentos. Para Silva (1996), uma destilaria de capacidade de produção de 150.000 litros de álcool por dia

consome 1.695.000 litros por ano o que equivale à 10.660 barris de óleo diesel ou 35.534 barris de petróleo por ano. Neste sentido, todos os esforços que forem possíveis de serem executados com a finalidade de reduzir o consumo será vantajoso, pois a relação etanol/diesel é de 13,3:1,

A prática da queimada dos canaviais cresceu segundo Delgado (1985) e se constituiu uma prática consagrada para o aumento do rendimento de corte até que os problemas ambientais e de saúde começaram a incomodar os habitantes dos municípios canavieiros.

Aliado aos problemas dos habitantes, iniciou-se em 1972, em Estocolmo, a conscientização dos problemas ambientais com as recomendações da Agenda 21 que condenava a prática agrícola das queimadas ONU (1972).

Legislações surgiram em 1988 regulamentando a prática das queimadas como operação de pré-colheita e Ripoli & Paranhos (1987) começaram a discutir o assunto e recomendando a eliminação desta prática por questões ambientais, de saúde e principalmente por estar perdendo a energia contida nesta parte da cultura que era queimada.

No Estado de São Paulo, existe a Lei no. 10.547, de 02 de maio de 2000, que foi regulamentada pelo Decreto no. 45.869 de 22 de junho de 2001, definindo os procedimentos e as proibições e também estabelecendo regras e medidas de preocupação quanto ao uso da pré-operação de queimada dos canaviais e recentemente modificada pela Lei no.11.241 de 19 de setembro de 2002.

De acordo com a reportagem da revista Alcoolbrás (2003) a ONU - Organização das Nações Unidas reconheceu a cogeração de energia elétrica através da queima de bagaço da cana-de-açúcar como um exemplo de energia limpa e renovável e que o aquecimento global oriundo da emissão de gases causadores do efeito estufa vem gerando preocupações mundiais e que em breve alguns países poluidores terão que comprar o direito de poluir, através do crédito de carbono e isso irá estimular as unidades sucroalcooleiras a aumentar a sua capacidade de geração de energia.

## **2.4. A operação de pré-colheita utilizando a queima da lavoura, o ambiente e a saúde**

Delgado (1985), estudando os aspectos tecnológicos da cultura canavieira determinou pontos favoráveis e desfavoráveis deste sistema de queimada como operação de pré-colheita. Outros autores, o Centro de Tecnologia da Copersucar (1986), Copersucar (1998), Copersucar (2001a), Copersucar (2001b) e pesquisadores do Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar – PLANALSUCAR, também estudaram o assunto que sempre foi muito controvertido e chegaram às mesmas conclusões básicas de Delgado (1985).

Par este autor a prática da queimada cresceu no início do Proálcool para aumentar o desempenho de corte, principalmente o manual e baratear a colheita. Embora esta prática diminuísse o potencial de matéria orgânica no solo e destruísse os inimigos naturais das pragas da lavoura, facilitava a operação de manejo agrícola do solo para o plantio e aumentava o teor de cinza do solo. Porém, a queimada dificultava a conservação e a purificação do caldo para a fabricação do açúcar, aumentava o brix aparente dos colmos de cana queimada, bem como do teor de fibra, causado pela desidratação provocada pelas exudações oriundas das queimadas. Estas exudações facilitavam o crescimento microbiano e a aderência de terra nos colmos, por ocasião da formação dos eitos de colheita, levando mais matérias estranhas para a indústria e solubilizando as ceras da casca dos colmos. A adoção da sistemática da limpeza, pela lavagem dos colmos da cana-de-açúcar com água na indústria para diminuir as matérias estranhas, que produzem corrosão de equipamentos, tubulações e bombas de recalque e como consequência exigem o tratamento da água de lavagem que produz problemas de ordem ambiental por exigir maior quantidade de demanda biológica de oxigênio para tratar este resíduo. Porém, esta queimada da pré-operação de colheita, segundo os estudos, causava perdas de cerca de 30% da matéria bruta. Este material poderia ser queimado na caldeira para a geração de vapor e ser aproveitada como fonte alternativa de energia tendo como matéria prima a biomassa da cana-de-açúcar.

Kirchhoff et al (1991) comenta que os gases resultantes das queimadas da cana-de-açúcar causam efeitos negativos à saúde pois o monóxido de carbono combina-se com a hemoglobina do sangue, diminuindo a capacidade de oxigenação dos tecidos animais e afeta a camada de ozônio. Complementa ainda, que no período de safra canavieira o teor de ozônio aumenta de 30ppb – parte por bilhão, para 80ppb e que a média brasileira varia de 20 a 40ppb.

Depois vieram os estudos de Franco (1992) que chegou à conclusão que não é só a cultura da cana-de-açúcar a causadora dos problemas ambientais devido a prática das queimadas, mas que o problema é agravante por causa desta cultura porque a safra ocorre em períodos longos em grandes extensões de áreas concentradas e isto vem causar danos à saúde das populações por deteriorar a qualidade do ar. Para Bohm (1998), as queimadas além de causar problemas de saúde causam irritações nervosas de cunho emocional por causa do carvãozinho e Silva & Froes (1998) afirmam que além dos problemas ambientais os gases emanados da queima dos canaviais contem 40 tipos de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAS) e apresentam propriedades cancerígenas às populações que vivem nestes ambientes próximos.

Recentemente os estudos de Cançado (2003) mostraram que os gases resultantes da queima dos canaviais agem sobre a hemoglobina do sangue reduzindo sua capacidade de ação e conseqüentemente o ser humano fica mais propenso a ficar doente incrementando os gastos com a saúde pública nas regiões canavieiras.

Entretanto, Lazzarini (1999) comenta que em Cuba emprega-se a limpeza mecânica da cana-de-açúcar proveniente do corte integral sem queima em estações de recepção e limpeza denominadas centros de "acópio", (figura 08) onde fortes correntes de ar separam as frações resultantes em um resíduo de matérias estranhas da ordem de 51kg por tonelada de cana processada e comenta ainda que estão instaladas mais de 900 estações deste tipo.



Figura 8: Fotos com detalhes de um sistema de limpeza a seco de colmos de cana-de-açúcar, implantada no Brasil. Fotos Techpetersen (2003).

Segundo Lazzarini (1999) esta tecnologia permite eliminar a operação da queima do canavial como operação de pré-colheita evitando todos os males ambientais e de saúde provocados por esta operação.

Os artigos de Ripoli et al (1991a) e Ripoli et al (1991b) mostram ser um desperdício a não utilização do palhiço na geração de energia alternativa e que o potencial de energia contida na biomassa resultante da cultura da cana-de-açúcar é muito importante para a cogeração, agregando valor ao agronegócio sucroalcooleiro. Mostram que a operação de queima do canavial para a colheita é desastrosa para o meio ambiente e para a saúde indo de encontro às recomendações do Protocolo de Kyoto e mostram também que é possível colher a cana-de-açúcar sem a queima. Além disso, que é possível se aproveitar da energia dos resíduos vegetais, no caso do "palhiço", na geração de energia alternativa renovável.

## **2.5. A lavoura de cana-de-açúcar e os resíduos da pós-colheita**

Orlando Filho et al (1998) afirma que a maior cobertura vegetal proporciona uma maior capacidade de retenção de água e conseqüentemente da umidade que é responsável pelas propriedades físicas, químicas e biológicas. Estudos realizados por este autor mostram que a adição da matéria orgânica no solo promove a formação e a estabilização dos constituintes do solo melhorando as suas características físicas e químicas em função de facilitar a aeração, infiltração de água e sua retenção.

Entretanto, apesar das vantagens e benefícios relatados sobre os benefícios da matéria orgânica no solo, Carvalho (1996) comenta que o excesso da palha deixada no campo após a colheita dificulta os tratos culturais com conseqüências negativas na produtividade da rebrota e de soqueiras, mas que no final não interfere no número de colmos finais na lavoura.

O mesmo comenta Andrade, (1999) que o aumento de resíduos da colheita no campo independentemente da pré operação de queimada dos canaviais causam perdas na produtividade da soqueira e efeitos na incidência de plantas infestantes.

Luca (2002) estudando os atributos da matéria orgânica e os atributos do solo em sistema de colheita com e sem queimada concluiu que em curto período de suspensão da operação de queimada da cana-de-açúcar, quatro a cinco anos, resultará na melhoria da

qualidade do solo, como conteúdo da matéria orgânica do solo, estruturação e fertilidade química.

Para Medeiros (2001) o manejo das plantas daninhas e o dinâmico banco de sementes são influenciados pelo teor de palha resultante da colheita mecânica da cultura da cana-de-açúcar sem queima e que experimentos de duração de cinco anos mostraram que as áreas de cana crua apresentaram a menor necessidade de aplicação de herbicidas pré-emergentes para controle das plantas daninhas.

Molina (1991) realizou estudos obtendo resultados positivos com o recolhimento do palhiço por enfardadeira cilíndrica adaptada à cultura da cana-de-açúcar para fins de geração de energia em complementação ao bagaço e concluiu ser atrativo economicamente, pois a biomassa descartada com a queima equivaleria a um terço do peso dos colmos industrializáveis.

Estudos realizados por Ripoli (1996) mostraram que nesta época o Estado de São Paulo tinha 55% de sua cana-de-açúcar colhida mecanicamente e que se fosse considerada a quantidade de palhiço resultante desta colheita haveria a economia de 25% da energia em petróleo que o Brasil importou em 1994. Há de destacar que a área plantada neste ano foi de 2.200.000ha no Estado e que o palhiço representava 50% do resíduo da colheita.

Neste trabalho de Ripoli (1996) deixa claro que palhiço é formado pela fração da cana-de-açúcar constituída por folhas verdes, ponteiros e palha e que passou a partir deste estudo a ser empregado como uma nova palavra para o setor canavieiro, diferente de palha e fibra da cana que confunde muitas pessoas na contabilização de dados sobre a quantificação de energia contida nesta biomassa.

Estudos anteriores realizados por Ripoli e Villa Nova (1992), quantificaram os resíduos da pós-colheita da cana mecânica e crua constituída por folhas, pontas e palha que eram da ordem de 32% em média e que isto era um desperdício de energia para o Brasil.

Tillmann (1994) considera excessivamente prejudicial a queima do canavial sobre a qualidade de vida, os aspectos ambientais e energéticos e que apesar do aumento dos custos operacionais do corte de cana crua a possibilidade do uso de resíduos na produção de energia é vantajoso. Avaliou o desempenho do corte com equipamentos semi-mecanizados com cana-de-açúcar com e sem queima concluindo que apesar da perda de eficiência da

colheita nos canaviais não queimado o uso da biomassa, ou seja o palhiço, com o aproveitamento energético disponível evidenciava benefícios ambientais.

Outros estudos realizados por Ripoli (1995) mostraram que o manejo operacional da máquina de corte de cana crua influenciam a quantidade do resíduo da colheita e que a operação em canas eretas mesmo quando cortada manualmente tem efeito sobre o rendimento operacional e a qualidade do resíduo deixado pós-colheita.

Anos depois, Ripoli (2002) mostrou que este resíduo do corte mecânico, o palhiço, dependendo de condições de campo produz uma biomassa com poder calorífico equivalente à madeira e superior ao bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar e que isto poderia agregar valor ao setor.

Estudos desenvolvidos por Torrezan (2003) avaliaram o desempenho operacional das operações de enleiramento e enfardamento prismático do palhiço da cana-de-açúcar colhida mecanicamente e sem a pré-operação de queima em cultura com produtividade de 78t/ha e a composição do palhiço analisado mostrou índices médios de 68,93% de folhas, 21,44% de colmos, 2,27% de ponteiros e 6,36% de matérias estranhas totais. Este material apresentou valores médios de PCS – Poder Calorífico Superior de 18,43MJ.kg<sup>-1</sup> e de PCI – Poder Calorífico Inferior de 17,00MJ.kg<sup>-1</sup> e se mostrou altamente eficiente o recolhimento do palhiço com um consumo de combustível de 0,18 litros por tonelada resultando em um balanço energético positivo de 99,95%.

Estudando os resíduos da colheita mecânica e crua Abramo Filho et al (1993) encontraram uma camada de 8 a 10cm de espessura nas áreas após a colheita e medindo a temperatura do solo encontraram valores de 5°C abaixo da temperatura ambiente e constataram que a variação da quantidade de resíduo era dependente das condições de operação da colhedora de cana-de-açúcar.

Orlando Filho et al (1998) comenta que o resíduo da colheita mecânica produz uma camada de 8 a 10cm de espessura sobre a área colhida e que se este material fosse levado para a indústria poderia gerar perdas e aumentaria o peso a ser transportado da ordem de 15 a 30%.

Sartori (2001) comenta que o resíduo da colheita constituinte do palhiço ainda é pouco explorado no Brasil e ainda se queima a cana-de-açúcar para facilitar a colheita manual e que a camada de resíduo pós-colheita representa uma fonte de biomassa com valores na

faixa de 6t/ha a 22,8t/ha dependendo da variedade plantada e que para Ripoli (1998) representa uma média de 10t/ha de massa vegetal enquanto Abramo Filho et al, (1993) encontraram uma quantidade de biomassa de resíduos de colheita de cana não queimada de 15t/ha e Campos & Marconato (1994) 15,6t/ha.

As pesquisas desenvolvidas pela ESALQ/USP, Copersucar e Unicamp nos últimos dez anos de acordo com Ripoli (2003) apresentam valores médios da ordem de 4 a 12 toneladas de palhicho por hectare expresso em matéria seca e que as variações que ocorrem são devidas às condições agronômicas de cultivo e das condições edafo-climáticas da região mas que em termos médios o valor energético do palhicho é na faixa de 1,1 a 2,2 Equivalentes de Barris de Petróleo o que torna de vital importância o uso desta biomassa como fonte alternativa de geração de energia elétrica tornando vantajoso o aproveitamento do palhicho e de se colher a cana crua.

Para Lazzarini (1999) a produção do setor açucareiro é capaz de produzir grande quantidade de matéria orgânica que pode ser empregada como energia e a principal dificuldade do aproveitamento está no recolhimento deste resíduo, pois mesmo no caso do corte mecânico resta no solo de 11 a 12t/ha, e que Cuba instalou mais de 900 centros de limpeza mecânica por ventilação forçada para separar as frações cuja quantidade é de cerca de 51kg/t de cana processada de resíduos. Para se ter uma idéia da capacidade destes centros de limpeza comenta que um deles processa 680t/dia de cana.

## **2.6. Matriz energética brasileira**

No Brasil, destaca-se como matriz energética, o petróleo com cerca de 35% da energia total consumida, sendo que deste total 15% é utilizado pelo setor industrial (Brasil, 1984).

Existe uma corrente mundial que procura meios alternativos menos poluidores para substituir as fontes energéticas de origem fóssil, considerada altamente poluidora e assim, a utilização de biomassa passa a ser uma das alternativas que no país representa cerca de 19% do consumo nacional dos quais, 47% são empregados pelas indústrias brasileiras Brasil, (1984).

Há que se destacar que a cultura da cana-de-açúcar, segundo Sartori (2001) é uma das alternativas de grande potencial, pois possibilita produzir uma biomassa residual estimada em 25 milhões de toneladas por ano, para o Estado de São Paulo.

Ripoli (2002) comenta que a origem da energia de um canavial de área de 1ha permite produzir 39% de palhiço, 24% de etanol e 37% de bagaço e que em comparação com os custos de geração de energia elétrica no mundo expresso em US\$/MWh as usinas hidroelétricas custam de US\$ 25 a 30, as que empregam resíduos ultraviscoso de US\$ 30 a 50, as usinas com reatores nucleares de US\$ 60 a 100 e as que empregam o carvão de US\$45 a 70 e que além disso os custos para a geração de um posto de emprego nas unidades industriais do setor petroquímico são da ordem de US\$ 220.000, no setor automobilístico US\$ 91.000 e no setor sucroalcooleiro de US\$11.000. Os combustíveis gasosos e líquidos derivados de biomassa podem substituir em parte os derivados de petróleo.

Segundo Doat (1977) o poder calorífico é a quantidade de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa desse corpo expressa em cal/g ou Kcal/kg podendo ser representadas pelo poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU). O PCS é dito quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada durante a combustão é condensada. No PCI a combustão é efetuada a pressão constante excluindo-se a água condensada.

De acordo com Sartori (2001) a maioria dos sistemas que emprega biomassa como fonte de energia não seca o material a 0% de umidade e assim o melhor sistema para se expressar o poder calorífico do palhiço é o PCU – Poder Calorífico Útil, que é derivado do PCI, e calculado pela fórmula  $PCU = PCI (1-u)-600u$ .

Zulauf et al (1985), determinaram o teor de umidade, a porcentagem de hidrogênio, o PCS e PCI das folhas da cana-de-açúcar de algumas variedades e chegaram aos seguintes resultados que são apresentados na tabela 1:

Tabela 1: Poder calorífico superior – PCS e poder calorífico inferior – PCI das folhas de cana-de-açúcar

| Região         | Variedades | Umidade<br>(%) | Hidrogênio<br>(%) | PCS<br>(kcal/kg) | PCI<br>(kcal/kg) |
|----------------|------------|----------------|-------------------|------------------|------------------|
| Bauru          | SP 701143  | 21,3           | 5,0               | 4315             | 3073             |
| Araraquara     | NA 5679    | 9,1            | 4,0               | 4181             | 3563             |
| Campinas       | CP 5122    | 11,3           | 4,0               | 4098             | 3389             |
| Ribeirão Preto | SP701143   | 8,0            | 4,0               | 4096             | 3534             |
| Piracicaba     | NA 5679    | 18,6           | 3,4               | 3979             | 2992             |

Fonte: Zulauf (1985).

O bagaço produz cerca de 30kWh/t de cana-de-açúcar podendo com a utilização de novas tecnologias de cogeração chegar à produção de 140kWh/t (Cogeração. 1997) e que de acordo com Biagi Filho (1999) possibilita receber até R\$ 80,00 o MW quando comercializada pela usina para as companhias de energia do Estado de São Paulo.

Para Coelho (1999) a biomassa é importante para a cogeração de energia elétrica nas usinas e destilarias possibilitando aproveitar o potencial existente no Estado de São Paulo.

A utilização desta biomassa residual de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo permitiria a recuperação final de 34,8% da energia disponível na cultura podendo alcançar 60% gerando desta forma de 12 a 33 milhões de MWh no Estado e de 22 a 60MWh no Brasil Ribeiro Pinto. (1992) .

Algumas unidades industriais sucroalcooleiras do Estado de São Paulo segundo a Alcoobrás (2003), já estão se preparando para o fornecimento do excedente de energia da cogeração para a rede pública podendo ser destacadas a Usina São Francisco e Santo Antonio do grupo Balbo de Sertãozinho-SP, que constituem a empresa Bioenergia Cogeneradora S/A que juntas produzem 31MW e fornecem para a CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz 63% desta energia e devem receber o certificado da ONU para comercializar os créditos ambientais. Outro exemplo é o da Companhia Energética Santa Elisa, em Sertãozinho-SP, que já está certificada para comercializar os créditos de carbono e está operando uma termoeletrica de 60MW das quais 50% será fornecido para a rede pública. Além destas existe a Usina Guarani de Olímpia-SP que gera 22,5MW/h dos quais 12,5MW/h são comercializados para a CPFL. O

mesmo ocorre com o Grupo Andrade de Colina - SP que começou a operar a Companhia Energética São José que na fase inicial irá produzir 15MW/h dos quais 11MW/h serão fornecidos à CPFL e na segunda fase aumentará para 24MW/h o que permitirá com energia alternativa e renovável atender um município de 75 mil residências mensalmente. Outra unidade industrial a produzir energia elétrica excedente para comercialização é a Companhia Açucareira Vale do Rosário que aumentou a sua planta de cogeração de 51MW para 101MW. Outros estados também estão participando do plano de ampliação de sua capacidade de cogeração para evitar que se repita a crise de 2001 que exigiu o racionamento de energia no Brasil. Assim a Usina Jalles Machado de Goianésia-GO está operando uma termoelétrica de 30MW/h. Em Alagoas as dez usinas existentes produzem energia para uso próprio e comercializam o excedente para a Companhia Energética de Alagoas - CEAL, mediante contratos, destacando-se que o nordeste não comporta mais novas hidroelétricas e a biomassa para ser uma alternativa o que inclui o bagaço.

Para Ripoli & Molina Jr. et al (1991) 34,88% da energia contida em um hectare de canavial é representado pelo material residual constituído pelos ponteiros, folhas, palhas e frações do colmo, e que corresponde a 97.863,76MJ de equivalente energético de petróleo e que os custos de transporte deste material do campo para a unidade industrial é irrelevante, custando em média 1,4% da energia contida no mesmo material. Ripoli (1991).

Zulauf et al (1985) estimam um desperdício de até 87.720Gcal/ano por safra de energia perdida pelo não aproveitamento desta biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar o que equivaleria à importação de 342.000 barris de petróleo e uma economia de US\$ 1.465.109.

Koblitz (2004) informa que o Ministério de Minas e Energia do Brasil está buscando um novo modelo da matriz energética prevendo-se para o ano de 2004 vigorar uma matriz que contempla a inclusão do gás natural e a biomassa destacando que o setor sucroalcooleiro terá uma importância maior que a atual com o uso do bagaço. que o Proinfa concluiu a contratação de fontes de energia renovável de três fontes sendo a eólica contemplada com 1.100MW, a hídrica com 1.100MW e a biomassa somente 200MW dos 1.100 previstos. Comenta ainda que o potencial de geração de energia por meio de biomassa é 15 vezes maior que o lícitado.

Segundo Koblitz (2004) falta interesse por parte dos investidores em fontes oriundas de biomassa e conclui que esta falta de interesse está na tarifa ofertada para a biomassa tornando o negócio não atrativo já que as condições de financiamento não são interessantes. Cita ainda que a energia eólica é 100% mais cara que a biomassa e isso acarretará prejuízos à sociedade brasileira considerando os motivos que a biomassa nacional, não é nova e é originária principalmente de resíduos agrícolas da indústria sucroalcooleira, da madeira e do beneficiamento do arroz e que descartados na natureza causa impactos ambientais. Além disso, existe tecnologia na fabricação de equipamentos e materiais empregados na construção de termelétricas não necessitando importar o mesmo ocorrendo com a hidráulica. Porém não é o que ocorre com a energia de fonte eólica que exige infraestrutura de distribuição e importação de equipamentos. Pede que o Ministério das Minas e Energia do Brasil, responsável pela determinação dos valores econômicos das fontes de energia que faça uma reflexão e reveja os valores e sugere valores de pagamento da energia em Mwh na razão de R\$110,00 contra os atuais R\$93,77 para a cana-de-açúcar com base em março de 2004.

## **2.7. A tecnologia de geração de vapor, combustível e rendimentos**

Lazzarini (1999) comenta que no Século XIX que começou a ser utilizada a máquina a vapor no setor açucareiro empregando-se o bagaço como fonte de energia e que deveria, por concepção, ser totalmente consumido pelos fornos. O aproveitamento do calor desta combustão era de baixa pressão (1000kPa) e flutuava entre 50 a 60% e o uso de vapor pela fábrica correspondia a 50 a 55% do peso da cana processada. Comenta ainda que atualmente as caldeiras utilizadas empregam pressões de médias de (800kPa) e altas de (3.000kPa) com eficiência de 85% e que as exigências da indústria com esquemas de múltiplos usos, permitem reduzir o consumo em até 30% do peso da cana processada, assumindo neste conjunto a importância da lata conversão de energia térmica em elétrica para atender as necessidades do complexo industrial, destacando-se os centros de recepção e benefício de cana, pois na essência a usina é produtora de fibras e de açúcares. Que o teor calorífico do bagaço, com 50% de umidade, é de 1.825kcal/kg e que as reservas de energia que o processo tem quanto a possíveis excedentes de bagaço são de cerca de 50% quando se

faz um desenho ótimo para esses fins de produção de açúcar, enquanto que quando se otimiza para a cogeração os valores podem chegar a 100kWh/t de cana.

Para Lazzarini (1999) o uso do vapor na fabricação de açúcar utiliza entre 4,0 a 7,0kg de vapor por kg de açúcar produzido dependendo do processo tecnológico adotado e devido às instalações deficientes e desenhos técnicos e de operação as perdas chegam a 50%. A eficiência, se define como o calor liberado pelo combustível menos as perdas; esta diferença se expressa como um percentual do calor liberado sobre a base do valor calorífico baixo ou alto do combustível e as principais perdas nas eficiências das caldeiras são de calor sensível dos gases da chaminé, por irradiação e por convecção. Além disso, informa que as perdas no forno, ou por combustão incompleta, são causados provocados por arraste de partículas não queimadas ou pelo grau do avanço da reação de formação do CO<sub>2</sub>, influenciadas ambas pelas características aerodinâmicas das instalações e pelo excesso de ar e a tecnologia desenvolvida nos últimos anos neste setor da caldeira tem permitido aumentar a eficiência.

Segundo Lazzarini (1999), existem condições técnicas para trabalhar de forma eficiente e segura em instalações de cogeração de vapor com temperaturas de 450°C, sob pressão da ordem de 80 atmosferas (80kg/cm<sup>2</sup>) permitindo uma transformação energética de 120KWh por tonelada de cana independentemente do aproveitamento que se possa fazer do processo. O emprego de turbinas de extração-condensação é uma das soluções tecnológicas de poupança de bagaço e de geração de energia elétrica com aproveitamento do condensado no processamento industrial.

O mesmo informa Koblitz (2004) que o Brasil dispões de tecnologia de produção de material e de equipamentos, (figura 9), para a cogeração de alta eficiência de transformação com base em fontes renováveis de energia como é o caso da biomassa da cana-de-açúcar.

Para Peres (1978) o vapor é aplicado no aquecimento de qualquer sistema ou processo, transmitindo nos do tipo saturado e de baixa pressão o seu "calor latente" voltando ao estado líquido guardando o seu "calor líquido", na qualidade de água condensada. Pode ainda ser empregado para trabalhos mecânicos como veículo de geração de força e a sua melhor forma é do tipo superaquecido devido a sua grande capacidade de expansão e baixo peso específico e seu emprego industrial é em máquinas térmicas como as turbinas a vapor que transformam a energia térmica do vapor em movimento mecânico axial possibilitando

acionar outros sistemas como os geradores de energia elétrica. Este vapor, depois de utilizado pode ainda ser empregado no aquecimento e é denominado vapor de escape ou de contra-pressão. E também comenta que a determinação do rendimento, de uma caldeira, pode ser obtido pelo método direto ou indireto. No método direto é preciso se obter os dados sobre a quantidade de vapor = Q, a quantidade de combustível consumido em kg/h = q, a temperatura da água de alimentação = °C e ainda com o uso das tabelas empregando-se a pressão de operação e a temperatura do vapor obter a entalpia do vapor em kcal/kg = i. Com estes valores é possível determinar o rendimento dado por R aplicando a fórmula:  $R = Qv(i - t) / q \cdot \text{PCI}$  – Poder Calorífico Inferior em %. No método indireto o rendimento da caldeira é obtido calculando-se as perdas da carga térmica da fornalha, indicada pela quantidade de calor obtida na queima. Comenta que se utiliza diversos tipos de combustíveis e que são materiais orgânicos, constituídos em sua grande parte por compostos de carbono suscetíveis de queimar e produzir em condições de ser utilizado eficientemente e que são classificados pelos seus estados físicos em sólidos, líquidos e gasosos. No caso dos combustíveis sólidos informa que o Brasil utiliza diversos tipos que apresentam em média um poder calorífico característico da região destacando-se o carvão (6.340kcal/kg a 4.750kcal/kg), a turfa (3.470kcal/kg a 2.520kcal/kg), a lenha (4.115kcal/kg a 3.300kcal/kg) e resíduos como o bagaço de cana (1.800kcal/kg), serragem (2.000kcal/kg), cavacos (2.500kcal/kg), casca de arroz (3.300kcal/kg), palha de trigo (3.200kcal/kg), palha de amendoim (3.100kcal/kg). No caso dos combustíveis líquidos a base é o petróleo bruto sendo os mais comuns o óleo combustível do tipo APF (alto ponto de fluidez) com 10.815kcal/kg, BPF (baixo ponto de fluidez) com 10.100kcal/kg, ATE (alto ponto de enxofre) BTE (baixo teor de enxofre), óleo diesel com 11.064kcal/kg, Querosene com 11.200kcal/kg, óleo "stanship" e misturas com 11.200kcal/kg, e o óleo de xisto betuminoso.

Peres (1978) informa que em caldeiras de câmara alta e de alta pressão, (figura 9) não se utiliza de grelha o combustível deve estar em tamanho de particulados que permita insuflá-los como se fosse combustível líquido e que a reação química que libera calor na combustão. A combustão completa é quando a quantidade de combustível queima na sua totalidade. O hidrogênio livre se combina diretamente com o carbono para formar hidrocarbonetos  $\text{CH}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_2$  os quais são inflamáveis e queimam com o oxigênio  $\text{O}_2$  do ar formando  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Para que a combustão seja completa deve-se ter nos gases resultantes a

seguinte composição:  $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\%$  e como  $\text{N}_2$  representa 79% dos gases  $\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 21\%$  mais ou menos e que para o caso dos combustíveis sólidos pode-se adotar a aproximação par 19%. Quando a combustão é incompleta o combustível se perde por não realizar a reação e os gases não queimados escapam contendo monóxido de carbono - CO e hidrocarbonetos -  $\text{CH}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_2$  caracterizados pela fumaça escura e acúmulo de fuligem nas chaminés. O calor calorífico de um combustível é a quantidade de calor depreendido pela unidade de massa ou volume quando realiza a combustão completa indicada pela expressão kcal/kg ou kcal/m<sup>3</sup> N.

O bagaço utilizado para a geração de vapor de acordo com Paturau (1982) varia em função do tipo de caldeira dotada e conseqüentemente no consumo para a produção de açúcar. Nas indústrias antigas, a necessidade é na faixa de 500 a 550kg de vapor por tonelada de cana. Já nas indústrias modernas, (figura 9) que empregam baixa e média pressão, nas caldeiras, o consumo é na faixa de 450 a 500kg de vapor, por tonelada de cana, nas que empregam média e alta pressão o consumo passa para 400 a 450kg por tonelada de cana. Uma economia que permite o uso do excedente para outras finalidades sendo uma delas a cogeração para comercialização da energia elétrica para as concessionárias privadas.



Figura 9: Foto de duas caldeiras de alta pressão 65kg/cm<sup>2</sup> com o sistema de alimentação de bagaço da câmara de queima de leito fluidizado e das esteiras de distribuição do bagaço operando com pá carregadora. Usina Santa Adélia. Foto Carleto 2004.

Quanto à densidade do bagaço, Paturau (1982) considera que solto apresenta-se com 160kg/m<sup>3</sup> e quando em fardos grandes na faixa de 550kg/m<sup>3</sup> e nos fardos pequenos ao redor de 890kg/m<sup>3</sup>.

A tecnologia tradicional utilizada na cogeração das usinas e destilarias brasileiras para uso próprio, emprega processos com equipamento de caldeiras de média pressão com 20 kgf/cm<sup>2</sup> e turbinas de modelo de contra-pressão, que são utilizadas apenas nos períodos de safra. Para o uso como unidades de geração de energia termoelétrica, que operam 365 dias por ano o processo exige caldeiras de alta pressão como as do tipo apresentados na figura 9 e turbinas de condensação de alta pressão e alta temperatura, (65 bar/520°C ou ainda 86 bar/540°C), que pode ser fornecida pelo mercado nacional. de acordo com Alcoobrás (2003).

Estes autores, Peres (1978), Lazzarini (1999), Koblitz (2004), são unânimes em afirmar que o uso do bagaço na geração de energia térmica e elétrica no setor sucroalcooleiro é normal há muitos anos. Porém, mostram que o balanço energético e a eficiência empregada nas tecnologias implantadas nas unidades industriais brasileiras são projetadas para não deixar sobrar bagaço no final do processamento, pois não teriam como aproveitá-lo apesar de existir tecnologia de geração de vapor de alta eficiência devido a falta de garantia de retorno do capital investido por prazo razoável pela comercialização da energia elétrica.

Para Alcoobrás ((2003) com a possibilidade atual de comercialização da energia elétrica para as redes públicas a situação se apresenta diferentemente possibilitando alteração tecnológica das unidades industriais com vistas à otimização energética para um balanço de maior lucratividade.

## **2.8. Energia da biomassa**

Como pode ser notado nos comentários dos diversos autores retro mencionados, que os combustíveis são constituídos por fontes de carbono de origem fóssil ou vegetal e que de acordo com Stout (1984) a fonte de biomassa para geração de energia alternativa é todo o tipo de matéria orgânica que não provem de combustíveis fósseis.

Assim, os diversos resíduos apresentados como fontes de energia que provem de resíduos agrícolas podem ser caracterizados com combustíveis de biomassa destacando-se a serragem de madeiras, os restos de culturas de trigo, amendoim, arroz e cana-de-açúcar, cavacos de madeiras conforme explicitado por Peres (1978), podendo se constituir em um sistema ideal de desenvolvimento auto-sustentável integrando o meio ambiente e o ser humano conforme preconizado pelas recomendações da Agenda 21, ONU (1992).

De acordo com Rípoli et al (2000), o montante de energia contida no resíduo da colheita é significativo e constitui um material para a produção de energia elétrica. As análises laboratoriais e as determinações por equações forneceram quantidades médias de palhiço, em PCS – Poder Calorífico Superior e PCI- Poder Calorífico Inferior, remanescente em t/ha da ordem de: 13,51 (CC-I - Cana crua I), 8,09 9 (CQ-I – Cana queimada I) e 24,32 (CC-II – Cana crua) e 10,25 (CQ-II - Cana queimada). Tais massas de acordo com Furlani Neto et al, (1997) representam respectivamente os PCS – Poder Calorífico Superior (Mcal/t) de 4.365 (CC-I Cana crua), 4.430 (CQ-I- Cana queimada) e 4.460 (CC-II- Cana crua), 4.485 (CQ-II - Cana queimada) (CQ = com queima prévia e CC = sem queima prévia) permitindo concluir que é marcante a quantidade de energia disponível no palhiço e se forem transformados em barris equivalentes de petróleo (EBP) se obtêm o valor de 0,76 EBP/ha que está sendo desperdiçado nos canaviais.

Entretanto, Furlani Neto et al (1996), comentam que a colheita da cana-de-açúcar sem a queima reduz a capacidade das colhedoras em cerca de 15,60%, mas que a qualidade tecnológica da matéria-prima sem queima foi superior em brix, pol e fibra o que representa um acréscimo de 0,54% na qualidade de PCC – Pol da cana corrigida, ou seja, 601,4kg de pol por hectare.

Para Brito (1986) a biomassa pode ser um componente energético ideal para o desenvolvimento sustentável das civilizações da América Latina e do Brasil e para tal deve-se definir uma opção bastante clara para o desenvolvimento de tecnologias e políticas públicas na busca da autonomia energética com base na energia alternativa e renovável como é o caso do álcool etílico, dos óleos vegetais e da biomassa florestal conhecidos como combustíveis verdes que utilizam a tecnologia verde, não poluente e renovável de acordo com Peres (2001).

Perrone (1977) informa que a biomassa é uma fonte não finita como é o caso dos combustíveis fósseis - Petróleo e carvão, pois pode ser produzida principalmente nos países de clima tropical que dispõe de sol para a realização do processo de fotossíntese que produz os açúcares como é o caso do Brasil, permitindo utilizar resíduos de diversas culturas.

Molina Jr. et al (1995) verificou que o potencial de energia calorífica contida no palhiço dos canaviais após a colheita e desperdiçada pela queimada da operação de pré-colheita em canaviais de segundo e terceiro corte da variedade SP706163 representa no momento da colheita de uma massa de 33,85 com variação de 9,83 para mais ou para menos

de toneladas por hectare e o poder calorífico PCI – Poder Calorífico Inferior correspondente é da ordem de 3.982,57 variando 796,97 para mais ou para menos de kcal/kg o que equivale em energia à 19.202,52 litros de etanol ou 7.626,53 litros de óleo diesel, o que torna interessante a sua utilização como fonte geradora de calor.

Rosa (1977) citado por Ripoli (1977) comenta que a capacidade fotossintética da cana-de-açúcar segundo é de 1,6% da energia solar incidente sobre a cultura é transformada em energia química.

Para Leite & Pinto (1983) do resultado do esmagamento de uma tonelada de colmos pode-se obter 250 kg de bagaço com 50% de umidade e com poder calorífico inferior (PCI) de 1.790kcal/kg e a 20% de umidade o poder calorífico inferior (PCI) sobe para 3.244 kcal/kg. Já a Copersucar (1986) emprega os valores de 260kg de bagaço por tonelada de cana com 50% de umidade. Esta variação pode ser resultado da variedade de cana-de-açúcar utilizada na indústria, porém nota-se que a umidade do bagaço resultante da extração por moenda é comum, com valor de 50%.

A disponibilidade de biomassa nas diferentes regiões é defendida por Lanças (1984) como uma das vantagens de empregar biomassa como fonte de energia renovável e não poluidora em larga escala contribuindo para melhoria ambiental.

Estudos realizados no Hawai pela - Hawaiian Sugar Planters Association (1987), com diferentes resíduos de biomassa originários da cultura da cana-de-açúcar permitiram conhecer o poder calorífico em função da umidade dos resíduos estocados durante 3 meses apresentados no tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Poder calorífico e umidade de diferentes resíduos canavieiros estocados.

| Tratamento/resíduo          | Umidade (%) | Poder calorífico (PCS) em<br>BTU.lb <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-------------|---------------------------------------------------|
| Resíduo fresco e coberto    | 20,1        | 5.078                                             |
| Resíduo fresco e descoberto | 12,8        | 5.344                                             |
| Resíduo velho e coberto     | 16,1        | 4.737                                             |
| Resíduo velho e descoberto  | 11,6        | 5.713                                             |

Fonte: Hawaiian Sugar Planters Association 1987

Estudos realizados em Cuba por Aguilar et al (1989) com resíduos de cana-de-açúcar não queimada para fins energéticos e que foram comparadas com o bagaço, obtiveram os seguintes resultados com estes resíduos agrícolas de cana com 33,78% de umidade e apresentando 4.774,0kcal/kg de poder calorífico (PCS) enquanto que para o bagaço foram encontrados 47,98% de umidade e poder calorífico de 4.902,3kcal/kg.

Ripoli (1991) comenta que o material remanescente da colheita que é queimado na operação de pré colheita, representa em termos equivalente energético de cerca de 30,89 barris de petróleo por hectare no campo o que equivale a 18,53 barris por hectare na usina. Neste sentido o consumo energético de transferência do campo para a usina é de 1,4% da energia nele contido.

As conclusões de Ripoli, et al (1998) em estudos sobre o efeito da queima na matéria prima mostram que existe uma perda econômica significativa para as unidades industriais de processamento da cana-de-açúcar e que a exudação provocada nos colmos é estimada em 43,7 litros por hectare o que significa 877.400 litros por safra para uma usina que emprega 20.000ha de canavial.

Estudos realizados no Brasil pela Bagatex (1984) mostraram que o bagaço apresentava poder calorífico de 1.790kcal/kg, a palha 3.600kcal/kg e os ponteiros com a palha 2.280kcal/kg e estimaram que o potencial energético dos resíduos da colheita sem queima era da ordem de  $87,72 \times 10^{12}$  kcal/ano de energia.

Para Hugot (1984) o peso específico aparente do bagaço varia de acordo com o sistema de armazenamento na faixa de  $160\text{kg/m}^3$  até  $800\text{kg/m}^3$  e na tabela 3 apresenta-se a diversa faixa em função de seu estado.

Tabela 3: Peso específico aparente do bagaço.

| Especificação                      | Peso específico aparente $\text{kg/m}^3$ |
|------------------------------------|------------------------------------------|
| Bagaço amontoado                   | 160 a 240                                |
| Bagaço solto                       | 80 a 120                                 |
| Bagaço solto em caminhão           | 160 a 180                                |
| Bagaço solto em esteira            | 130                                      |
| Bagaço fresco em fardos            | 400 a 600                                |
| Bagaço briquetado (12% de umidade) | 700 a 800                                |

Fonte: Hugot (1984)

Em termos de poder calorífico superior - PCS o que corresponde à base da matéria seca e útil que tem base a umidade atual do material a ser processado e no seu teor de hidrogênio elementar, as biomassas apresentam valores significantes de acordo com diversos autores para serem utilizadas como fontes de energia alternativas. Para visualizar as variações em função do material Ripoli (2003) construiu a tabela 4 que concentram algumas destas fontes de energia, com os seus valores médios de PCS poder calorífico superior e PCU poder calorífico útil.

Tabela 4: Valores médios de PCS – poder calorífico superior e PCU – poder calorífico útil de algumas biomassas, em kcal/kg.

| Biomassas                           | PCS   | PCU   |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Colmos de sorgo                     | 4.273 | -     |
| Capim napier                        | 4.369 | -     |
| Palha de <i>pinus spp</i>           | 4.870 | -     |
| Carvão vegetal                      | 7.500 | 6.798 |
| Palha de cereal                     | 4.445 | -     |
| Madeira molhe                       | 4.950 | 4.576 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar            | 4.560 | 1.926 |
| Folhas verdes de cana-de-açúcar     | 4.412 | 1.318 |
| Palhas de cana-de-açúcar            | 4.420 | 3.608 |
| Ponteiros de cana-de-açúcar         | 4.350 | 899   |
| Frações de colmos de cana-de-açúcar | 4.426 | 675   |
| Palhiço de cana-de-açúcar           | 6.668 | 4.441 |

Fonte: Ripoli (2003)

## 2.9. Comércio de energia no Brasil e a legislação

De acordo com Moraes (2001), a principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil é de origem hidráulica, que necessita de intensivo investimentos de capital. Com o esgotamento do setor público em investir no setor aliado a escassez de fontes economicamente viáveis e as crescentes exigências ambientais faz com que seja possível expandir fontes alternativas de produção e de venda. Deste modo o consumidor passa a receber ofertas

alternativas aumentando a competitividade surgindo concorrências de mercado o que possibilita o uso de tecnologia até então existente, mas não aplicada no setor sucroalcooleiro. A cogeração de energia é uma das alternativas a ser considerada. Pode se constituir, também, em uma nova oportunidade de negócios para a iniciativa privada, e para o poder público pode representar uma solução muito interessante para garantir o atendimento das suas necessidades de energia nos próximos anos.

Germek (1985), já afirmava que o setor sucroalcooleiro deveria aproveitar, melhor o seu potencial e se constituir em ilha energética e não simplesmente na produção de açúcar e de álcool.

Para Moraes (2001), para que seja viável a implantação da cogeração, é necessário que:

- Exista o mercado para as diferentes formas de energia cogerada.
- Este mercado seja garantido, pelo menos, para o período correspondente à vida útil do projeto.
- O custo da energia cogerada, seja competitivo com relação a energia convencional, no horizonte da vida útil do empreendimento.
- Existam garantias de suprimento de combustível.
- Não ocorram restrições ambientais à implantação e manutenção do empreendimento.

Para ser viável a implantação do empreendimento, a cogeração deve apresentar os seguintes atrativos:

**a) Para o sistema elétrico**

- Menores recursos de capital para geração elétrica (\$/kW e instalado), comparada com a hidroeletricidade ou mesmo com plantas convencionais de termogeração elétrica.
- Menores investimentos no sistema de transmissão de energia elétrica.
- Redução das perdas de transmissão de energia elétrica; e
- Melhoria na estabilidade do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

**b) Para o ambiente**

- Redução da carga térmica rejeitada para o ambiente ao utilizar forma mais eficiente a energia contida no combustível.
- Postergação de ampliação de reservatórios de usinas hidroelétricas, ao substituir o insumo elétrico do sistema.
- Redução dos poluentes dos efluentes gasosos - se o insumo da cogeração for um combustível mais limpo que o utilizado na produção do calor do processo.

**c) Para o empreendimento e o usuário da cogeração**

- Dependendo do processo de cogeração, pode haver maior flexibilidade na escolha de insumos (combustíveis) regionais.
- Redução do impacto ambiental, dependendo do combustível utilizado na cogeração.
- Aumento da participação de capital da iniciativa privada na produção de energia.
- Possibilidade de modular a instalação de acordo com as necessidades do seu mercado.
- Maior independência energética e maior controle e gestão dos custos totais da energia.
- Maior eficiência energética global.

O Ministério de Minas e Energia - MME do Brasil procurando incentivar o surgimento de fontes alternativas às das hidroelétricas sugeriu valores econômicos a serem empregados no mercado de energia alternativa. Brasil (2003), os quais são apresentados, na tabela 5, a seguir:

Tabela 5: Valores econômicos – PROINFRA – Programa de Incentivo de Fontes Alternativas de 2003, sugeridos para a comercialização de energia alternativa no Brasil nas diversas regiões brasileiras. (Valores em R\$/MWh).

| Fontes   | Casos de:             | Extinta SUDAM<br>e SUDENE | Demais regiões<br>R\$/MWh |
|----------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| Biomassa | Biogás                | 166,31                    | 170,12                    |
|          | Setor arrozeiro       | 108,17                    | 112,67                    |
|          | Setor madeireiro      | 116,05                    | 121,85                    |
|          | Setor sucroalcooleiro | 119,61                    | 89,59                     |
| Eólica   | Fcb < 34%             | 221,81                    | 231,68                    |
|          | 34% < Fcb < 44%       | variável                  | variável                  |
|          | Fcb > 44%             | 181,46                    | 191,70                    |

Fcb = Fator de Capacidade Bruto (não considera indisponibilidade)

Fonte: Ministério das Minas e Energia

O Decreto 2.655 de 02 de julho de 1998 regulamentou o Mercado Atacadista de Energia - MAE definindo as regras operacionais do Sistema Nacional tratado na Lei 9.648 de 24 de maio de 1998.

No D.O. Diário Oficial da União, Brasil (2000a) foi publicado o Decreto 3.371 de 24 de fevereiro instituindo o Programa Prioritário de Termoeletricidade e criando apoio financeiro do BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Social para o financiamento do estabelecimento de negócios no Brasil, incentivando o surgimento deste tipo de empreendimento.

O Decreto 3.520 de 21 de junho de 2000, Brasil (2000b) estabelece a estrutura funcional do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE ao qual compete promover o aproveitamento racional de energia do País. Além disso, promover o desenvolvimento sustentável permitindo ampliar o mercado de trabalho, a valorização dos recursos energéticos, a proteção do meio ambiente e a conservação de energia. Este decreto ainda incentiva a identificação de soluções adequadas de utilização de fontes renováveis de energia mediante o aproveitamento de insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis. Revê a matriz energética

brasileira considerando as fontes alternativas de energia, como as biomassas, um recurso disponível no Brasil.

A Portaria no. 212 de 25 de julho de 2000, publicada no Brasil (2000c), considerou a cogeração uma forma de descentralização da geração de energia elétrica possibilitando a entrada de novos fornecedores até então impossibilitados de comercializar os excedentes gerados para uso próprio com garantia de amortização dos investimentos. O governo considera que por meio desta portaria haveria o incentivo, rápido e ágil de incrementar o crescimento de unidades geradoras de energia.

Complementando meios de incentivar o crescimento de energia alternativa a Lei 9.991 de 24 de julho de 2000, publicada no Brasil (2000d) dispõe sobre a obrigatoriedade das empresas autorizadas à produção independente de energia elétrica e às concessionárias de geração em aplicar recursos financeiros em pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética no montante de no mínimo de um por cento de sua receita operacional líquida.

#### **2.10. Sistema de recolhimento do palhiço na cultura de cana-de-açúcar**

As formas de se viabilizar a colheita do palhiço da cana-de-açúcar visando o seu aproveitamento da cogeração de energia elétrica nas unidades industriais foram estudadas por Ripoli (2003) e Franco (2003) e as opções que se apresentaram até o momento foram:

- Recolhimento a granel, por colhedoras de forragens autopropelidas ou não.
- Enfardamento cilíndrico ou prismático com máquinas autopropelidas ou tracionadas.
- Enfardamento com prensas algodojeiras.
- Colheita integral do canavial, com colhedoras de cana picada com o sistema de limpeza desligados.

Os estudos realizados pelo Grupo Cosan, em Piracicaba-SP, com apoio financeiro da Fapesp e CNPq por pesquisadores da ESALQ/USP e UNESP-Botucatu, na safra 2002 durante 15 meses de estudo de campo e análises laboratoriais que resultou em análise estatísticas de 151 diferentes variáveis, de acordo com Ripoli (2002), permitiram dar segurança e precisão no resultado final que realmente interessa na tomada de decisão sobre

qual sistema adotar na usina para retirar o material e colocá-lo no pátio da unidade industrial. Essa definição se resume segundo o autor em três variáveis que são:

- a) Eficiência energética do sistema, ou seja, quanto se consome de energia na forma de combustível nas operações e quanto, de energia, na forma de palhiço é colocado no pátio.
- b) Percentagem de terra aderida ao palhiço em função do sistema e condições edafo-climáticas.
- c) Custo de energia, na forma de palhiço, posta na usina, em equivalente R\$/Barril de petróleo - R\$/EBP.

Para Ripoli (2002) é um erro as usinas que estão levando em consideração a adoção de um sistema de colheita baseado no custo em relação à massa de palhiço posto no pátio, pois o mesmo pode variar as suas características principalmente de umidade e percentagem de terra o que irá refletir na quantidade de energia líquida disponível e portanto, em custos irreais sobre o sistema adotado. Assim, os estudos desenvolvidos no grupo Cosan-SP, mostraram a nível de 1% de significância estatística que o melhor sistema é a colheita integral do canavial em termos de R\$/EBP e em termos de Eficiência Energética. Comenta que para a adoção desta sistemática de colheita integral haverá a necessidade da instalação na unidade industrial de equipamentos de pré-limpeza, já disponível de comercialização e que haverá uma redução nos custos das colhedoras mecânicas pela eliminação do corte superior dos colmos e limpeza atualmente existente propiciando economia de combustível com redução em até 30%. Lazzarini (1999) informa que em Cuba já se emprega este sistema de limpeza mecânica da cana-de-açúcar em mais de 900 estações de recepção e limpeza.

A figura 9, fornecida por Ripoli (2002) mostrando as curvas e tendências em função das eficiências de campo e custos nos três sistemas de colheita do palhiço estudados é apresentada a seguir e, seus valores, serão tomados, como base dos custos do palhiço posto na unidade industrial.

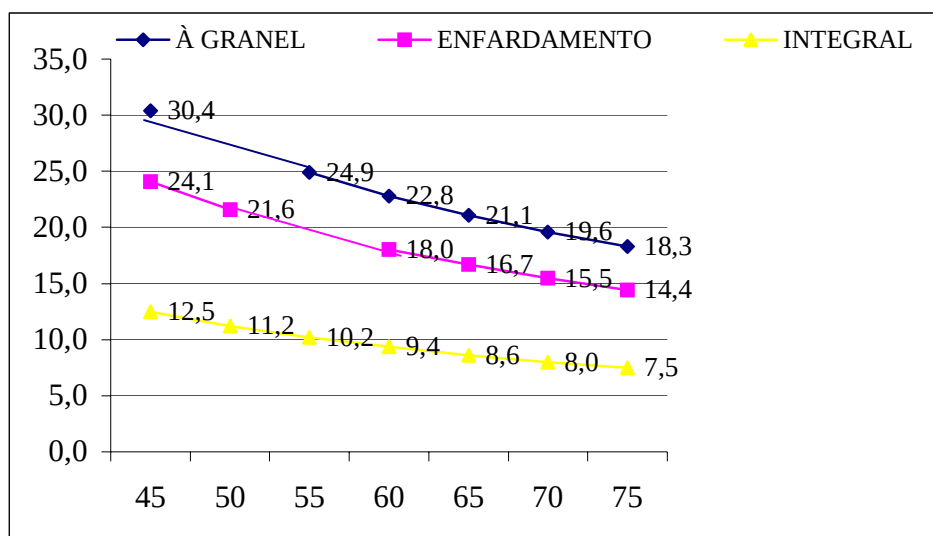


Figura 10: Comparação de custos operacionais (R\$/EBP), em função das variações das Eficiências de Campo dos sistemas, do palhaço posto na usina.

Segundo Ripoli (2002) a umidade do palhaço recolhido e enfardado no campo mostrou uma variação na quantidade de material recolhido. Mostra ainda que o palhaço recolhido dez dias após a colheita mecânica dos colmos apresenta umidade dos fardos, bem inferior, com média de 22,58% (máximo de 30,50% e mínima de 14,68% e desvio padrão de 9,85), quando comparada com o palhaço colhido logo após a colheita. Neste sentido a variação da umidade influenciou o poder calorífico que ficou entre 6,33 a 17,80 barril de petróleo por hectare.

Segundo Saffioti (1985) e Hodman et al (1955), o volume do barril de petróleo americano é de 119,24 litros, apresenta uma densidade de  $0,86\text{kg.L}^{-1}$ , o que equivale a  $1,163\text{kg}^{-1}$ , e possui Poder Calorífico médio de  $8.300\text{kcal.L}^{-1}$ . Assim  $8300\text{kcal/kg} \times 102,25\text{kg/barril} = 84.8675\text{kcal/barril}$  o que corresponde a  $848,67\text{Mkcal/barril}$ , e se  $119,25\text{L} \times 0,86\text{kg.L}^{-1} = 102,25\text{kg}$  sendo possível transformar valores de EBP em tonelada de palhaço tendo o mesmo o valor de  $1500\text{Mkcal}$ . Ou seja, o Poder Calorífico do palhaço dividido pelo Poder Calorífico do barril equivale a 1,17

### 2.11. Métodos matemáticos de análise de experimentação e a abordagem metodológica

Para Silva (2003) tradicionalmente a pesquisa tem sido caracterizada em duas categorias, a saber:

- Pesquisa pura ou básica, e
- Pesquisa aplicada.

Em função da amplitude das áreas de conhecimento, tanto exatas como sociais essa caracterização tem sido modificada com a introdução de outros conceitos, e tem assumido novas denominações, como aquela sugerida por Phillips; Pugh (1989) que consiste em três categorias:

- Pesquisa exploratória. (*exploratory research*)
- Pesquisa de comprovação ou teste. (*testing-out research*)
- Pesquisa de solução de problemas. (*problem-solving research*)

Nessa conceituação, para Silva (2003) a pesquisa exploratória tem significado de exploração, abordando problemas pouco conhecidos, não podendo ser colocadas com precisão as idéias da pesquisa, que poderão encaminhar para uma base teórica ou empírica. A pesquisa de comprovação lida com os limites de uma proposta já generalizada, testando e analisando aspectos envolvidos dentro das condições de contorno anteriormente estabelecido. Já a pesquisa de solução de problemas particulares no mundo real, utiliza métodos e teorias interdisciplinares para encontrar a solução em cada etapa do trabalho.

Para Phillips; Pugh (1989), para um trabalho de doutorado, em função da limitação de tempo e recursos, é mais aconselhável trabalhar dentro da configuração de pesquisa de comprovação.

A pesquisa operacional é aplicada nos estudos das organizações e envolve a indução de conhecimentos práticos relacionados à eficácia organizacional e pode fazer uma abordagem quantitativa, qualitativa, ou ambas de acordo com Silva (2003).

Para Bryman (1989) a abordagem quantitativa assemelha-se a um processo "científico" para a condução da pesquisa. O termo "científico" é vago e controvertido, mas os pesquisadores em metodologia o consideram como uma abordagem sistemática para a

investigação, onde o mínimo requerimento está na coleção de dados e suas análises em relação a um problema previamente formulado. A análise e interpretação dos dados levam aos resultados, os quais por indução comprovam ou não a teoria anteriormente estabelecida. Os métodos de pesquisa organizacional quantitativa podem envolver três categorias:

- O questionário de levantamento.
- O experimento de campo.
- O experimento de laboratório.

Em todas essas categorias Bryman (1989) informa que são coletados dados relativos às variáveis em análise, resultantes de conceitos. Embora um dos objetivos da pesquisa organizacional quantitativa seja a generalização, esse aspecto ainda é muito discutido, pois ela somente se enquadra dentro das condições de contorno de uma investigação específica, podendo ser reaplicada dentro daquelas condições.

De acordo com Bryman (1989) "a característica central da pesquisa qualitativa está em sua ênfase na perspectiva de comportamento do indivíduo que está sendo estudado, dentro de seu meio organizacional, incluindo sua percepção sobre a influência do meio externo sobre o seu meio ambiente. Enquanto que a pesquisa quantitativa é desenvolvida por através de conceitos baseados em uma teoria, a pesquisa quantitativa tende a evitar a noção particular que o pesquisador teria sobre o que é relevante e importante naquele domínio. A pesquisa qualitativa não é simplesmente uma forma diferente de coleta de dados em relação à pesquisa quantitativa, mas um caminho diferente para o saber e uma forma diferente de conhecimento".

Os métodos de pesquisa mais proeminentes, ou métodos de coleta de dados, para Bryman (1989), na pesquisa qualitativa, são a "observação participante" e as "entrevistas semi-estruturadas e não estruturadas".

Para Silva (2003), a amostragem programada não é a probabilística tradicional, casual simples ou estratificada, e engloba propositadamente empresas do setor sucroalcooleiro mais susceptível à dinâmica do mercado. Deve-se empregar o questionário auto-administrado, com questões que permitam simplificar e facilitar as respostas, sem perda do conteúdo que se deseja extrair.

Os países desenvolvidos, segundo Sartori (2001), têm se utilizado deste instrumento analítico de programação matemática e simulação para avaliar os resultados de um experimento, permitindo planejar as atividades.

Para Silva (2003) o uso moderno da simulação, com o sentido que tem na pesquisa operacional, tem sua origem em um trabalho de Von Neumann e Ulam de 1940, quando eles associaram a expressão “análise de Monte Carlo” a uma técnica matemática que utilizaram para resolver problemas de blindagem em reatores nucleares.

Segundo SCTDE (1992), no curso promovido pela Secretaria da Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento Econômico e Turismo juntamente com o Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar - ICIDCA na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ficou evidenciado que o desenho das operações através de simulações com equipamentos de cálculos de grande capacidade tem permitido a realização de análises mais realistas e detalhadas com menores custos e riscos. O uso da análise de processos ou simulação tem possibilitado a otimização da produção e o modelo matemático é uma expressão quantitativa das relações de interesse entre uma série de variáveis de operação e uma ou mais variáveis dependentes. Estes modelos podem ser determinísticos, quando se parte das leis da física ou da química ou estocástico, também denominado por empírico, quando a descrição aproxima-se do comportamento do processo empregando-se expressões algébricas. A simulação de processos possui as vantagens de realizar estudos de uma forma rápida e econômica, possibilitando estudar pontos extremos das condições operacionais que seriam impossíveis de serem praticadas em plantas reais. Além disso, possibilita estudar modificações e acompanhar variações de processos em etapas de desenho, sem serem construídas, constituindo-se em uma ferramenta de grande utilidade na tomada de decisões. Esta ferramenta tem sido empregada em Cuba em avaliação de processos açucareiros e de derivados, dentre eles o módulo de geração de vapor e eletricidade. Na geração de vapor a base do modelo matemático é formada pelo balanço de materiais e energia do processo que inclui a massa do bagaço e sua composição, bem como da temperatura e composição dos gases emanados da combustão permitindo conhecer os valores de eficiência da caldeira. Já na geração de eletricidade o cálculo se baseia no consumo de vapor por kWh a partir das condições do vapor de alta pressão e de baixa pressão, bem como do vapor de escape

possibilitando obter a eficiência da turbina. Para a realização destas simulações, o ICIDCA utiliza no processo de geração de vapor os seguintes parâmetros:

- Composição química do bagaço.
- Valor calórico superior e inferior.
- Quantidade de bagaço que alimenta a fornalha da caldeira.
- Calor específico, temperatura e a quantidade de carbono nas cinzas.
- Composição e temperatura dos gases da chaminé.
- Temperatura do bulbo seco e úmido e a pressão atmosférica.
- Fluxo, temperatura e pressão do vapor gerado.
- Fluxo e temperatura da água de alimentação da caldeira.

De posse nestes parâmetros aplica-se a equação a seguir para se determinar a eficiência da caldeira:

$$X_s = \{ (X_a + X_b) / X_c \} \cdot 100 \quad (\text{Eficiência Valor Calórico Superior}) \quad (1)$$

$$X_i = \{ (X_a + X_b) / (X_d + X_e + X_f + X_g) \} \cdot 100 \quad (\text{Eficiência Valor Calórico Inferior}) \quad (2)$$

sendo:

$X_a$  = energia empregada para gerar vapor

$X_b$  = água de purga

$X_c$  = energia que entra

$X_d$  = valor calórico inferior do bagaço

$X_e$  = entalpia do bagaço

$X_f$  = entalpia do ar

$X_g$  = entalpia da água de alimentação

No caso da geração de eletricidade a eficiência do turbo-gerador de extração-condensação pode ser determinada pela fórmula:

$$E_f = 3412 / W \cdot (h_1 - h_2) \quad (3)$$

sendo:

$E_f$  = Eficiência do turbo gerador

$W$  = consumo específico

$h_1$  = entalpia de entrada do vapor

$h_2$  = entalpia de saída do vapor

Para facilitar a visualização do processo a ser estudado o ICIDCA, SCTDE (1992) emprega o diagrama de blocos onde é possível detectar os processos unitários envolvidos e seus respectivos produtos intermediários e finais, bem como as relações existentes.

Para Beauclair et al (1999) o uso de computadores possibilita a análise de cenários físicos e financeiros de forma inédita criando condições ao administrador de avaliar as possibilidades e interações, antes impossíveis de serem qualificados, aproveitando-se melhor as oportunidades e corrigindo as limitações. O sistema de modelo linear auxilia a tomada de decisões na elaboração do planejamento.

O uso da pesquisa operacional conhecida mundialmente por “*operations research*” ou “*management science*”, segundo Wagner (1986), que emprega modelos, com auxílio de computadores para construir modelos matemáticos, econômicos e estatísticos de problemas de decisão e controle para tratar de situações complexas e incerteza. Permite ainda analisar as relações que determinam as conseqüências futuras prováveis de ações alternativas, e idear medidas apropriadas de eficácia de modo a calcular o mérito relativo de cada uma dessas ações. A análise de decisões permite separar os problemas de grande porte em suas partes componentes de forma que cada uma seja mais simples de manipular e diagnosticar, sendo muito empregado em fábricas na programação da produção associados às restrições de capacidades, falhas de equipamentos e processos, bem como de matéria prima e de produtos e sub-produtos intermediários. Para isso, a abordagem precisa atender as características de qualidade com abordagem de um foco primário na tomada de decisão para que os resultados principais possam permitir uma ação executiva direta e inequívoca. Além disso, a avaliação deve atender critérios de eficácia econômica permitindo a comparação de várias ações possíveis baseadas em valores mensuráveis que reflitam inequivocamente o futuro bem - estar da organização e que também ocorra a confiança no modelo matemático formal que permite à

outros analistas que sigam o mesmo roteiro e cheguem às mesmas conclusões e finalmente que seja empregado um sistema de informática computacional tendo em vista a necessidade de manipulação complexa dos dados. Deste modo, o autor recomenda que ao aceitar a pesquisa operacional a empresa deve crer que a sua aplicação contribui na análise de decisões gerenciais por meio de método científico. Esta aceitação permitirá a obtenção de modelos futuros com abordagem intrínseca e envolve o exercício de juízos pessoais além da manipulação lógica de símbolos e dados.

Andrade (1990) recomenda o uso da pesquisa operacional como forma de minimizar os custos de implantação de novas tecnologias, rotas operacionais evitando despesas e otimizando processos de tomadas de decisão gerencial.

Da mesma forma Silva (2003) emprega a pesquisa operacional de modo a criar modelo que mostre as rotas operacionais de melhor eficiência e de menores custos, vendo a modelagem matemática como um instrumento moderno de gestão empresarial da mesma forma que os demais autores.

O esquema a seguir apresentado, (figura 11), ilustra os procedimentos que devem ser utilizados para o desenvolvimento da modelagem do sistema produtivo segundo Silva (2003).

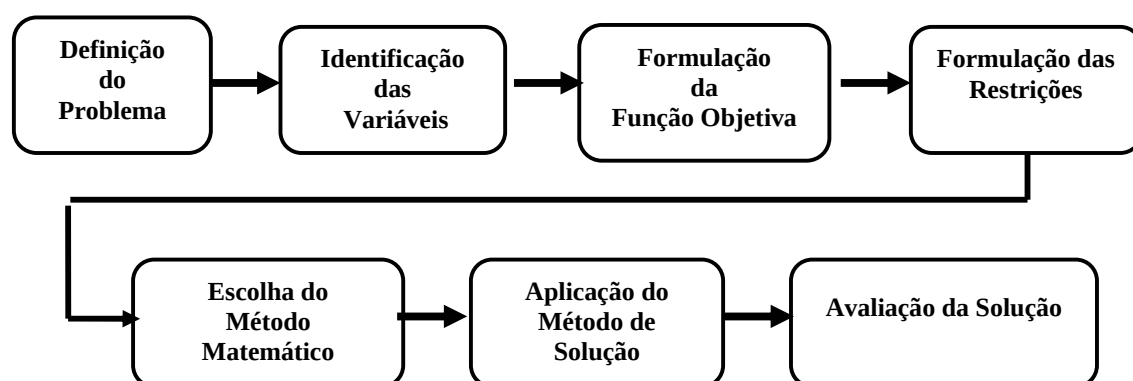


Figura 11: Procedimentos para desenvolvimento do modelo.

Alguns estudos têm sido desenvolvidos no Brasil no setor canavieiro empregando modelagem matemática podendo ser citado os trabalhos de Nascimento (1986) fazendo a simulação das operações de moagem da cana na indústria de açúcar e de álcool, os de Yamada (1999), modelando a cadeia produtiva das atividades do campo à industrialização da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool. Também a modelagem foi estudada por

Yamada (2001) simulando o setor de fornecimento de matéria-prima para a indústria sucroalcooleira como também estudou Lopes (1995) no segmento de carregamento e transporte da cana.

Sartori (2001) desenvolveu um modelo linear para avaliar a otimização da produção de energia por meio da biomassa resultante da colheita de diversas variedades da cana-de-açúcar no Brasil. Silveira (2001) também mostrou com modelo matemático que o potencial de cogeração por meio de biomassa no Brasil era expressivo com potencial instalado de 995MW dos quais 660MW são consumidos pelo próprio setor sucroalcooleiro sobrando 40MW para serem comercializados já que a produção efetiva é de 700MW e no seu estudo o modelo de estudo de casos mostrou que o projeto de cogeração com venda para a CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz no preço praticado era antieconômico e não tornava o projeto viável, mas que a venda no mercado *Spot* tornava viável ao longo do primeiro ano se não fossem considerados os riscos de redução de preços no médio e longo prazo pela dificuldade de comercialização da energia, e estudando modelo matemático para otimizar a produção de biomassa para a geração de energia por meio de resíduos de colheita de variedades de cana-de-açúcar apresentou a seguinte equação:

$$\sum_{i=1}^n A_i X_i \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = b \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i \geq b \bar{\alpha} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_i X_i \geq b \bar{\beta} \quad (7)$$

$$X_i \geq 0$$

Sendo:

$i=1,2,\dots,n$  as variedades

$A_i$  a produtividade média do resíduo de colheita para a variedade  $i$ , t/ha.

$X_i$  a variável que determina a área para o plantio da variedade  $i$ , ha.

$b$  a área total disponível para o plantio, ha.

$a$  a produtividade média de pol/ha entre as variedades  $i$ , t/ha.

$\alpha_i$  a produtividade média de pol/ha para variedade  $i$ , t/ha.

$\beta$  a produção média de energia da biomassa residual, entre as variedades, J/ha.

$\beta_i$  a produção média de energia da biomassa residual para a variedade  $i$ , kJ/ha

As restrições garantiram:

1ª - A utilização de toda a área que a usina reserva para o plantio.

2ª - Uma produtividade de pol igual ao encontrado para a média entre as variedades usadas ou acima dela.

3ª - Uma produtividade de energia igual ao encontrado para a média entre as variedades usadas ou acima dela.

4ª - Valores não negativos para as variáveis  $X_i$ .

O programa computacional desenvolvido por Sartori (2001) com o modelo matemático linear proposto mostrou-se exeqüível para os problemas formulados e os resultados permitiram, entre outros, estabelecer que o índice de biomassa de colheita da cana-de-açúcar foi diferente entre as variedades e cortes para matéria seca e úmida. A produtividade de biomassa residual varia de 20,53 a 29,76t/ha no primeiro corte, de 34,72 a 49,29t/ha no segundo corte, de 18,47 a 29,92t/ha no terceiro corte e de 8,82 a 17,04t/ha no quarto corte. Além disso, que a biomassa residual da colheita apresentou altos valores de C/N, relação que indica baixa taxa de decomposição. O modelo atendeu satisfatoriamente a tomada de decisão para discriminar as melhores variedades de cana-de-açúcar para o plantio, quando a biomassa residual de colheita produzida fosse de cana crua.

## 2.12. Avaliação da eficiência dos equipamentos de cogeração

Maranhão (1983) mostra em seus estudos realizados em Alagoas - AL, que a secagem do bagaço de cana-de-açúcar possibilita aumentar o poder calorífico deste combustível e apresenta um modelo de equipamento para ser empregado nas esteiras de alimentação das caldeiras com a finalidade de reduzir a umidade do bagaço, que apresenta a média de 50%, após a saída da moenda empregando gases da caldeira.

Para Peres (1982) o bagaço assume papel importante em particular no seu conteúdo energético como fonte de calor e substitui o óleo combustível derivado do petróleo e assim, deve buscar meios de aumentar o seu poder calorífico. Um destes meios é reduzir a umidade pois o teor de água após a moagem é na faixa de 48 a 52% e o poder calorífico inferior - PCI pode variar conforme a tabela 6 apresentada a seguir:

Tabela 6: PCI - poder calorífico inferior do bagaço da cana-de-açúcar a diferentes umidades e o correspondente aumento energético. Peres (1982).

| Item avaliado                       | Valores |       |       |       |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|-------|
| Umidade (%)                         | 50      | 40    | 30    | 20    |
| PCI (kcal/kg)                       | 1.790   | 2.270 | 2.760 | 3.250 |
| Aumento PCI (%)                     | 0       | 26,8  | 54,1  | 81,5  |
| Aumento calor corrigido ao peso (%) | 0       | 5,7   | 30,1  | 13,5  |

Peres (1982), informa ainda, que a umidade interfere diretamente no aspecto de rendimento da utilização como combustível, pois a temperatura de ignição do bagaço está entre 500°C e 600°C com 50% de umidade e cai para 300°C a 400°C com 35% a 40% de umidade influenciando a velocidade da queima. Além disso, a temperatura da chama que está a 850°C e 920°C com 50% de umidade chega acima de 1.100°C com 35% de umidade, aumentando consideravelmente a transmissão de calor por radiação, condução e convecção nos tubos e recuperadores que compõem a caldeira. Isto significa um aumento de aproximadamente de 15% no rendimento. O incompleto aproveitamento físico-químico do bagaço em combustão pela umidade nele contida provoca a presença de perturbadores da quantidade de fuligem, em partículas de 0,5mm a 3,0mm que saem pelos gases da chaminé como carbono em suspensão causando, além das perdas energéticas de 1,5% a 3,0% a

contaminação ambiental. Estes fatos inferem que a umidade do palhiço irá influenciar o seu poder calorífico e também o rendimento da geração de vapor utilizado para a transformação de energia elétrica nos alternadores, sendo necessário estudar e, definir muito bem, a rota tecnológica de aproveitamento do palhiço e do bagaço para fins de cogeração.

Para Hugot (1984) a taxa de vaporização das caldeiras varia em função do modelo de fabricação e dos acessórios existente no equipamento. As tecnologias de fabricação dos equipamentos são dominadas e empregadas de acordo com as necessidades do processo desejado. As mais simples do tipo piro-tubular apresentam taxa de  $16\text{kg}/\text{cm}^2$ , o do tipo tubo-reto sem pré-aquecedor operam com taxa de vaporização de  $18\text{kgf}/\text{cm}^2$  e as mais sofisticadas e equipadas com pré-aquecedores e grelhas basculantes tem taxa de  $33\text{kg}/\text{cm}^2$ . Esta variação da taxa de vaporização de uma caldeira irá influenciar a eficiência do processo e o consumo de combustível. Acrescenta ainda que o Poder Calorífico Inferior - PCI do bagaço varia em função da umidade e da concentração de açúcar residual expressa em °S (sacarose), podendo ser aplicada a equação:

$$\text{PCI} = 4250 - 48,5 W - 13 S \quad (8)$$

Sendo:

W = Umidade do bagaço em %

S = Pol do bagaço em °S

O calor perdido na chaminé pode ser calculado aplicando-se a equação:

$$g = [(1-W) (1,4 m - 0,13) + 0,5] t \quad (9)$$

e que de maneira simplificada pode ser expressa pela equação:

$$g = 1,5 t \quad (10)$$

sendo:

g = Calor sensível perdido na chaminé expresso em kcal/kg de bagaço queimado

t = Temperatura de expulsão das fumaças em °C

m = Excesso de ar em %

W = Umidade do bagaço em decimal

Existe, de acordo com Hugot (1984) uma correlação entre percentagem de CO<sub>2</sub> na fumaça e o excesso de ar que pode ser explicitado pela equação:

$$e = (2010 / m) - 99 \quad (11)$$

sendo:

e = excesso de ar em %

m = % de CO<sub>2</sub> na fumaça

Para Hugot (1984), as características do vapor de água, variam de acordo com a pressão e na tabela 7 pode-se verificar o resumo de algumas destes dados.

Tabela 7: Características do vapor d'água em função da pressão.

| Temperatura<br>°C | Pressão<br>kgf/cm <sup>2</sup> | Caloria<br>kcal/kg | Calor de Vaporização<br>kcal/kg |
|-------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 100,0             | 1,03                           | 100,0              | 538,9                           |
| 110,0             | 1,46                           | 110,1              | 532,4                           |
| 120,0             | 2,02                           | 120,3              | 525,7                           |
| 130,0             | 2,75                           | 130,4              | 518,9                           |
| 140,0             | 3,68                           | 140,6              | 511,9                           |
| 150,0             | 4,85                           | 150,9              | 504,6                           |
| 161,2             | 6,10                           | 162,5              | 498,1                           |
| 169,6             | 8,00                           | 171,3              | 489,5                           |
| 181,2             | 10,5                           | 183,4              | 480,1                           |
| 190,7             | 13,0                           | 193,5              | 471,5                           |
| 200,4             | 16,0                           | 203,9              | 463,2                           |
| 206,1             | 18,0                           | 210,1              | 457,8                           |
| 211,4             | 20,0                           | 215,8              | 452,7                           |
| 216,2             | 22,0                           | 221,2              | 447,7                           |
| 222,0             | 5,00                           | 228,5              | 440,9                           |

Fonte: Hugot, (1984) Manual para Ingenieros Azucareros

Paturau (1982) apresenta um diagrama sobre a fabricação de açúcar, melaço e eletricidade, (figura 12), que permitirá ser a base da construção de um diagrama apropriado para este estudo de modelagem de simulação matemática do processo de uso do palhiço.

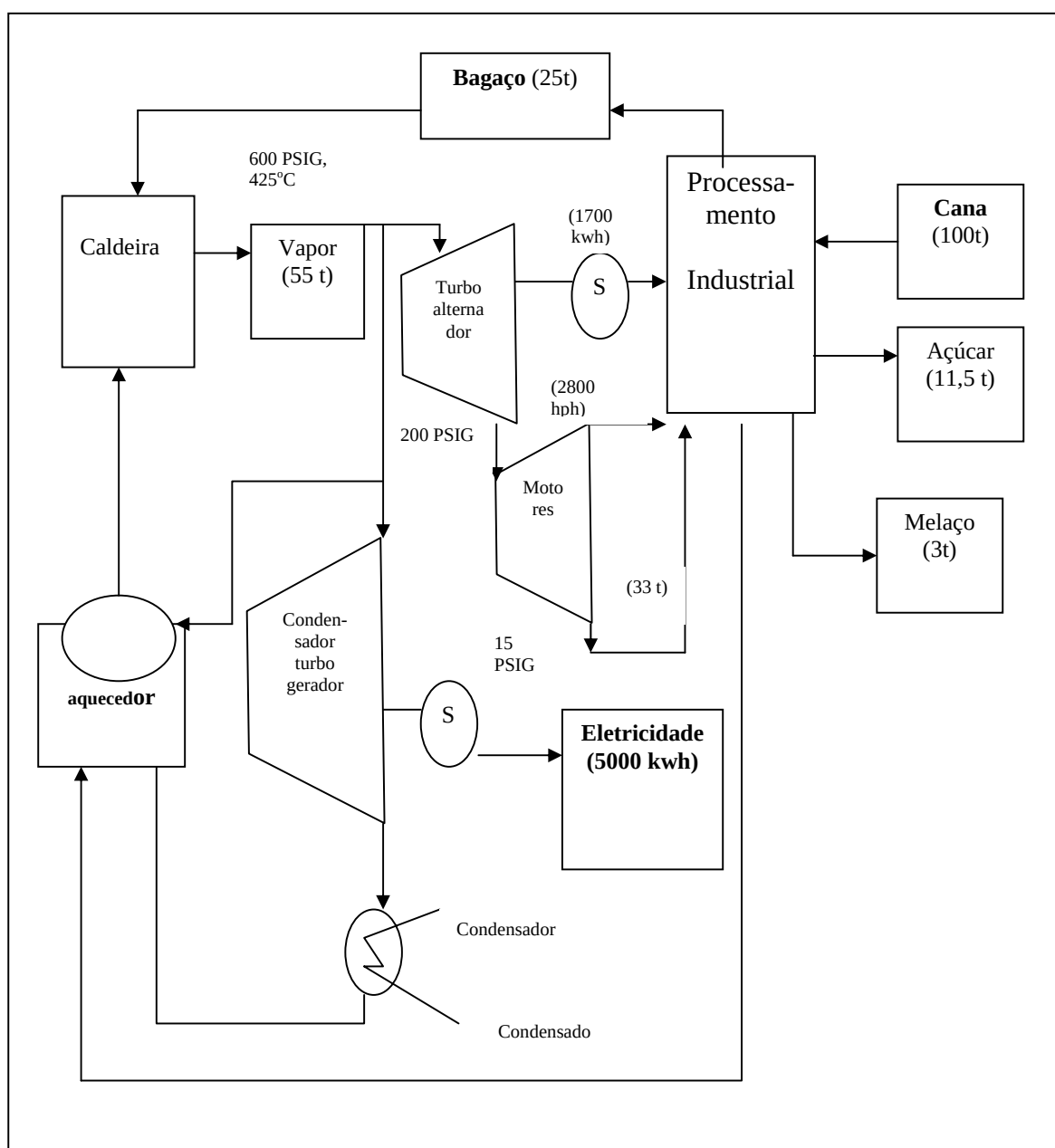


Figura 12: Diagrama de blocos da fabricação de açúcar, melaço e eletricidade proposta por Paturau (1992).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Método**

A abordagem metodológica foi caracterizada como pesquisa quantitativa. E partindo-se de uma conceituação básica do campo da pesquisa operacional, foram desenvolvidas as “funções objetivo” e as “equações de restrição” para cada rota tecnológica alternativa com o palhiço recebido na unidade industrial em diferentes formas em função dos diagramas de processo e simulação.

Os sistemas de equações de cada modelo foram analisados com as técnicas de pesquisa operacional por meio de planilha eletrônica de cálculo “*Microsoft excel*” visando determinar a rota mais econômica. O método adotado foi aquele que, via computacional, visou fornecer a melhor modelagem dos modelos alternativos do processamento do palhiço para fins de cogeração.

#### **3.2. Tratamentos**

Foram estudados três tipos de simulação com matéria-prima com resíduos vegetais de colheita ou material combustível, palhiço posto na unidade industrial, cujos custos do setor agrícola e de transferência para a unidade industrial, foram determinados pelos estudos de Ripoli (2002) apresentados na figura 12.

- a) Sistema de colheita de cana integral.
- b) Sistema de recolhimento de palhiço a granel.
- c) Sistema de recolhimento de palhiço enfardado.

No primeiro esquema de produção estudado, sistema de colheita integral, a cana-de-açúcar colhida de forma integral e sem a pré-operação de queimada chega na unidade industrial transportada por veículos tradicionalmente utilizados pelo setor, contendo os colmos e o palhiço, que no caso são resíduos vegetais da colheita, misturados.

Este material deve sofrer uma limpeza mecânica, por meio de um equipamento apropriado, recebendo uma forte corrente de ar que possibilita a separação das frações colmo que seguem para a operação de extração, terra e outros particulados menores que são retirados do processo por meio de sistemas molhados ou secos e a fração palhiço que representa material de alto poder calorífico e baixo teor de sacarose.

Como este material vem do campo contendo particulados de diferentes tamanhos e formas obstruem o sistema de alimentação das caldeiras, e geram deficiência da combustão principalmente nas caldeiras de queima em leito fluidizado que constituindo o principal problema da utilização do palhiço como fonte adicional de energia misturado ao bagaço.

No segundo esquema de recolhimento de palhiço e colheita da cana-de-açúcar, a mesma é colhida separadamente do palhiço e levada para o processamento industrial normal. Porém a fração palhiço é recolhida da lavoura após um pré processamento de enleiramento e transportada para a unidade industrial, a granel, em veículos tipo “gaiola” adequadamente construídos para esta finalidade.

Este material para ser descarregado exige a utilização de um equipamento já existente no pátio de bagaço da unidade industrial para isso deve ser computados somente o custo da operação de descarregamento, com pá carregadora, (figura 12), já que o bem de capital já está incorporado ao custo da infra-estrutura de manuseio do bagaço.



Figura 13: Foto do equipamento de pá carregadora utilizada no sistema de descarregamento do palhiço e no manuseio do material no pátio de bagaço. Foto Stupiello (2001).

Entretanto, a fração palhiço apresenta-se com partículas de pequeno e de grande tamanhos que chegam a alcançar cerca de 300mm de comprimento e que causam problemas nos alimentadores de bagaço das caldeiras, construído para emprego de material de partículas bastante reduzidas de cerca de 20mm de comprimento, que é o bagaço, oriundo dos desfibradores, que preparam os colmos e antecedem os sistemas de extração.

No terceiro esquema, a cana-de-açúcar é colhida sem a pré-operação de queima e o palhiço é recolhido após a operação de enleiramento, com equipamentos especiais na forma de fardos e transportados em veículos de carga seca.

Na unidade industrial o palhiço enfardado é descarregado dos veículos de transporte de carga seca, com o auxílio da pá carregadora existente no pátio de manuseio de bagaço como na figura 13, devendo ser computado somente o custo desta operação tendo em vista que o equipamento já está incorporado na infra-estrutura.

Neste caso, a fração palhiço apresenta-se agregada devendo ser desmontados os fardos com equipamentos especiais para ser possível a alimentação das caldeiras como é feito com o bagaço. Esta operação exige equipamentos especiais para esta finalidade de desmontagem e desfibramento do palhiço. Neste caso o tamanho e peso do fardo é que irá determinar o dimensionamento da operação unitária envolvida de desenfardamento e sua seqüência operacional.

O palhiço depois de desfibrado em partículas semelhantes ao bagaço pode ser então misturado na esteira de retorno do bagaço, do pátio de estocagem, e assim não causará os problemas de entupimento que o palhiço "in natura" tem causado nas indústrias que tentam

processá-lo. Além disso, o palhiço em particulados menores propiciará facilidade para a secagem por meio de evaporação tendo em vista que a superfície específica ficará aumentada.

A alternativa que algumas unidades industriais adotaram, segundo Cella (2003) para adequar o tamanho do particulado do palhiço, foi a mistura do mesmo na esteira de cana-de-açúcar fazendo-o passar pelo triturador / desfibrador de colmos antes do processo de esmagamento e extração de caldo. Este procedimento resolve o problema da alimentação da caldeira com o palhiço misturado com o bagaço, porém causa perda de eficiência de extração do açúcar contido na cana-de-açúcar bem como da capacidade de moagem já que a mesma é diretamente afetada pelo teor de fibra, conforme demonstrado pela equação de Hugot (1984).

### **3.3. Levantamento de dados de campo**

Os dados foram levantados em unidades industriais e empresa de consultoria escolhidas por apresentarem algum trabalho de pesquisa industrial ou, possuírem equipamentos, mesmo que isolados nos padrões da tecnologia pretendida, bem como as que já estão pioneiramente comercializando energia elétrica na para a rede pública.

Dentre as diversas unidades industriais brasileiras os dados deste estudo foram obtidos nas usinas:

- **A) Usina Guaira:** localizada em Guaira, Estado de São Paulo, onde está implantada uma mesa de limpeza mecânica a seco com transporte de resíduos por via úmida. - Jaime Luiz Bassinello (2004).
- **B) Usinas do Grupo Andrade:** localizada em Pitangueiras, Estado de São Paulo, onde está instalada uma caldeira de alta pressão, com a finalidade de comercialização, na rede pública, de energia produzida por meio de biomassa. - Waldir Alexandre e Luiz Gonzaga Benetti (2004).
- **C) Usina Santa Adélia:** localizada em Jaboticabal, Estado de São Paulo, onde está instalado sistema de cogeração de alta eficiência e comercializa energia para a rede pública CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz - Marco Antônio Carleto (2004).

- **D) Techpetersen:** localizada em Piracicaba, Estado de São Paulo, empresa de consultoria sucroalcooleira responsável por projeto de implantação de sistema de limpeza mecânica e de desfibramento de palhiço em unidades industriais brasileiras. Entrevista com Eng. Guilherme Cella (2004).

Deve ser destacado que em nenhuma unidade industrial brasileira existe a rota tecnológica ou seja operações unitárias em cadeia de tal forma a se constituir em um processo tecnológico operacional, com todos os equipamentos e condições que permitem um estudo de caso real, mas parte da operação unitária envolvida que estará sendo criada para ser simulada por este estudo. Razão suficiente para aplicar as técnicas de simulação.

### **3.3.1. Ficha de levantamento de dados de campo junto às unidades industriais**

Os dados obtidos nas unidades produtivas foram levantados seguindo a metodologia proposta de simulação de processos por meio de modelagem matemática, aplicando-se ficha com questões pré-determinadas e também abertas à informações complementares.

Outras informações de campo foram obtidas por meio de entrevista com a empresa Techpetersen que produz equipamentos para o setor sucroalcooleiro e também foram realizadas medições em equipamentos e sistema operacional de manuseio de bagaço em unidade industrial para aferir parâmetros para a simulação, Grupo Andrade.

## **3.4. O modelo matemático de simulação**

Deve ser destacado que a seqüência operacional foi definida com base nas recomendações de Paturau (1982) e Hugot (1984) no diagrama de blocos do processo de cogeração.

Assim sendo, e seguindo as orientações de Silva (2003), de Andrade (1900), de Wagner (1986) foram definidos os passos da modelagem linear, conforme e na seqüência, após a definição do problema e identificação das variáveis, definida a função objetivo, que no caso foi a determinação dos custos para cada rota tecnológica para o uso do palhiço nas caldeiras da unidade industrial e assim possibilitar mais biomassa para a cogeração.

### 3.4.1. Diagrama de blocos do estudo

Para facilitar o estudo e com base nas recomendações de Sartori (2001), do ICIDCA SCTDE (1992), de Paturau (1982), de Beauclair et al (1999) e de Wagner (1986) foi desenvolvido um modelo básico de diagrama de blocos que procura determinar as delimitações do presente estudo de cogeração de energia elétrica a partir do uso do bagaço complementado por diferentes origens de palhiço colocado no pátio da unidade industrial.

O diagrama de blocos, (figura 14), mostra como o presente estudo procurou determinar a equação de modelo de simulação matemática a ser aplicada nos cenários, de utilização das diferentes fontes de "palhiço" ou de resíduos vegetais de colheita de cana-de-açúcar e da decisão do processo tecnológico a ser empregado.

Quanto a sistema de produção industrial de açúcar, de álcool ou aguardente não se exigem modificações de ordem tecnológica e por isso foram excluídos de maiores comentários.

No sistema de cogeração recomenda-se o emprego de caldeiras de alta eficiência e turbinas de condensação em cascata cuja tecnologia é bastante empregada no setor e o Brasil domina a tecnologia de fabricação de equipamentos, segundo Koblitz (2004) e como visto anteriormente (figura 10) da Usina Santa Adélia-SP. E como a tecnologia é plenamente dominada não foi necessária, no momento, a sua análise, restringindo a avaliação da tomada de decisões gerencial da recepção na indústria ao uso do palhiço misturado no bagaço, alimentado pelos sistemas rotativos, para fins de cogeração.

Neste sentido o estudo se concentrou no material recebido do campo nas suas três possíveis formas integral, a granel ou enfardado, as exigências de descarregamento, separação de frações componentes, manuseio no pátio e adequação para ser manuseado com o bagaço para alimentar as caldeiras do sistema termoeletrico acionado por biomassa.

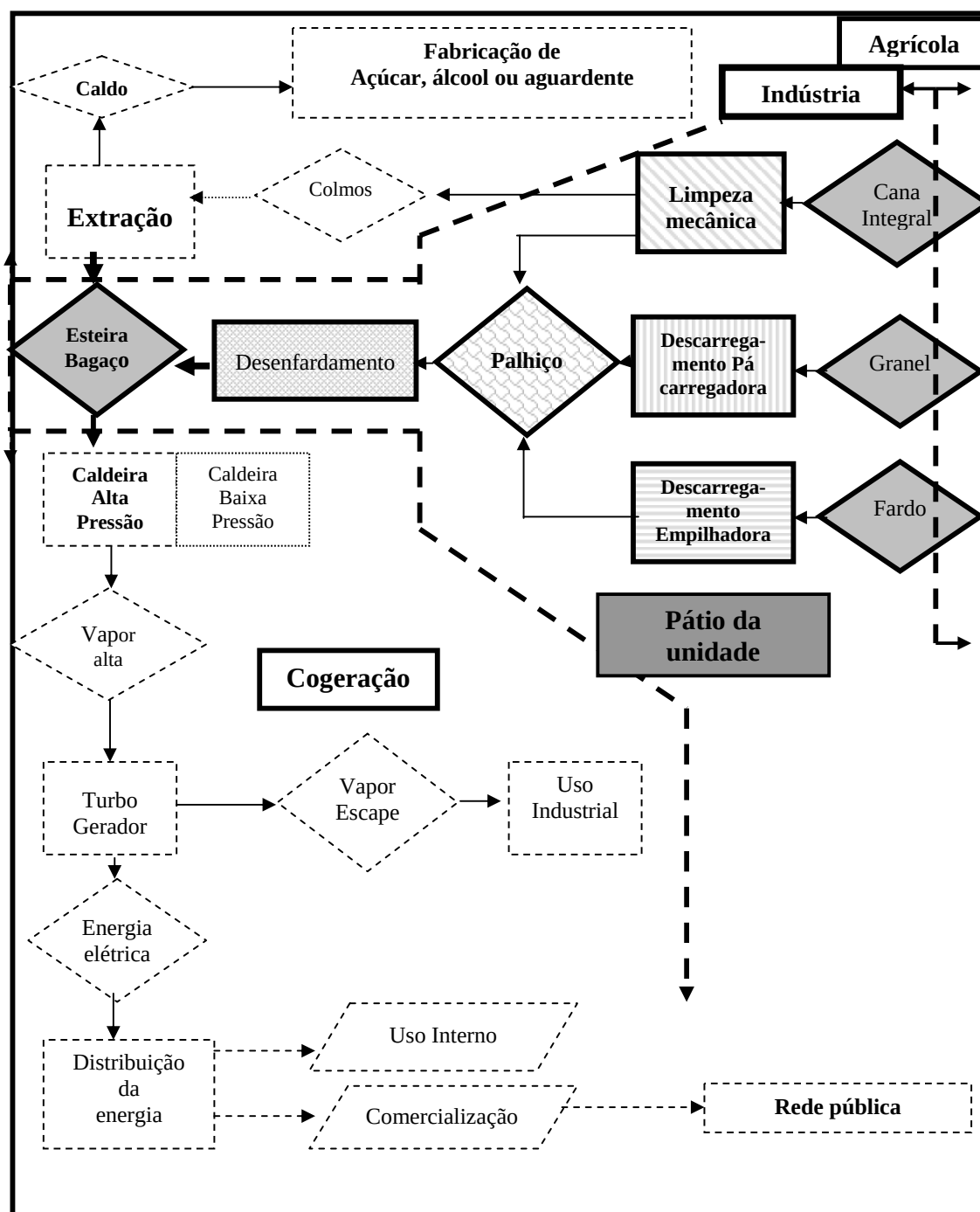


Figura 14: Diagrama de blocos do processo de cogeração estudado empregando formas diferentes de colheita do palhiço a ser utilizado como combustível nas caldeiras, na forma de biomassa, delimitando a área de abrangência do estudo.

### 3.4.2. Cálculos

A seguir serão mostrados os cálculos e transformações das informações colhidas, de modo a torna-los adequadamente a comporem as equações.

#### 3.4.2.1. Cálculo do custo operacional do sistema de transferência de palhiço

Com as medições na Usina Andrade Açúcar e Álcool, tabela 8, que visaram determinar a capacidade de operações no manuseio do bagaço e que servirão de estimativas para cálculos de custo no manuseio do palhiço ao chegar do campo e/ou na alimentação do desfibrador e/ou na mistura com o bagaço no pátio da indústria foi possível determinar parâmetros dimensionais para serem utilizados na modelagem matemática.

Tabela 8: Levantamento de dados de campo dos custos e capacidades das máquinas Caterpillar tipo pá carregadora utilizada no manuseio do bagaço no pátio da unidade industrial do grupo Andrade de Pitangueiras-SP (2004).

| Modelos<br>da pá<br>carregadora | Capacidades       |       | Custos hora máquina<br>operacional com capital | Custos hora máquina<br>operacional sem capital |
|---------------------------------|-------------------|-------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                 | (m <sup>3</sup> ) | (kg)  | (R\$)                                          | (R\$)                                          |
| Caterpillar 966                 | 3,8               | 1.020 | 80,86                                          | 60,19                                          |
| Caterpillar 938                 | 2,8               | 720   | 52,58                                          | 43,69                                          |
| Caterpillar 930                 | 1,8               | 450   | 46,76                                          | 30,76                                          |

Considerando que cada operação envolve aproximadamente dois minutos de acordo com as medições na usina Andrade, estima-se ser possível realizar 60 ações por hora, permitindo calcular o custo operacional da movimentação da massa de palhiço por hora em função do modelo da máquina aplicando-se a equação a seguir:

$$C = R \div B f \quad (12)$$

sendo:

C = custo do peso ou volume de carga em R\$ por peso (t) ou volume (m<sup>3</sup>).

R = Custo operacional hora máquina em R\$/h.

B = Capacidade de carga da caçamba em peso (t) ou volume (m<sup>3</sup>).

f = capacidade horária de operações de transferência.

A tabela 9 apresenta os resultados dos custos de utilização da pá carregadora de bagaço e que será empregada no cálculo dos custos do manuseio do palhiço.

Tabela 9: Resumo dos valores calculados em R\$/tonelada em função dos custos e capacidades das máquinas Caterpillar tipo pá carregadora com base nos valores obtidos no manuseio do bagaço no pátio da unidade industrial do grupo Andrade de Pitangueiras-SP, considerando 60 operações por hora.(2004).

| Determinações |                              |               | Custos        |               |              |                              |              |                              |
|---------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|
| Modelos       | Volumes<br>(m <sup>3</sup> ) | Pesos<br>(kg) | CHMC<br>(R\$) | CHMO<br>(R\$) | OSC<br>R\$/t | OSC<br>(R\$/m <sup>3</sup> ) | OCC<br>R\$/t | OCC<br>(R\$/m <sup>3</sup> ) |
| CAT- 966      | 3,8                          | 1.020         | 80,86         | 60,19         | 0,98         | 0,26                         | 1,31         | 0,35                         |
| CAT- 938      | 2,8                          | 720           | 52,58         | 43,69         | 1,01         | 0,26                         | 1,21         | 0,31                         |
| CAT- 930      | 1,8                          | 450           | 46,76         | 30,76         | 1,14         | 0,28                         | 1,73         | 0,43                         |
| médias        |                              | 730           | 67,07         | 44,88         | 1,04         | 0,26                         | 1,42         | 0,36                         |

CHMC = Custo hora máquina operacional com capital (econômico)

CHMO = Custo hora máquina operacional sem capital (financeiro)

OSC = Operacional sem capital (R\$/t) -  $c_2$ ;  $f_2$  (R\$/TPH)

OCC = Operacional com capital (R\$/t) -  $a$ ;  $c_1$ ;  $f_1$  (R\$/TPH)

Para fins de exercício de modelagem serão empregados valores médios, ou seja: custo do capital investido para aquisição do equipamento – pá carregadora, por unidade trabalhada é calculado realizado a diferença entre o OSC e OCC médio, para o valores de:  $a$ ;  $c_1$  e  $f_1$  expressos em (R\$/TPH - tonelada de palhiço hora).

Sendo:

$a$  = Custo operacional da pá carregadora utilizada no descarregamento do palhiço no pátio da unidade industrial em R\$/TPH.

$c_1$  = Custo de capital da pá carregadora utilizada na alimentação do palhiço no desfibrador.

$f_1$  = Custo de capital da pá carregadora utilizada na transferência do palhiço desfibrado.

Assim  $1,42 - 1,04 = R\$0,38$  TPH

Ou seja:

$$a = c_1 = f_1 = R\$0,38 \text{ TPH}$$

No caso do custo operacional a tabela 9 já oferece o valor médio direto para  $c_2$  e  $f_2$ , ou seja:

$$c_2 = f_2 = R\$1,04 \text{ TPH}$$

sendo:

$c_2$  = Custo operacional da utilização da pá carregadora na alimentação do desfibrador.

$f_2$  = Custo operacional de utilização da pá carregadora na transferência do palhiço desfibrado.

#### **3.4.2.2. Cálculos dos custos do sistema de limpeza a seco, investimento - $b_1$ e operacional - $b_2$**

Na entrevista com o Eng. Cella da empresa Techpetersen - Prolink, de Piracicaba-SP, que presta consultoria em projetos de engenharia e instalação de sistemas de limpeza a seco, já foram implantados diversas unidade no Brasil, podendo ser destacado as das empresas: Usina Cidade Gaúcha-PR, Usina Costa Pinto-SP, Usina Centralco-SP, Usina Cruz Alta-SP, Usina Santo Angelo-SP e Usina Guairá-SP.

Além disso, informou, que o sistema de limpeza a seco emprega uma potência de 120 a 150 C.V. e que a 1 tonelada de bagaço é responsável pela geração de 110kW ou 0,11MW.

De acordo com Techpetersen - Prolink o custo de fabricação e instalação do sistema a seco em uma unidade industrial de 400TCH está avaliado atualmente em R\$969.500,00 e do sistema de desfibramento de palhiço na usina São José ZL esta estimado em R\$120.000,00 para a capacidade de 20 toneladas de palhiço por hora operando com motor de 150CV e na Usina Quata estimado em R\$400.000,00 para a capacidade de 80 toneladas de palhiço por hora operando com motor de 300CV. Cella (2004) .

Empregando estas informações foi possível determinar os valores a serem adotados na modelagem quanto custo de implantação do sistema de limpeza a seco e também de desfibramento do palhiço a granel. Para isso foi aplicada a equação 13 a seguir:

$$b_1 = \text{CBP} / \{\text{TCH} \times 24\} \times S \quad (13)$$

sendo:

$b_1$  = Custo unitário de investimento na implantação da mesa a seco em R\$/TCH

CBP = Custo do Bem Patrimonial, em R\$

TCD = Tonelada de cana dia, em toneladas

TCH = Tonelada de cana hora, em toneladas

S = Dias de safra

$$b_1 = 969.500,00 / \{400 \times 24 \times 200\}$$

$$b_1 = 0,50 \quad \text{R\$/TCH}$$

Considerando a vida útil do equipamento de oito anos e uma safra de 200 dias, o custo do capital a ser empregado na formulação matemática do modelo de simulação, expresso em tonelada de cana hora será:

$$b_1 = 0,50 / 8 = 0,0625 \text{ R\$/TCH} \gg 6,25^{-2} \text{ R\$/TPH} \quad (14)$$

O estudo não considerou juros sobre o capital, caso ocorra empréstimo bancário, pois todos os gastos com capital de qualquer equipamento são os mesmos independentemente da operação unitária. Se houver a necessidade de se realizar a operação com o uso de juros sobre o capital emprestado basta adicionar na equação este custo. Porém, o mesmo deverá ocorrer em cada operação unitária que irá compor a rota tecnológica adotada.

Como o fator de multiplicação é o mesmo, não haverá distorção sobre a tomada de decisão gerencial pretendida no modelo.

Aplicando-se a equação anteriormente deduzida de transformação de cana em palhiço pelo valor superior de 12 toneladas de palhiço por hectare de cana, obtêm-se:

$$\text{Assim,} \quad \text{TCH} / \text{RPB} = \text{TPH} \quad (15)$$

sendo:

TCH = Tonelada cana hora

TPH =Tonelada palhiço hora

RPB = Relação palhiço bagaço por hectare  $\gg 0,17$

(1ha = 71,3 t de cana Vieira (2003)

(12 t de palhiço Ripoli (2003)

$$71,3 / 12 = 0,17$$

$$TCH = 0,17 \text{ R\$/TPH}$$

Aplicando uma regra de três simples é possível conhecer a relação de custo de cana para palhiço a ser processada ou seja custo unitário de investimento na implantação da mesa a seco em R\$/TCH:

$$b_1 = 0,0625 / 0,17 = \text{R\$}0,37/\text{TPH} \quad (16)$$

Quanto ao custo operacional do sistema de limpeza a seco, as informações da Usina Guaira permitiram conhecer os valores operacionais do sistema, pois exige a insuflação de ar forçada na mesa de limpeza, a qual é realizada por quatro motores de 40CV acoplados à ventiladores.

As despesas necessárias, segundo a usina nos quatro anos de operação, são somente de manutenção já que os operadores da mesa são os mesmos em qualquer situação operacional e já estão disponíveis na unidade industrial.

Há que se destacar que a energia elétrica que aciona o sistema é produzida na própria unidade industrial e que a limpeza a seco evita a realização de captação de água para a lavagem da cana-de-açúcar e tratamento esta água com produtos químicos.

Deste modo, o custo estimado nos quatro anos de operação na Usina Guaira, exigiu a lubrificação do sistema na razão de 13g/12.400h valor R\$4,09/kg motor 40CV e substituição de rolamentos e correias com seus respectivos serviços de balanceamento,

alinhamento, rejuvenescimento do motor e manutenção preditiva consumindo a razão de R\$300,00 por safra.

Este valor dividido pelo total de cana-de-açúcar processada permite estimar o custo operacional unitário a ser empregado na equação de simulação da rota tecnológica.

$$b_2 = \text{COM} / \text{TCD} \times S \quad (17)$$

sendo:

$b_2$  = custo operacional do sistema de limpeza a seco em R\$/TCH

COM = Custo operacional anual da manutenção R\$

TCD = Tonelada cana dia em t

S = Dias de safra em dias

$$b_2 = 300 / 2.200.000$$

$$\text{Ou seja } b_2 = \text{R\$}0,000.140\text{R\$}/\text{TCH} > > 1,4^{-4} \text{R\$}/\text{TPH}$$

Aplicando-se a equação (16) anteriormente deduzida de transformação de cana em palhiço pelo valor superior de 12 toneladas de palhiço por hectare de cana, obtêm-se:

$$\text{Assim, } \text{TCH} / \text{RPB} = \text{TPH}$$

sendo:

TCH = Tonelada cana hora em t/h

TPH = Tonelada palhiço hora em t/h

RPB = Relação palhiço bagaço por hectare

(1ha = 71,3 t de cana Vieira (2003))

(12 t de palhiço Ripoli (2003))

$$\text{TCH} = 0,17\text{TPH}$$

Aplicando uma regra de três simples é possível conhecer a relação de custo de cana para palhiço a ser processada:

$$\begin{aligned}b_2 &= \text{R\$}0,000.140/\text{TCH} \\b_2 &= 0,000140 / 0,17 \\b_2 &= \text{R\$}0,000.823/\text{TPH} \gg 8,23^{-4} \text{R\$}/\text{TPH}\end{aligned}$$

### **3.4.2.3. Cálculos dos custos de investimento - $d_1$ e operacional - $d_2$ do sistema de desfardamento de palhiço**

Nas unidades industriais levantadas não foi encontrado sistema de desfardamento, pois, as que possuem sistema de recolhimento enfardado usam misturar o fardo na esteira de cana passando o material pelo sistema de preparo de cana para extração.

Entretanto, existem sistemas, de desfardamento de fardos forrageiros para alimentação de gado empregando-se facas do tipo serra "vai e vem" ou do tipo de um conjunto de serras de disco circulares acopladas paralelamente em uma barra.

Desta forma será adotado um valor de 10% do custo do desfibrador para ser possível realizar a operação unitária de desfardamento e realizar o estudo de simulação.

$$\begin{aligned}e_2 &= \text{Custo de investimento para aquisição do desfardador} \\d_1 &= e_2 \times 0,10\% = 0,0026\end{aligned}\tag{18}$$

$$d_1 = \text{R\$}0,0026 \gg 2,6 \times 10^{-3} \text{R\$}/\text{TPH}$$

Para o cálculo do custo operacional da operação de desfardamento foi adotado o valor de 10% do custo de investimento, deste modo aplicando os valores na equação a seguir é possível determinar o valor para ser aplicado na equação de avaliação do cenário estudado.

$$d_2 = 10\% d_1\tag{19}$$

$$d_2 = 0,0026 \times 10\% = 0,00026 \text{R\$}/\text{TPH} \gg 2,6 \times 10^{-4} \text{R\$}/\text{TPH}$$

### 3.3.2.4. Cálculos dos custos de investimento - $e_1$ e operacional - $e_2$ do sistema de desfibramento de palhiço

Os protótipos que estão sendo estudados nas usinas São José ZL e Quata projetados para desfibrar palhiço permitem inferir o custo unitário de investimento e operacional para serem adotados na modelagem matemática empregando-se o mesmo metodologia de cálculo do sistema de limpeza a seco.

$$e_1 = \text{CBP} / (\text{TPH} \times 24 \times S) \quad (20)$$

sendo:

$e_1$  = Custo unitário do equipamento de desfibramento em R\$/TPH

CBP = Custo do Bem Patrimonial, em R\$

TPH = Tonelada de palhiço hora

S = Dias de safra

$$e_1 = 400.000,00 / \{400 \times 24 \times 200\}$$

$$e_1 = 0,21 \text{R}/\text{TPH}$$

Considerando a vida útil do equipamento de oito anos e uma safra de 200 dias, o custo do capital a ser empregado na formulação matemática do modelo de simulação será:

$$e_1 = 0,21 / 8 = \text{R\$ } 0,026$$

$$e_1 = \text{R\$}0,026/\text{TPH} \gg 2,6 \times 10^{-2} \text{R}/\text{TPH}$$

Quanto ao custo operacional o equipamento não exige a presença constante de operadores e os próprios encarregados do pátio de bagaço e das pás carregadoras e que alimentam o equipamento, podem acompanhar o funcionamento do sistema de desfibramento do palhiço e a equação a seguir apresentada possibilita inferir os parâmetros a serem adotados na equação de modelagem e simulação matemática:

$$e_2 = \text{COM} / (\text{TPH} \times 24 \times S) \quad (21)$$

sendo:

$e_2$  = Custo operacional do sistema de desfibramento em R\$/t

COM = Custo operacional anual da manutenção R\$

TPH = Tonelada cana dia

S = Dias de safra em dias

$$e_2 = 300 / (400 \times 24 \times 200)$$

Ou seja:

$$e_2 = \text{R\$}0,000.156/\text{TPH} \gg 1,56 \times 10^{-4} \text{R\$}/\text{TPH}$$

Para ser possível montar um modelo de equações do processo de cogeração foi necessário estabelecer um diagrama de massa padrão com base nos modelos de Paturau (1982) e de Hugot (1984).

Assim, foi montado o diagrama com os cenários, para cada rota tecnológica proposta, tendo como base, para fins de estudos e exercícios, uma unidade industrial de capacidade de processamento de 60TCH - toneladas de cana por hora o que corresponde a 1.440TCD - tonelada cana dia, ou seja 288.000 toneladas de cana-de-açúcar por safra de 200 dias utilizando os dados do levantamento de campo.

Este tipo, dimensional de unidade, foi utilizado durante o estabelecimento do Proálcool, por técnicos do IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool, como modelo padrão para avaliação e estudos e corresponde a uma destilaria de capacidade de produção de 120.000 litros de álcool carburante por dia.

Neste sentido, considerando que o teor médio anual da fibra da cana-de-açúcar é de 12,5% o que corresponde a geração de bagaço potencial por safra de:

$$288.000\text{t de cana} \times 12,5\% \text{ Fibra do bagaço} \div 100 = 36.000 \text{ toneladas de fibra por safra}$$

Considerando que a média de umidade do bagaço industrial é de 50%.

$$36.000\text{t de fibra} \div 50\% \times 100 \text{ umidade do bagaço} = 72.000 \text{ toneladas de bagaço por safra.}$$

Considerando que o palhiço representa de 4 a 12 toneladas por hectare segundo Ripoli (2003) expresso em matéria seca, aplicando estes valores na quantidade de cana-de-açúcar moída por safra na unidade modelo pode-se obter a quantidade estimada de palhiço potencial disponível, para a média de produção agrícola de 71,3 toneladas por hectare de cana-de-açúcar segundo Vieira (2003) no Estado de São Paulo.

$$288.000\text{t de cana} \div 71,3\text{t por ha} = 4.040 \text{ hectare de cana-de-açúcar}$$

$$4.040\text{ha} \times 4\text{t por ha} = 16.160 \text{ toneladas de palhiço (mínimo)}$$

ou

$$4.040\text{ha} \times 12\text{t por ha} = 48.480 \text{ toneladas de palhiço (máxima)}$$

Assim, a unidade modelo de capacidade de produção de 120.000 litros de álcool por dia, ou seja, de 60TCH oferecerá os dados que são apresentados na tabela 10 e serão utilizados nos estudos de modelagem e simulação na equação objetivo de cada rota tecnológica.

Considerando que tecnicamente os autores Andrade (1993), Carvalho (1996), Orlando Filho et al (1998), Andrade (1999), Medeiros (2001) e Luca (2002) recomendam não deixar todo os resíduos da colheita para não prejudicar a produtividade da rebrota e o aumento da taxa de infestações de pragas e doenças e também de não recolher a totalidade de resíduos para evitar problemas de erosão e perda de fertilidade do solo, e ervas daninhas o modelo estudado propõe o recolhimento dos padrões, a saber:

- Recolhimento de 30% do palhiço, no caso do recolhimento a granel ou enfardado.
- Recolhimento de 50% do palhiço, no caso do recolhimento a granel ou enfardado.
- Recolhimento de 70% do palhiço, no caso do recolhimento a granel ou enfardado.
- Recolhimento tendendo a 100% do palhiço (que se torna matéria estranha vegetal na matéria-prima), no caso da cana integral.

Aplicando estas taxas de recolhimento de palhiço que potencialmente pode ser recolhido obtêm-se os parâmetros a seguir:

### 3.3.3. Valores potenciais de disponibilidade de palhiço recolhido

#### 4.3.3.1. Valores mínimos, em toneladas, de palhiço safra

- a) 16.160t de palhiço x 30% = 4.848t
- b) 16.160t de palhiço x 50% = 8.080t
- c) 16.160t de palhiço x 70% = 11.312t
- d) 16.160t de palhiço x 100% = 16.160t

#### 3.3.3.2. Valores Máximos, em toneladas, de palhiço safra

- e) 48.480t de palhiço x 30% = 14.544t
- f) 48.480t de palhiço x 50% = 24.240t
- g) 48.480t de palhiço x 70% = 33.936t
- h) 48.480t de palhiço x 100% = 48.480t

Tabela 11: Resumo dos dados adotados e calculados para a unidade modelo.

| Itens                                                          | Parâmetros | Unidade de medida | Obs.                                          |
|----------------------------------------------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------|
| Capacidade de moagem hora -TCH                                 | 60         | t                 | Adotado                                       |
| Capacidade de moagem dia -TCD                                  | 1.440      | t                 |                                               |
| Capacidade de moagem safra - TC safra                          | 288.000    | t                 |                                               |
| Dias de safra                                                  | 200        | Dias              | Adotado                                       |
| Produtividade média da cana para o Estado de São Paulo         | 71,3       | t/ha              | 71,3t/ha<br>Vieira, (2003)                    |
| Área de cana-de-açúcar safra                                   | 4.040      | ha                |                                               |
| Fibra da cana - média safra                                    | 12,5       | %                 | Us. Andrade<br>Us. Guairá<br>Us. Sta Adelaide |
| Umidade do bagaço - média safra                                | 50         | %                 | Hugot, (1984)                                 |
| Bagaço disponível na safra                                     | 72.000     | t                 |                                               |
| Palhiço disponível - mínimo na safra                           | 16.160     | t                 | 4t/ha Ripoli, (2003)                          |
| Palhiço disponível - mínimo por hora                           | 3,36       | t/h               |                                               |
| Palhiço disponível - máximo na safra                           | 48.480     | t                 | 12t/ha Ripoli, (2003)                         |
| Palhiço disponível - máximo por hora                           | 10.1       | t/h               |                                               |
| Capacidade de geração de energia elétrica por tonelada de cana | 0,11       | MWh               | Techpetersen-ProLink                          |

Os custos calculados com os dados obtidos no campo, permitiram montar a tabela 12 cujos valores serão utilizados nas simulações matemáticas.

Tabela 12: Valores de custos de investimento e operacionais calculados ou adotados com base nos dados de campo e expressos em TPH – Toneladas de palhiço hora.

| Itens                                                                                   | Parâmetros            | Unidade de medida | Obs.                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Custo unitário médio da aquisição de pá carregadora – $a = c_1 = f_1$                   | 0,38                  | R\$/TPH           | Us. Andrade                       |
| Custo unitário médio operacional da pá carregadeira – $c_2 = f_2$                       | 1,04                  | R\$/TPH           | Us. Andrade                       |
| Custo unitário da implantação do sistema de limpeza a seco em mesa já existente – $b_1$ | $3,7 \times 10^{-1}$  | R\$/TPH           | Techpetersen - Prolink            |
| Custo unitário da operação do sistema de limpeza a seco – $b_2$                         | $8,2 \times 10^{-4}$  | R\$/TPH           | Us. Guaira                        |
| Custo unitário da implantação do sistema de desfardamento do palhiço – $d_1$            | $2,6 \times 10^{-3}$  | R\$/TPH           | Adotado 10% do custo desfibrador  |
| Custo unitário da operação do sistema de desfardamento do palhiço – $d_2$               | $2,6 \times 10^{-4}$  | R\$/TPH           | Adotado 10% do custo investimento |
| Custo unitário da implantação do sistema de desfibramento do palhiço – $e_1$            | $2,6 \times 10^{-2}$  | R\$/TPH           | Us. Quatá                         |
| Custo unitário da operação do sistema de desfibramento – $e_2$                          | $1,56 \times 10^{-4}$ | R\$/TPH           | Us. Guaira                        |

Nota-se que para poder realizar as comparações, as unidades empregadas devem ter a mesma base, assim os valores são expressos em TPH, ou seja, em toneladas de palhiço por hora.

### 3.3.4. Determinação da equação objetivo

Como delimitação do processo tecnológico, o material originário da lavoura será recebido após a operação de pesagem, realizado na balança da unidade industrial e o material a ser utilizado nas caldeiras, ou seja, o palhiço desfibrado ou resíduo vegetal, será depositado no pátio de bagaço e manuseado misturado com o bagaço vindo a alimentar as caldeiras pelo sistema de esteira de retorno do bagaço já existente na unidade industrial.

Ressalta-se que os custos de colocação do palhiço no pátio da unidade industrial foram definidos pelos estudos de Ripoli (2002) apresentados na base de EBP – Equivalente Barril de Petróleo.

Na figura 9, apresentada pode-se notar pela foto o conjunto complexo que formam os equipamento de produção de vapor com o sistema de alimentação de bagaço nas

caldeiras, com as canaletas alimentadoras dotadas de tambor rotativos, e esteiras de retorno do bagaço não utilizado, bem como das máquinas de manuseio de bagaço no pátio para alimentação das mesmas nos períodos de paradas e na (figura 15) detalhes do sistema rotativo de alimentação das caldeiras de alta pressão com câmara de queima de leito fluidizado.



Figura 15: Foto do conjunto do sistema rotativo de alimentação de combustível nas caldeiras que se obstrui com as frações de palhiço da Usina Vale do Rosário-SP. Foto do autor (2004).

Com estas ressalvas, que delimitam a ação, a função objetivo geral de minimização de custos ( $Z$ ) contemplou as operações unitárias de:

- Descarregamento do palhiço a granel, enfardado ou da cana integral =  $X_1$ .
  - Custo do sistema de alimentação da mesa =  $a$ .
- Mesa de limpeza a seco dos colmos do palhiço e do *trash* mineral =  $X_2$ .
  - Custo do equipamento de limpeza a seco =  $b_1$ .
  - Custo do operacional do sistema de limpeza a seco =  $b_2$ .
- Equipamentos de transferência do palhiço para o sistema de desfibramento do =  $X_3$ .
  - Custo do equipamento de transferência do palhiço "in natura" =  $c_1$ .
  - Custo operacional do sistema de transferência do palhiço "in natura" =  $c_2$ .
- Equipamentos de desmontagem do fardo =  $X_4$ .
  - Custo do equipamento de desmontagem dos fardos =  $d_1$ .
  - Custo do operacional do sistema de desmontagem dos fardos =  $d_2$ .
- Equipamento de desfibramento do palhiço =  $X_5$ .

- Custo do equipamento de desfibramento do palhiço =  $e_1$ .
- Custo do operacional do sistema de desfibramento do palhiço =  $e_2$ .
- Equipamento de transferência do palhiço desfibrado para o pátio de bagaço =  $X_6$ .
- Custo do equipamento de transferência do palhiço para o pátio =  $f_1$ .
- Custo operacional do sistema de transferência do palhiço para o pátio =  $f_2$ .
- Custos operacionais (R\$/EBP - Equivalente Barril de Petróleo), em função das variações das eficiências de campo dos sistemas, do palhiço posto na usina =  $\beta$ .

Deste modo, a equação objetiva geral proposta com a finalidade de minimização dos custos de uso do palhiço na unidade industrial  $Z_I$  foi:

$$Z_I = X_1 a + X_2 (b_1+b_2) + X_3 (c_1+c_2) + X_4 (d_1+d_2) + X_5 (e_1+e_2) + X_6 (f_1+f_2) \quad (22)$$

Para os estudos de valoração dos custos do palhiço em função do sistema de recolhimento do palhiço no campo esta equação (22) foi acrescida do custo determinado por Ripoli de acordo com a figura 11 de comparação de custos operacionais (R\$/EBP em função das variações das eficiências de recolhimento no setor agrícola dos sistemas do palhiço posto na usina  $\beta$  ( $\min Z_I + \beta$ ) e que irá constituir-se no valor global, ou seja, os custos agrícolas e industriais de colheita e adequação do palhiço para ser utilizado com combustível do tipo biomassa juntamente com o bagaço nas unidades sucroalcooleiras para fins de cogeração.

$$Z_{AI} = \{X_1 a + X_2 (b_1+b_2) + X_3 (c_1+c_2) + X_4 (d_1+d_2) + X_5 (e_1+e_2) + X_6 (f_1+f_2)\} + (\beta \times 1,17) \quad (23)$$

Para se obter o valor em R\$ por tonelada de palhiço ao invés de R\$ por EBP - Equivalente Barris de Petróleo basta utilizar o fator de transformação multiplicando o resultado por 1,17.

$$\text{Assim, } Z_{AI} \times 1,17 \text{ em R$/EBP} = Z_{AI} \text{ em R$/TP} \quad (24)$$

Aplicando o fator de transformação 1,17 nos valores apresentados por Ripoli na figura 15 foi possível montar o gráfico a seguir apresentado neste estudo:

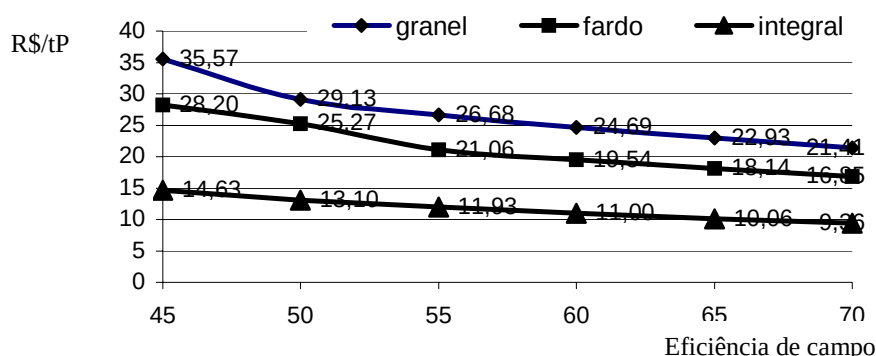


Figura 16 Custos do palhiço posto no pátio da unidade industrial expressos em R\$/TP – toneladas de palhiço, obtidos da transformação dos valores expressos em R\$/EBP – equivalente barril de petróleo, dos estudos realizados por Ripoli (2002).

Como a fibra da cana-de-açúcar e a umidade percentual do palhiço e seu teor de sacarose que lhe confere o Poder Calorífico, Hugot (1984) e variam em função da variedade, do sistema de recolhimento, em cada unidade agro-industrial, para fins de modelagem foi adotado valor padrão de 12,5% de fibra na cana e de umidade percentual no bagaço de 50% e Poder Calorífico de 1.800kcal e no palhiço de no mínimo de 14,68% ao no máximo de 30,5%, o que corresponde segundo Ripoli (2003) a 6,33 a 17,80 EBP - Equivalente Barril de Petróleo, por hectare (figura 09).

Os levantamentos de campo realizados na Usina Guairá, no Grupo Andrade e na Usina Santa Adelaide, mostraram, que estes valores, também são muito próximos as médias de safra destas unidades paulista e deste modo serão adotados nas equações de modelagem matemática os valores médios propostos por Hugot.

### 3.3.5. Definindo as equações de restrição

Na seqüência foi necessário definir as equações de restrição de cada sistema em função da forma de recepção pré-estabelecidas, integral, a granel ou em fardos.

### 3.3.5.1. Considerações e diagrama de blocos da Recepção de cana em colheita integral

Neste sistema, (figura 17), a colheita tenderá a ser de 100% de todo o palhiço, no caso matéria estranha vegetal, pois a colhedeira mecânica de cana crua, colherá quase todo o material vegetal disponível na lavoura, não sendo possível regular um percentual desejado de alguma matéria orgânica no campo, como é possível nos demais sistema estudado.

Haverá também a necessidade de instalar uma mesa de limpeza mecânico a seco da matéria-prima, separando os colmos, rico em teor de sacarose, para serem processados na indústria de produção de açúcar, álcool ou aguardente do palhiço – resíduo vegetal e do “trash” mineral.

Deve ser destacado que o processamento da cana-de-açúcar integral na moenda prejudica a eficiência de extração de açúcar da matéria-prima e da capacidade de processamento conforme ficou evidenciado na equação de Hugot (1984) retro apresentada.

Este equipamento irá processar uma massa de produto intermediário ( $X_1$ ;  $X_2$ ;  $X_3$ ;  $X_4$ ;  $X_5$ ;  $X_6$ ) e apresentará custos fixos ( $a$ ;  $b_1$ ;  $c_1$ ;  $d_1$ ;  $e_1$ ;  $f_1$ ) de aquisição do bem de capital e custos variáveis ( $b_2$ ;  $c_2$ ;  $d_2$ ;  $e_2$ ;  $f_2$ ) de operação do equipamento envolvido.

Quando a limpeza é realizada pelas máquinas de colheita mecânica da cana-de-açúcar exige-se o consumo de diesel. Já no caso da limpeza ser realizada na unidade industrial na mesa de limpeza a seco, a energia necessária ao acionamento dos ventiladores é fornecida pela própria cogeração existente e são eliminados os custos de captação e tratamento de água de lavagem, além, das perdas de açúcar pelo processo. Deste modo há a redução dos custos em energia fóssil e externa a empresa, bem como de eficiência de recuperação de açúcar pela indústria.

O palhiço – resíduo vegetal separado por este processo de limpeza a seco deve ser encaminhado para a fase de desfibramento. Para isso, é necessária a operação unitária de transportar e depositar este material no pátio de bagaço da mesma forma dos palhiços a granel ou enfardado dos demais sistemas estudados.

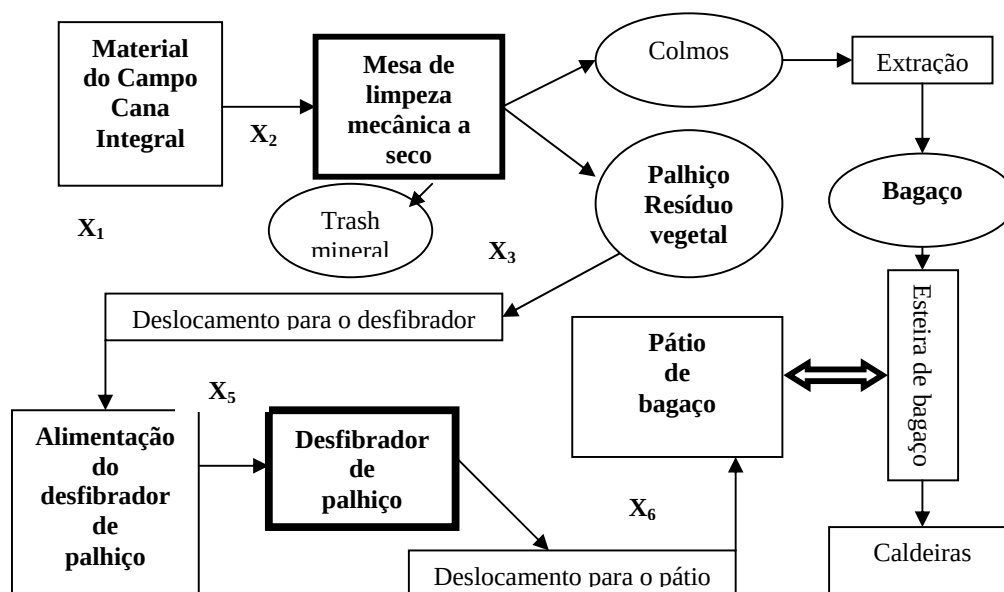


Figura 17: Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de colheita integral.

### 3.3.5.2. Equações restritivas do palhiço do sistema de colheita integral

Com base nas premissas anteriores e segundo o diagrama de blocos das operações unitárias envolvidas, (figura 17), foi possível elaborar as equações de restrições, que são:

- $X_1$  - Não se aplica pois a operação unitária já é realizada com a matéria-prima.
- $X_2$  - Quantidade máxima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função da variedade a ser separado, em tonelada.
- $b_1$  - Custo de aquisição e instalação da mesa de limpeza a seco compatível com a capacidade de moagem da unidade industrial, em R\$/t.
- $b_2$  - Custo unitário de processamento operacional, em R\$/t.
- $X_3$  - Quantidade máxima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função da variedade, a ser transportado internamente, em tonelada.
- $c_1$  - Custo de aquisição e instalação do sistema de transporte do palhiço da mesa de limpeza ao desfibrador de palhiço, em R\$/t.
- $c_2$  - Custo operacional de alimentação do sistema de desfibramento em R\$/t.

- $X_4$  - Não se aplica pois o sistema de colheita integral não exige a operação unitária de desfardamento.
- $X_5$  - Quantidade máxima do potencial de palhiço disponível a ser desfibrado por tonelada de cana em função da variedade, em tonelada.
- $e_1$  - Custo de aquisição e instalação do sistema de desfibramento do palhiço, em R\$/t.
- $e_2$  - Custo operacional do sistema de desfibramento do palhiço em R\$/t.
- $X_6$  - Quantidade máxima do potencial de palhiço disponível desfibrado por tonelada de cana em função da variedade, em tonelada.
- $f_1$  - Custo de aquisição do sistema de manuseio de palhiço, em R\$/t.
- $f_2$  - Custo de transporte do palhiço desfibrado do pátio de bagaço para esteira de retorno de bagaço, em R\$/t.

#### **3.3.5.3. Considerações e diagrama de blocos da recepção do palhiço no sistema de recolhimento a granel**

Neste sistema, (figura 18), a quantidade da colheita a granel do palhiço, a ser recolhida poderá variar deixando maior ou menor quantidade do material disponível na lavoura e assim atender a necessidade de manutenção de uma cobertura vegetal morta que irá propiciar condições de umidade e preservação das características físico-química do solo.

O palhiço que chega na unidade industrial vem em veículos tipo “gaiola” e deve ser descarregado, (figura 13), no pátio de bagaço com auxílio de uma pá carregadora. Deve ser destacado que este equipamento faz parte do sistema de manuseio de bagaço já existente na agroindústria. Neste sentido só deverá ser computado o custo da operação.

Em seguida o material deverá seguir para o desfibrador de palhiço ( $X_5$ ) para adequá-lo às exigências do tamanho do particulado para alimentar as caldeiras de produção de vapor.

O sistema de manuseio do palhiço desfibrado poderá ser realizado pela própria pá carregadora de bagaço ou por esteira que alimente a esteira de retorno de bagaço.

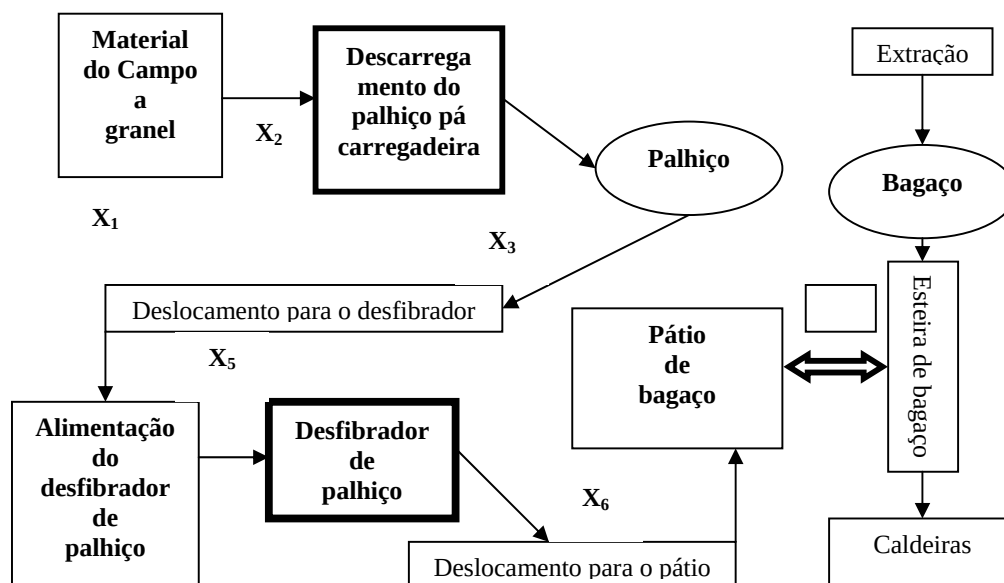


Figura 18: Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de recolhimento de palhicho a granel.

#### 3.3.5.4. Equações restritivas do palhicho do sistema de recolhimento a granel

Com base nas premissas anteriores e segundo o diagrama de blocos das operações unitárias, envolvidas, (figura 18), foi possível elaborar as equações de restrições, que são:

- $X_1$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhicho disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%) a ser descarregado, em tonelada.
- $a_1$  - Custo operacional de descarregamento do palhicho do veículo tipo gaiola para o pátio de bagaço, em R\$/t.
- $X_2$  - Não se aplica pois a operação unitária não é necessária
- $X_3$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhicho disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), em tonelada.
- $c_1$  - Não se aplica pois a própria pá carregadeira, existente no pátio, poderá ser empregada na operação otimizando sua utilização.

- $c_2$  - Custo operacional de alimentação do sistema de desfibramento com a pá carregadeira, em R\$/t.
- $X_4$  - Não se aplica pois o sistema de colheita a granel não exige a operação unitária de desfardamento.
- $X_5$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), em tonelada.
- $e_1$  - Custo de aquisição e instalação do sistema de desfibramento do palhiço, em R\$/t.
- $e_2$  - Custo operacional do sistema de desfibramento do palhiço em R\$/t.
- $X_6$  - quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), em tonelada.
- $f_1$  - Custo de aquisição do sistema de manuseio de palhiço, em R\$/t.
- $f_2$  - Custo de transporte do palhiço desfibrado do pátio de bagaço para esteira de retorno de bagaço, em R\$/t.

#### **3.3.5.5. Considerações e diagrama de blocos da recepção do palhiço no sistema de recolhimento em fardos**

No recolhimento do palhiço enfardado, a quantidade a ser recolhida também poderá variar deixando maior ou menor quantidade do material disponível na lavoura e assim atender a necessidade de manutenção de uma cobertura vegetal morta que irá propiciar condições de umidade e preservação das características físico-química do solo já comentadas na revisão bibliográfica.

Além disso, o equipamento de enfardamento produz um fardo de tamanho padrão e definido de acordo com as características do equipamento adquirido e isso influenciará o tipo de estrutura da fase de desfibramento do palhiço.

O palhiço que chega na unidade industrial vem em veículos de carroceria e devem ser descarregados no pátio de bagaço com auxílio de uma pá carregadora. Destacado-se que este equipamento faz parte do sistema de manuseio de bagaço já existente na agroindústria. Neste sentido só deverá ser computado o custo da operação.

Como o material chega na forma de fardos o mesmo deverá sofrer um processo de desfardamento ( $X_4$ ), desestruturando a compactação dando maior mobilidade de

manuseio. Esta operação poderá ser executada acoplada na fase da operação de desfibramento em um mesmo sistema operacional.

Em seguida o material deverá seguir para o desfibrador de palhiço ( $X_5$ ) para adequá-lo as exigências do tamanho do particulado para alimentar as caldeiras de produção de vapor.

O sistema de manuseio do palhiço desfibrado poderá ser realizado pela própria pá carregadora de bagaço ou por esteira que alimente a esteira de retorno de bagaço.

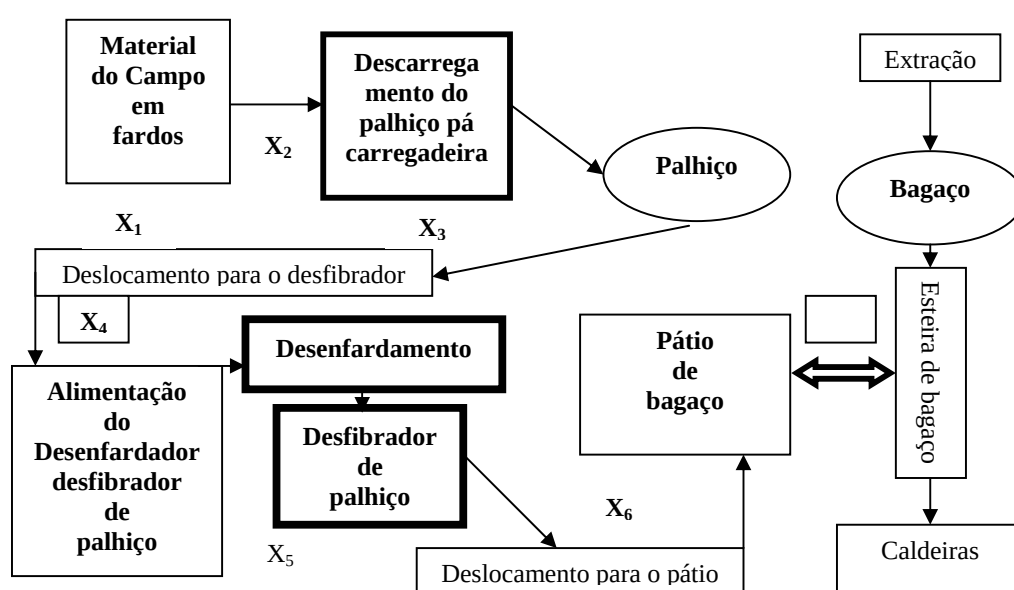


Figura 19: Diagrama de bloco das operações unitárias envolvidas no sistema de recolhimento de palhiço em fardos.

### 3.3.5.6. Equações restritivas do palhiço do sistema de recolhimento em fardos

Com base nestas premissas anteriormente mencionadas e segundo o diagrama de blocos das operações unitárias envolvidas, (figura 19), foi possível elaborar as equações de restrições, que são:

$X_1$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%) a ser descarregado, em tonelada.

- $a_1$  - Custo operacional de descarregamento do palhiço do veículo para o pátio de bagaço, em R\$/t.
- $X_2$  - Não se aplica pois a operação unitária não é necessária
- $X_3$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), em tonelada.
- $c_1$  - Não se aplica pois a própria pá carregadeira, existente no pátio, poderá ser empregada na operação otimizando sua utilização.
- $c_2$  - custo operacional de alimentação do sistema de desfardamento / desfibramento com a pá carregadeira, em R\$/t.
- $X_4$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), e de acordo com as características do fardo, em tonelada.
- $d_1$  - Custo de aquisição e instalação do sistema de desfardamento do palhiço, em R\$/t.
- $d_2$  - Custo operacional do sistema de desfardamento do palhiço em R\$/t.
- $X_5$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), compatível com a fase de desfardamento, em tonelada.
- $e_1$  - Custo de aquisição e instalação do sistema de desfibramento do palhiço, em R\$/t.
- $e_2$  - Custo operacional do sistema de desfibramento do palhiço em R\$/t.
- $X_6$  - Quantidade máxima e mínima do potencial de palhiço disponível por tonelada de cana em função do percentual a ser recolhido (30%; 50% ou 70%), em tonelada.
- $f_1$  - Custo de aquisição do sistema de manuseio de palhiço, em R\$/t.
- $f_2$  - Custo de transporte do palhiço desfibrado do pátio de bagaço para esteira de retorno de bagaço, em R\$/t.

### 3.5. Cálculo do potencial de geração de energia do palhiço com relação ao bagaço

Para avaliar se é vantajoso o aproveitamento do palhiço como fonte energética complementar ao bagaço e se é possível o aproveitamento do palhiço posto no pátio da unidade industrial remunerar a aquisição dos equipamentos para compor o processo tecnológico de adequação o tamanho do palhiço para ser agregado ao bagaço na cogeração e sem ter em conta a vantagem da melhoria da qualidade ambiental pela queima controlada do

resíduo da colheita ao invés da pré operação de queimada na lavoura, foi desenvolvida a equação a seguir para ser empregada pelo setor sucroalcooleiro em função das suas características locais e regionais.

Tendo com base as constantes:

$$1\text{kJoule/seg} = 1\text{kWatt}$$

$$1\text{MWatt (MW)} = 10^6 \text{ watt}$$

$$\mu = \text{rendimento de transformação da turbina (0,20 a 0,25)}$$

$$4,18\text{kJ/kcal ou Mj/Mcal}$$

$$\text{Poder Calorífico do Bagaço} = 1.800\text{kcal/kg (1.800Mcal/t)} \Rightarrow \text{Peres (1978)}$$

$$\text{Pcp} = \text{Poder calorífico do palhiço em kcal/kg}$$

$$\text{Poder Calorífico do Palhiço} = 1.500\text{kcal/kg (1.500Mcal/t)} \Rightarrow \text{Adotado}$$

$$4 \text{ a } 12 \text{ toneladas de palhiço por hectare} \Rightarrow \text{Ripoli (2003)}$$

$$\text{fpr} = \text{Fração de palhiço recolhido} \Rightarrow (30\%; 50\%; 70\% \text{ e } 100\%)$$

é possível determinar a relação entre palhiço e bagaço aplicando a equação:

$$\frac{\text{tonelada de palhiço por hectare}}{\text{tonelada de cana por hectare}} = \frac{\text{TPC/ha}}{\text{TC/ha}} \quad (23)$$

onde:

$$\text{TPC/ha} = 4 \text{ a } 12 \text{ t/ha} \Rightarrow \text{Ripoli (2003)}$$

$$\text{TC/ha} = 71,3 \Rightarrow \text{Vieira (2003)}$$

Aplicando os valores mínimos e máximos que a literatura fornece é possível determinar a relação existente entre o palhiço e o bagaço tendo como base o rendimento agrícola da cana-de-açúcar construir a tabela 13 a seguir.

Tabela 13: Resultados da aplicação da equação (25) de relação bagaço/palhiço considerando a produtividade agrícola média do Estado de São Paulo de 71,3t/ha.

| TPC (t/ha) | 71.3t/ha |
|------------|----------|
| 04         | 0,056    |
| 06         | 0,084    |
| 08         | 0,112    |
| 10         | 0,140    |
| 12         | 0,168    |

TPC = Tonelada de palhiço disponível para o recolhimento por hectare, em toneladas por hectare.

No caso da unidade industrial, a mesma deverá levantar as suas características próprias e aplicar a fórmula fornecida por este estudo para poder determinar os seus próprios valores que permitirão a tomada de decisão que melhor se adapta as suas características.

### 3.5.1. Cálculo da potência gerada pelo bagaço

Com base nos valores determinados pode-se desenvolver a equação que irá possibilitar conhecer a potência a ser fornecida pelo uso do bagaço como combustível na cogeração de energia elétrica na unidade industrial.

$$P = TCH \times BAG \times PCB \times \alpha \times \Omega \times \varphi \times N \quad (26)$$

sendo:

P = Potência gerada pelo bagaço em MW

TCH = tonelada de cana por hora.

BAG = produção de bagaço por tonelada de cana em kg/t (250kg/t)

PCB = Poder Calorífico do bagaço em Mcal/t (1.800Mcal/t)

$\alpha$  = fator de conversão de trabalho em MJ/Mcal (4,18MJ/Mcal)

$\Omega$  = fator de conversão do tempo em segundo por hora (1/3.600seg/h)

$\varphi$  = fator de conversão de energia em MW/Mj/seg ( $10^{-3}$ MW/Mkj/seg)

N = rendimento do processo (turbina) em % (20 - 25%)

Deduzindo a equação (26) e eliminando os fatores iguais tem-se:

$$P = 0,5225 N \times TCH \quad (27)$$

sendo:

P = MW gerado.

N = rendimento da turbina (20 a 25%)

TCH = Tonelada de cana hora

### 3.5.2. Cálculo da potência gerada pelo palhiço

Com o mesmo tipo de raciocínio lógico é possível deduzir a equação de modelagem para o palhiço e determinar qual seria a potência a ser gerada.

$$p = TCH \times Pal \times fpr \times PCP \times \alpha \times \Omega \times \varphi \times N \quad (28)$$

sendo:

p = Potência gerada pelo palhiço em MW

TCH = tonelada de cana por hora.

PAL= produção de palhiço por tonelada de cana em kg/t

fpr = fração recolhida de palhiço, em decimal (30%; 50%; 70% e 100%)

PCP = Poder Calorífico do palhiço em Mcal/t (1.500Mcal/t)

$\alpha$  = fator de conversão de trabalho em kJ/kcal (4,18MJ/Mcal)

$\Omega$  = fator de conversão do tempo em segundo por hora (1/3.600s/h)

$\varphi$  = fator de conversão de energia em MW/KJ/s ( $10^{-3}$ MW/kJ/s)

N = rendimento do processo (turbina) em % (20 - 25%)

Deduzindo a equação (27) e eliminando os fatores iguais tem-se:

$$p = 1,16 \times 10^{-3} \times N \times TCH \times tTC \times fpr \times PCP \quad (28)$$

sendo:

p = Potência gerada pelo palhiço em MW.

N = rendimento do processo (turbina) em % (20 - 25%)

TCH = tonelada de cana por hora.

tTC = tonelada de palhiço por tonelada de cana

fpr = fração recolhida de palhiço, em décimos (30%; 50%; 70% e tendendo a100%)

PCP = Poder Calorífico do palhiço em Mcal/t (1.500Mcal/t)

Para o cálculo da potencia total a ser gerada, basta somar as duas equações (27 e 28), ou seja:

$$P_T = P + p \quad (29)$$

O diferencial de aumento devido ao palhiço pode ser calculado empregando-se a equação:

$$\Delta P_{\%} = \{(P + p) / P\} \times 100 \quad (30)$$

Substituindo na equação (30) as potências geradas pelas equações (27) e (28) que representam as potencias do bagaço e do palhiço respectivamente.

$$\Delta P_{\%} = \{(a) + (b) / (a)\} \times 100 \quad (31)$$

Obtem-se a equação (32)

$$\Delta P_{\%} = [1 + 2,22 \times 10^{-3} \times t_{TC} \times f_{pr} \times PCP] \times 100 \quad (32)$$

Para se fazer uma análise própria para cada empreendimento pode-se adotar a equação geral a seguir aplicando os dados disponíveis para cada situação agrônômica:

$$E_t = E_p + E_b = (TCH/3600) \times 4,18 \{ [TP/TC \times f_{rp} \times Q_p] + [Tb/TC \times Q_b] \} \times R \quad (33)$$

sendo:

$E_t$  = Energia gerada, em MWh

TCH = Tonelada de cana hora

$T_p$  = Tonelada de palhiço

$T_b$  = Tonelada de bagaço

$f_{rp}$  = Fração de recolhimento de palhiço, em décimos

$Q_p$  = Poder calorífico do palhiço, em Mcal/t

TC = Tonelada de cana

Qb = Poder calorífico do bagaço, em Mcal/t

R = Rendimento global da transformação calorífica em eletricidade, em décimos

(r = 0,20 a 0,25)

Como exemplo de aplicação e determinação de ordem de grandeza, tomando-se uma unidade padrão de 60TCH os valores mínimos e máximos de faturamento devido a utilização do palhiço como fonte adicional de combustível ao bagaço.

TCH = 60

$Tp/tc = 0,056 (4TP / 71,3TC)$

frp = 0,3 ou 1 (Recolhimento de 30% mínimo e tendendo a 100% máximo)

Qp = 1.500Mcal/t

R = rendimento de transformação = 0,20

Tb = não esta sendo considerado (só palhiço)  $\longrightarrow$  Tb = zero e Eb = zero

Safra = 200 dias

$$Et = Ep = (TCH/3600) \times 4,18 [TP/TC \times frp \times Qp] \times R \quad (34)$$

Aplicando os valores na equação reduzida, tem-se:

$$Ep = (1 / 3.600) \times 4,18 (0,056 \times 0,3 \times 1.500) \times 0,20 = 0,005866MW/TCH \text{ (mínimo)}$$

$$Ep = (1/3600) \times 4,18 (0,168 \times 1 \times 1.500) \times 0,20 = 0,0585MW/TCH \text{ (máximo)}$$

Complementando a equação para se conhecer a energia total produzida na safra - ETS, com referência ao uso somente do palhiço, nas condições, supra citadas, obtêm-se:

$$ETS = 0,005866 \times 24 \times 200 \times 60 = 1.689,4MWh \text{ (mínimo)}$$

$$ETS = 0,0585 \times 24 \times 200 \times 60 = 16.848,0 \text{ (máximo)}$$

$$\text{Faturamento Bruto Safra} = ETS \times R\$Proinfra$$

$$FBS = 1.689,4 \times 89,59 = R\$151.354,00 \text{ (mínimo)}$$

$$FBS = 16.848,0 \times 89,59 = R\$1.509.412,32 \text{ (mínimo)}$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição da “função objetivo” e das “equações de restrição” o estudo concentrou-se na busca da solução por meio de uma análise matemática processada mediante utilização de algoritmos, que são métodos sistêmicos de busca de solução.

Na tabela 14 são encontrados o resumo de dados utilizados nas simulações.

Tabela 14: Resumo das equações de restrição das rotas adotadas para uma unidade industrial idealizada de capacidade de processamento 60 TCH - toneladas de cana por hora, ou seja uma Destilaria de 120.000 de álcool por dia.

| ROTA<br>TECNOLÓGICA<br>Sistema de colheita e<br>Percentual de<br>recolhimento | ROTA<br>Colheita<br>integral | ROTA<br>Granel<br>30% | ROTA<br>Granel<br>50% | ROTA<br>Granel<br>70% | ROTA<br>Fardo<br>30% | ROTA<br>Fardo<br>50% | ROTA<br>Fardo<br>70% |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>X<sub>1</sub></b> (t) safra<br>Descarregamento cana/palhiço                | - 0 -                        | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.316<br>33.936      | 4.848<br>14.544      | 8.080<br>24.240      | 11.316<br>33.936     |
| <b>a</b> (R\$/t)<br>custo operacional<br>pá carregadora                       | - 0 -                        | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                 | 1,04                 | 1,04                 |
| <b>X<sub>2</sub></b> (t) safra<br>Mesa limpeza a seco                         | 16.160<br>48.480             | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                | 0                    | - 0 -                |
| <b>b<sub>1</sub></b> (R\$/t)<br>Custo equipamento - mesa                      | 0,37                         | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                | 0                    | - 0 -                |
| <b>b<sub>2</sub></b> (R\$/t)<br>Custo operacional - mesa                      | 8,22 x 10 <sup>-4</sup>      | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                | - 0 -                | - 0 -                |
| <b>X<sub>3</sub></b> (t) safra<br>Transferência Palhiço<br>Mesa / desfibrador | 16.160<br>48.480             | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     | 4.848<br>14.544      | 8.080<br>24.240      | 11.3160<br>33.936    |
| <b>c<sub>1</sub></b> (R\$/t)<br>custo do capital<br>pá carregadora            | 0,38                         | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                 | 0,38                 | 0,38                 |
| <b>c<sub>2</sub></b> (R\$/t)<br>custo operacional<br>pá carregadora           | 1,04                         | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                 | 1,04                 | 1,04                 |

Continua

## Continuação

| ROTA<br>TECNOLÓGICA<br>Sistema de colheita e<br>Percentual de<br>recolhimento | ROTA<br>Colheita<br>integral | ROTA<br>Granel<br>30% | ROTA<br>Granel<br>50% | ROTA<br>Granel<br>70% | ROTA<br>Fardo<br>30%  | ROTA<br>Fardo<br>50%  | ROTA<br>Fardo<br>70%  |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>X<sub>4</sub></b> (t) safra<br>Desenfardamento<br>do palhico               | - 0 -                        | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     |
| <b>d<sub>1</sub></b> (R\$)<br>custo do capital desenfardador                  | - 0 -                        | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | $2,6 \times 10^{-3}$  | $2,6 \times 10^{-3}$  | $2,6 \times 10^{-3}$  |
| <b>d<sub>2</sub></b> (R\$/t)<br>custo operacional desenfardador               | - 0 -                        | - 0 -                 | - 0 -                 | - 0 -                 | $2,6 \times 10^{-4}$  | $2,6 \times 10^{-4}$  | $2,6 \times 10^{-4}$  |
| <b>X<sub>5</sub></b> (t) safra<br>Desfibrador Palhico                         | 16.160<br>48.480             | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     |
| <b>e<sub>1</sub></b> (R\$)<br>custo do capital desfibrador                    | $2,6 \times 10^{-2}$         | $2,6 \times 10^{-2}$  | $2,6 \times 10^{-2}$  | $2,6 \times 10^{-2}$  | $2,6 \times 10^{-2}$  | $2,6 \times 10^{-2}$  | $2,6 \times 10^{-2}$  |
| <b>e<sub>2</sub></b> (R\$/t)<br>custo operacional desfibrador                 | $1,56 \times 10^{-4}$        | $1,56 \times 10^{-4}$ | $1,56 \times 10^{-4}$ | $1,56 \times 10^{-4}$ | $1,56 \times 10^{-4}$ | $1,56 \times 10^{-4}$ | $1,56 \times 10^{-4}$ |
| <b>X<sub>6</sub></b> (t) safra<br>Transferência<br>Palhico Desfibrado         | 16.160<br>48.480             | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     | 4.848<br>14.544       | 8.080<br>24.240       | 11.3160<br>33.936     |
| <b>f<sub>1</sub></b> (R\$)<br>custo do capital<br>pá carregadora              | 0,38                         | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                  | 0,38                  |
| <b>f<sub>2</sub></b> (R\$)<br>custo operacional<br>pá carregadora             | 1,04                         | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  | 1,04                  |

Com base na equação objetiva e as equações de restrição e aplicando os valores por meio de sistema computacional pode-se obter os valores que irão orientar a tomada de decisão de ordem gerencial quanto à rota tecnológica mais adequada tendo como base o menor custo.

Aplicando a planilha de cálculo “*Microsoft Excel*” no tabela 14 obtiveram-se as tabelas 15; 16; 17 e 18, a seguir, que possibilitarão a interpretação da aplicabilidade da simulação na tomada de decisão.

Com os dados obtidos do custo total de cada rota tecnológica foi possível obter o valor do faturamento bruto potencial da correspondente comercialização da energia elétrica no mercado para a rede pública tendo como base o valor de R\$89,59 fornecido pela tabela Proinfra de 2003 e empregando o fator 0,11 de conversão de energia calorífica em energia elétrica pelo sistema turbina / alternador.

$$Fb = TPS \times 0,11Mw \times C \times PROINFRA \quad (35)$$

sendo:

Fb = Faturamento bruto em cada rota tecnológica, expresso em R\$/Mw

TPS = tonelada de palhiço disponível na safra em t.

0,11Mw = fator de transformação de energia calorífica em elétrica.

(4,18Jcal / 3600 segundos = 0,11MW).

C = Caloria do bagaço ou do palhiço

(Bagaço = 1800kcal/kg; Palhiço = 1500kcal/kg )

PROINFRA = Valor de remuneração pago pela rede pública em R\$/MWh

Com os dados obtidos dos custos de cada rota tecnológica torna-se possível calcular o valor unitário expresso em tonelada de palhiço por hora - TPH. Para isso o valor obtido deve ser dividido pelo dias de safra, por 24 horas e por 60TCH, ou seja:

$$VUH = V_{60TCH} / \text{quantidade de palhiço potencial disponível}$$

sendo:

VUH = Valor Unitário por Hora, expresso em R\$TPH

TPH = Tonelada de Palhiço por Hora

Estes dados calculados permitiram montar a tabela 15 de modo a consolidar a visualização das situações e possibilitar a realização das interpretações necessárias para a tomada de decisão gerencial.

Com os dados de faturamento potencial e custo da rota tecnológica de adequação do palhiço para ser utilizado como combustível adicional ao bagaço pode-se determinar a relação custo/benefício, apresentados na tabela 16.

$$IRT = Fb - C / Fb$$

sendo:

IRT = Índice da Rota Tecnológica

C = Custo de adequação do palhiço, expresso em R\$/t

Fb = Faturamento Bruto, expresso em R\$/Mw

Deste modo é possível conhecer o índice da relação do melhor custo benefício – IRT – Índice da Rota Tecnológica, para cada uma e assim tomar as decisões gerenciais necessárias.

Caso, o administrador queira fazer cenário, variando os valores de custos e de massa em função de acontecimentos característicos de sua unidade de produção, como, por exemplo, aproveitar equipamento existente que podem ser ativados com baixos custos, basta reajustar o valor unitário e aplicar no campo do quesito a ser alterado e automaticamente a planilha irá oferecer o novo dado.

Deste modo o uso de equações de simulação atrelada à planilha de cálculo eletrônica do “*Microsoft excel*”, mostrou ser um instrumento de gestão na tomada de decisão gerencial do processo operacional.

Entretanto, somente os valores de avaliação industrial de adequação do palhiço para ser utilizado como fonte adicional ao bagaço para fins de cogeração não são suficientes para a decisão final. Assim a estes valores é necessário adicionar os valores de custo de se colocar o palhiço na unidade industrial em função de cada tratamento, ou seja, sistema de recolhimento.

Neste sentido recorrendo-se dos valores fornecidos por Ripoli (2002) foi possível montar a tabela 19 que dá uma visão total do processo para se utilizar o palhiço como fonte de biomassa e comprovados por Ripoli (2004).

Porém os valores de Ripoli (2002) são expressos em EBP - Equivalente Barril de Petróleo e os valores obtidos pelo estudo em questão, são expressos em Tonelada de Palhiço - TP.

Para que os valores apresentem a mesma base e permitam uma avaliação, os mesmos precisam ser transformados em R\$ por tonelada de palhiço.

#### 4.1. Resultados quanto a aplicação da equação objetivo

Com base nos dados de campo e a aplicação dos cálculos complementares sobre os dados resultantes da equação objetivo e das equações restritivas de cada rota tecnológica, utilizando-se da planilha de cálculo “*Microsoft excel*”, foi possível montar as tabelas 15; 16; 17; 18 e 19, a seguir onde são apresentados os resultados dos custos de cada cenário proposto de adequação do palhiço, expresso em R\$, para alimentar as caldeiras de geração de vapor que irão acionar as turbinas e alternadores de transformação de energia elétrica, para uma unidade industrial padrão de 60TCH tomada como base para os estudos.

Além disso, também é apresentado o potencial de faturamento em energia elétrica que cada rota tecnológica poderá produzir, com base na tabela Proinfra, (tabela 5), expresso em R\$ na tabela 16, bem como o índice da relação custo/benefício no tabela 18 de modo a permitir estabelecer uma escala decrescente de valores que irá possibilitar a tomada de decisão da rota tecnológica mais adequada em termos econômicos para adequar o palhiço para ser utilizado como fonte de energia adicional ao bagaço, tabela 15.

Finalmente, anexando os valores obtidos nos estudos de determinação dos custos de processamento agrícola para cada rota tecnológica para colocar o palhiço no pátio da unidade industrial realizados pela Cosan-SP por Ripoli (2002) e Ripoli (2004) aos valores obtidos em cada rota tecnológica obtidos por este estudo foi possível determinar os valores totais envolvidos pelo setor agrícola e industrial os quais são apresentados na tabela 19.

Tabela 15: Resumo dos resultados com referência ao custo do investimento do processo de adequação do palhiço para uma unidade industrial padrão de 60TCH.

| Rota Tecnológica | Colheita integral<br>(R\$) | Granel 30%<br>(R\$) | Granel 50%<br>(R\$) | Granel 70%<br>(R\$) | Fardo 30%<br>(R\$) | Fardo 50%<br>(R\$) | Fardo 70%<br>(R\$) |
|------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Mínimo           | 52.309,48                  | -0-                 | -0-                 | -0-                 | -0-                | -0-                | -0-                |
| Máximo           | 156.928,45                 | -0-                 | -0-                 | -0-                 | -0-                | -0-                | -0-                |
| Mínimo           | -0-                        | 18.937,02           | 31.561,69           | 44.201,99           | -0-                | -0-                | -0-                |
| Máximo           | -0-                        | 56.811,69           | 94.685,08           | 132.559,11          | -0-                | -0-                | -0-                |
| Mínimo           | -0-                        | -0-                 | -0-                 | -0-                 | 18.949,62          | 31.582,71          | 44.231,43          |
| Máximo           | -0-                        | -0-                 | -0-                 | -0-                 | 56.848,87          | 94.748,12          | 132.647,37         |

TCH = Tonelada de Cana por Hora

Tabela 16: Resumo dos resultados com referência ao faturamento bruto da comercialização da energia elétrica com base na tabela Proinfra, correspondente ao processo de adequação do palhiço de uma unidade industrial de 60TCH.

| Rota Tecnológica | Colheita integral | Granel 30% | Granel 50% | Granel 70% | Fardo 30%  | Fardo 50%  | Fardo 70%  |
|------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                  | (R\$)             | (R\$)      | (R\$)      | (R\$)      | (R\$)      | (R\$)      | (R\$)      |
| Mínimo           | 132.659,57        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        |
| Máximo           | 397.978,70        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        | -0-        |
| Mínimo           | -0-               | 39.797,87  | 66.329,78  | 92.894,53  | -0-        | -0-        | -0-        |
| Máximo           | -0-               | 119.393,61 | 198.989,35 | 278.585,09 | -0-        | -0-        | -0-        |
| Mínimo           | -0-               | -0-        | -0-        | -0-        | 39.797,87  | 66.329,78  | 92.894,53  |
| Máximo           | -0-               | -0-        | -0-        | -0-        | 119.393,61 | 198.989,35 | 278.585,09 |

TCH = Tonelada de Cana por Hora

Tabela 17: Resumo dos resultados com referência ao custo unitário, correspondente ao processo de adequação do palhiço, expresso em R\$/TPH.

| Rota Tecnológica                                 | Colheita integral | Granel 30% | Granel 50% | Granel 70% | Fardo 30% | Fardo 50% | Fardo 70% |
|--------------------------------------------------|-------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Sistema de colheita e Percentual de recolhimento | (R\$/TPH)         | (R\$/TPH)  | (R\$/TPH)  | (R\$/TPH)  | (R\$/TPH) | (R\$/TPH) | (R\$/TPH) |
| Integral                                         | 3,24              | -0-        | -0-        | -0-        | -0-       | -0-       | -0-       |
| Granel                                           | -0-               | 3,9062     | 3,9062     | 3,9062     | -0-       | -0-       | -0-       |
| Fardos                                           | -0-               | -0-        | -0-        | -0-        | 3,9088    | 3,9088    | 3,9088    |

TPH = Tonelada de palhiço por Hora

Tabela 18: Resumo dos resultados com referência ao índice da relação do custo de implantação do processo de adequação do palhiço - IRT e do faturamento bruto para uma unidade industrial padrão de 60TCH.

| Rota Tecnológica                                 | Colheita integral | Granel 30% | Granel 50% | Granel 70% | Fardo 30% | Fardo 50% | Fardo 70% |
|--------------------------------------------------|-------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Sistema de colheita e Percentual de recolhimento |                   |            |            |            |           |           |           |
| Integral                                         | 0,3943            | -0-        | -0-        | -0-        | -0-       | -0-       | -0-       |
| Granel                                           | -0-               | 0,5242     | 0,5242     | 0,5242     | -0-       | -0-       | -0-       |
| Fardos                                           | -0-               | -0-        | -0-        | -0-        | 0,5239    | 0,5239    | 0,5239    |

TCH = Tonelada de Cana por Hora

IRT = Índice da Rota Tecnológica

Ao analisar a tabela 17 nota-se que a rota tecnológica de processamento do palhiço enfardado ou a granel na industria, não apresenta diferença representativa, chegando a ser da ordem R\$ 0,0026 por tonelada de palhiço, pois o custo da operação unitária do desenfundamento fica bastante diluído por ser de pouco valor adicional.

Entretanto, a rota tecnológica da colheita integral é a que fica caracterizada pelo estudo como sendo a de menor custo -  $Z_I$ , com valor da ordem de R\$ 3,24 por tonelada de palhiço processada por hora - TPH na indústria para fins de cogeração enquanto que, a do sistema enfardado é da ordem de R\$ 3,9062 TPH e a granel de R\$3,9088 TPH, a adoção de um ou de outros sistema dependerá do custo do palhiço recebido na unidade industrial, conseqüentemente das distâncias da lavoura que envolve custo de transporte agrícola, bem como da eficiência do sistema operacional.

Ao analisar o índice do custo benefício da rota tecnológica - IRT, na tabela 18, de cada sistema de processamento do palhiço, nota-se que os sistema em termos industriais também não identifica diferenças sensíveis, apresentando o IRT de 0,3943 para o sistema de colheita integral, 0,5242 para colheita a granel e 0,5239 para em fardos.

Entretanto, estes valores são positivos mostrando que em apenas parte de uma safra o capital investido poderá ser recuperado, independentemente da adaptação da unidade industrial para cada rota tecnológica.

Quanto a quantidade a ser recolhida nos sistemas a granel ou enfardado variando na faixa de 30%; 50% ou 70% a equação objetivo não apresentou valores diferenciados.

Neste sentido, a recomendação será a de se adotar um recolhimento que garanta uma produtividade agrícola, pois, ao nível de adequação industrial, não apresentou diferença nos custos de processamento do palhiço para fins de uso do mesmo para fins de cogeração como fonte adicional de energia complementar ao bagaço.

Neste sentido fica demonstrado que a aplicação da modelagem matemática linear pode ser empregada como instrumento de decisão gerencial na tomada de decisão.

Como Ripoli (2002) apresenta custos da colocação o palhiço de diferentes formas na unidade industrial, aplicando-se este valores nos custos obtidos por este estudo foi possível determinar qual será a rota tecnológica sobre o ponto de vista do setor agrícola e também do setor industrial, os valores estão consolidados na tabela 19.

Tabela 19: Custos estimados das rotas tecnológicas de colheita integral de cana, recolhimento a granel e em fardos em R\$/EBP- Equivalente barril de petróleo e em R\$/TP- Tonelada de palhiço. Áreas agrícola, industrial e total.

| Tratamento | Agrícola | Agrícola | Industria | Industria | Total   | Total  |
|------------|----------|----------|-----------|-----------|---------|--------|
|            | R\$/EBP  | R\$/TP   | R\$/EBP   | R\$/TP    | R\$/EBP | R\$/TP |
| Fardo      | 14,4     | 21,06    | 3,9408    | 3,9088    | 21,34   | 24,97  |
| Granel     | 18,3     | 26,06    | 3,3386    | 3,9062    | 26,19   | 30,64  |
| Integral   | 7,5      | 11,03    | 2,77      | 3,24      | 12,02   | 14,27  |

EBP = Equivalente Barril de Petróleo

TP = Tonelada de Palhiço

Com a adição custo -  $Z_A$  obtido pelos estudos de Ripoli (2003) na Cosan-SP expressos em R\$/EBP (Equivalente Barril de Petróleo) e transformados para R\$/TP (tonelada de palhiço) aos custos -  $Z_I$  determinados por este estudo foi possível conhecer a rota tecnológica de menor custo -  $Z_{AI}$  em termos empresariais independentemente do setor onde o resíduo agrícola é coletado ou adequado para ser utilizado a fins de cogeração e que poderá propiciar ganhos adicionais com a comercialização da energia elétrica, para a rede pública, gerada com o uso da biomassa do setor sucroalcooleiro, bagaço e palhiço.

Mostra também que a avaliação parcial leva a tomada de decisão diferente de quando se avalia o todo.

Assim, este estudo, a análise do tabela 19, nesta primeira parte permite inferir que a rota tecnológica de utilização do palhiço para fins de cogeração deverá ser primeiro o sistema em colheita de cana integral, seguido pelo sistema de colheita em fardos e a granel.

Face ao exposto uma unidade que processe 100TCH o uso do palhiço e do bagaço podem gerar as seguintes alternativas de potência, são apresentadas na tabela 20:

Tabela 20: Potência gerada (KW) para 100TCH, nos diferentes usos possíveis da biomassa.

| Uso da biomassa           | Potência (MW) | Energia gerada na safra (MWh) | Faturamento bruto safra (R\$) |
|---------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bagaço                    | 10,48         | 50.300                        | 4.506.735,00                  |
| Palhiço (Mínimo)          | 0,58          | 2.800                         | 252.291,00                    |
| Palhiço (Máximo)          | 5,85          | 28.000                        | 2.522.909,00                  |
| Bagaço + Palhiço (Mínimo) | 12,40         | 59.520                        | 5.347.704,00                  |
| Bagaço + Palhiço (Máximo) | 16,33         | 78.380                        | 7.042.582,00                  |

TCH = Tonelada Cana Hora

Tabela 21: Resultados obtidos da aplicação da fórmula "c" deduzida por este estudo aplicando-se os valores percentuais variáveis de recolhimento do palhiço da lavoura (fpr%) em função da relação percentual de toneladas de palhiço por tonelada de cana (tTC%) também deduzida neste estudo, considerando o Poder Calorífico do palhiço de 1.500kcal/kg.

| fpr (%) | 30%  | 50%  | 70%  | 100% |
|---------|------|------|------|------|
| tTC(%)  |      |      |      |      |
| 0,056   | 1,06 | 1,09 | 1,13 | 1,19 |
| 0,084   | 1,08 | 1,14 | 1,20 | 1,28 |
| 0,112   | 1,11 | 1,19 | 1,26 | 1,37 |
| 0,140   | 1,14 | 1,23 | 1,33 | 1,47 |
| 0,168   | 1,17 | 1,28 | 1,39 | 1,56 |

Transformando estes valores em percentuais de aumento de potência de geração de energia que o palhiço irá proporcionar em relação ao bagaço obtêm-se a tabela 22 com o emprego do programa “*Microsoft Excel*”

Tabela 22: Valores percentuais de incremento de potência devido ao uso do palhiço como fonte adicional de combustível, do tipo biomassa, ao bagaço.

| fpr (%) | 30%   | 50%   | 70%   | 100%  |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| tTC(%)  | (%)   | (%)   | (%)   | (%)   |
| 0,056   | 5,59  | 9,32  | 13,05 | 18,65 |
| 0,084   | 8,39  | 13,99 | 19,58 | 27,97 |
| 0,112   | 11,19 | 18,65 | 26,11 | 37,30 |
| 0,140   | 13,99 | 23,31 | 32,63 | 46,62 |
| 0,168   | 16,78 | 27,97 | 39,16 | 55,94 |

#### 4.2. Resultados da avaliação da relação energética entre o palhiço e o bagaço

Ao analisar a tabela 20 nota-se que o potencial gerado por uma unidade industrial que processa 100TCH e que processa todo o bagaço resultante, permite a geração de 10,48MW o que possibilita o faturamento bruto, se toda a energia oriunda desta biomassa fosse comercializada para a rede pública com bases nos valores preconizados pela tabela Proinfra de R\$4.506.755,00.

Como no geral as unidades de produção de açúcar e de álcool consomem 50% da energia cogerada, sobraria o equivalente a R\$2.253.367,50.

Com o uso adicional do palhiço como combustível adicional ao bagaço haveria um incremento de faturamento bruto mínimo de R\$252.291,00 e no máximo de R\$2.522.909,00, ou seja, poderia dobrar o faturamento com a comercialização da energia cogerada para a rede pública e até mesmo remunerar o fornecedor de cana-de-açúcar com parte deste faturamento por não queimar o canavial para a colheita.

Além disso, a adoção do uso do palhiço como combustível renovável permitirá enquadrar a empresa no sistema administrativo MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo preconizado pelo Protocolo de Kyoto que está para ser efetivado como lei mundial a partir do início do ano de 2005 pela ONU - Organização das Nações Unidas.

Neste sentido, o uso do palhiço além de evitar a pré-operação de queimada da cana-de-açúcar para a colheita, e suas conseqüência positivas para a saúde e o ambiente, irá propiciar condições para a comercialização do "commodity" ambiental oriunda da aplicação do MDL.

Ao se analisar a tabela 21 nota-se que os valores percentuais de incremento de potência devido ao uso do palhiço como fonte adicional de combustível, do tipo biomassa, ao bagaço demonstram que o recolhimento do resíduo agrícola em variedades de baixíssima produção de palhiço, ou seja, da ordem de 4 toneladas por hectare, mesmo assim permite agregar no mínimo de 5,59% a mais de energia para fins de cogeração.

Nota-se também que quando a unidade agrícola apresenta variedades de alta produção de resíduos os ganhos adicionais em energia podem chegar a ordem de 55,94%.

Neste sentido, independentemente de uma maior ou menor quantidade de palhiço na lavoura existe um grande potencial de energia a ser utilizada para fins de cogeração não sendo mais recomendado a pré-operação de queimada dos canaviais para a colheita, permitindo a aplicação da legislação brasileira que regulamenta as queimadas e que possibilitará a melhoria da qualidade ambiental com conseqüente melhoria da redução das doenças causadas pelas queimadas ao ser humano, bem como da adequação do setor para atender o Protocolo de Kyoto, que passa a vigorar mundialmente a partir de fevereiro de 2005, sem, contudo haver perdas econômicas.

Além do mais, a disponibilidade deste tipo de biomassa - palhiço, está acessível no período da safra que corresponde ao das secas, onde as chuvas são restritas coincidindo como período em que os reservatórios de água que produzem a energia hidroelétrica encontram-se nos seus níveis mínimos.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo mostrou ser a rota tecnológica do sistema de colheita integral da cana-de-açúcar, com limpeza a seco na unidade industrial, o cenário mais econômico, seguido do sistema de recolhimento em fardos e a granel.

A variação da quantidade de palhiço recolhida não influenciou os custos operacionais de adequação o tamanho do particulado nos sistemas de recolhimento em fardos e a granel.

O faturamento bruto permite amortizar o custo de adequação do palhiço e de matérias estranhas vegetais da colheita em menos de uma safra.

O potencial de incremento de energia de biomassa gerada pelo uso do palhiço adicional ao bagaço varia de 5,59% a 55,94% e permite auferir recursos financeiros da comercialização da energia elétrica cogerada para as concessionárias.

As equações oferecidas pelo estudo permitem aplicar valores característicos e próprios de cada empreendimento permitindo ao usuário refazer os cálculos e determinar os valores para sua análise específica auxiliando na análise de decisão gerencial de cada situação.

A análise do sistema de equações do modelo matemático do processo operacional de preparo do palhiço com o uso de simulação atrelada a planilha de cálculo eletrônica, indicou ser uma metodologia adequada para a decisão gerencial das alternativas para o processo operacional de adequação do tamanho do particulado do palhiço.

## 6. RECOMENDAÇÕES

- Rever a equação de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose- PCTS e incluir valor a fração fibra (biomassa) da matéria-prima, para fins de cogeração;
- Remunerar melhor o fornecedor de cana devido a comercialização à rede pública de energia elétrica cogerada pela termo-elétrica de biomassa canavieira;
- Remunerar melhor o cortador de cana pelo corte sem a pré operação de queimada;
- Eliminar as queimadas de cana-de-açúcar na busca de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL preconizados pelo Protocolo de Kyoto permitindo estruturar a comercialização do crédito de carbono;
- Rever o valor da remuneração pela rede pública à unidade de cogeração, tabela do programa de incentivo de fontes alternativas, que usa a biomassa da cana-de-açúcar, de modo a remunerar o capital investido na termo-elétrica e permitir o repasse correspondente à participação do industrial, do fornecedor de cana e do cortador, estimulando o uso para atingir os 1.100MW previsto para a comercialização para a safra 2005.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALAD, R. **Perspectivas de geração termoeletrica no Brasil e emissões de CO<sub>2</sub>**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1999.

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOCA, S.; SPERANDIO, M. L.; ARCHETI, L. L.; Resíduo de cana crua. Revista Açúcar & Álcool, São Paulo, v.67, n.2, p.23-25, 1993.

AGUILAR, A.; PENA, V.; FRIEDDMAN, P.B. La combustion de los residuos agrícolas de caña de azúcar. Parte I : características de los combustibles. Havana : Cuba Azúcar, 1989. 40 p.

ALCOOBRÁS. Reportagem de Capa: Possibilidade de abertura do mercado de carbono estimula investimento em co-geração de energia. **Revista Alcoobrás**; São Paulo; ano VII - nº 80 – jul./ago., 2003.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**. Rio de Janeiro - RJ, LTC livros Técnicos e Científicos, 1990.

ANDRADE, L.A.B. D.; CORREA, J.B.D.; ANJOS, I.A. dos. Efeitos dos restos culturais da colheita da cana-de-açúcar com e sem queima prévia na incidência de plantas infestantes e na produtividade de soqueira. Revista STAB. Açúcar, Álcool e subprodutos, Piracicaba, v.8, no.1, p 34-35, set./out. 1999.

ANDRIETTA, M.G.S. Novas alternativas para subprodutos da cana-de-açúcar. Revista **STAB, Anais SECAP'98**, p.10-12, 1998.

BAGATEX. Analysis and prospects of rational utilization of sugar cane bagasse: relatório interno. Ribeirão Preto, 1984. 8 p.

BEAUCLAIR, E.G, F.; PENTEADO, C. R. et KAZAN, B. Planejamento estratégico otimizado da agroindústria sucroalcooleira: Uso de um sistema computacional de suporte de decisões. In IV Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba.

BIAGI FILHO, M. Participação das unidades industriais no desenvolvimento local. In IV Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba, SECAPI, **Anais**, ESALQ/USP. Piracicaba, p. 56-57, 1999.

BOHM, G.M. Queima de cana-de-açúcar e saúde humana. Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba v.16, n.4, p.40-41, mar./abr. 1998.

BRASIL PORTARIA no. 212 do M.M.E - Ministério de Minas e Energia. 25 de julho de 2000, Diário Oficial da União - D.O. seção 1, p. 27 26/07/2000c.

BRASIL. DECRETO no. 2.655 do M.M.E - Ministério de Minas e Energia que regulamenta o mercado atacadista de energia elétrica. 02 de julho de 1998.

BRASIL. DECRETO no. 3.371 que institui no M.M.E – Ministério de Minas e Energia o programa prioritário de termoeletricidade. 24 de fevereiro de 2000a.

BRASIL. DECRETO no. 3.520 que dispõe sobre a estrutura e o funcionamento do CNPE. 21 de junho de 2000b.

BRASIL. LEI no. 9.991 que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética por parte das empresas concessionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. 24 de julho de 2000, D.O. seção 1, p. 01, v. 138, no. 142 26/07/2000d.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Coordenadoria de Agroenergia. Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas. Brasília, p.166, 1984.

BRITO, J.O. Energia de biomassa: uma alternativa para os trópicos. In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENERGIA, 3, 1986, Guatemala. **Anais...** São Paulo: Confea-Crea, 1986. 1-20p.

BRYMAN, A. Research methods and organization studies. Unwin Hyman, Londres, 1989.

CAMPOS, M. S.; MARCONATO, A. Sistema cana crua x cana queimada CLASS 2000. Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba v.12, n.3, p.10-16, jan./fev. 1994.

CANÇADO, J.E.D. **A poluição atmosférica e sua relação com a saúde humana na região canavieira de Piracicaba - SP.** 2003. 201 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CARVALHO, G.J. de. **Análise da potencialidade autoalelopática de restos culturais da colheita de cana-de-açúcar.** Lavras, 1996. 72p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras. 1996.

COELHO, S.T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir da biomassa: Um modelo para o estado de São Paulo**. 1999. 200 p. Tese (Doutorado) - Programa interunidades de Pós-graduação em energia - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA AÇÚCAR ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA - COPERUCAR - PROJETO BRA/96/G31. Impactos ambientais do uso em larga escala de sistemas BIG-GT na indústria da cana-de-açúcar. Geração de Energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.16, n.5, p.36-39, mai/jun. 1998.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA AÇÚCAR ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA - COPERUCAR - PROJETO BRA/96/G31. Conservação do Solo. Cenbio Notícias, Brasília, v.4, n.12, 2001. Disponível em <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. Acesso em: 05 nov. 2001a.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA AÇÚCAR ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA - COPERUCAR - PROJETO BRA/96/G31. Efeito agrônômico da palha remanescente de canaviais colhidos mecanicamente sem a utilização da queimada. Cenbio Notícias, Brasília, v.4, n.12, 2001. Disponível em <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. Acesso em: 05 nov. 2001b.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA AÇÚCAR ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA - COPERUCAR. **Corte manual de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1986, 8 p. (Série Segurança Agroindustrial).

DELGADO, A. A. Os efeitos da queima dos canaviais. Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v.3, n.6, p.42-45, jul./ago. 1985.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques. Nogent-Sur-Marne, v.172, p.33-55, Mar./Avr. 1977.

ESTON, N. E. Etanol o combustível despoluente. **Revista. AEA - Associação Brasileira de Energia Alternativa** n.º. 3/4 v. 5 mai./jul. 1990.

FELLER, C. 12<sup>o</sup> Encontro Internacional de Substâncias Húmicas em São Pedro-SP, IHSS Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas. São Pedro-SP, 26 a 30 de julho de 2004.

FRANCO, A.R. Aspectos médicos e epidemiológicos da queimada de canaviais na região de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto: USP, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Centro de Estudos Brasileiros, 1992.

FRANCO, F.N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhicho de cana-de-açúcar (saccharum spp) a granel** 2003. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

FURLANI NETO, V.I.; RIPOLI, T.C.C. et VILLA NOVA, N.A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v.15, n.4, p. 24-27, mar./abr., 1997.

GERMEK, H.A. Tecnologia e novos produtos, armas dos fabricantes de equipamentos no proálcool. p. 4 - 26, **Revista do álcool**, São Paulo set./out., ano 4, n. 31, 1985.

GRANER, E.A. Agricultura, (apostila) Piracicaba, Vol.I ESALQ/USP, 127 p., 1973.

HAWAIIAN SUGAR PLANTERS ASSOCIATION. Experiment Station. Annual report – 1987. Honolulu, 1983. cap.7, p. 72-74: Enery.

HODMAN et al. Handbook of chemistry and physics chemical rubber publishing co. Cheveland, Ohio, 1955.

HUGOT, E. Manual para ingenieros azucareros. México : Continental, 7ª ed., 1984, 803 p.

KIRCHHOFF, V.M.J.H. Medidas de gases-traço nas queimadas de cana-de-açúcar. São José dos Campos: Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais, Ciências Espaciais e Atmosféricas, 1991. 91 p.

KOBLITZ, L.O. Contra fatos não há argumentos. **Jornal de Piracicaba**. Caderno Opinião, 22 de jul. 2004.

LANÇAS, K.P. A evolução das alternativas energéticas com a crise do petróleo e a projeção da biomassa. Botucatu: UNESP, FCA, 1984. 34p.

LAZZARINI, W. Manual de derivados da cana-de-açúcar: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília: **ABIPTI**. 474p. ICIDA, 1999.

LEITE, W. B.; PINTO, L.A. O valor do bagaço como combustível. Avaliação do bagaço da cana-de-açúcar **Coleção SOPRAL**, São Paulo, nº.4, p.22-39, 1983.

LOPES, M. B. **Simulação de um sistema de carregamento e transporte da cana-de-açúcar**. 1995. Tese (Mestrado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, 143p., Piracicaba, 1995.

MARANHÃO, L.E. Secagem do bagaço: avaliação do bagaço da cana-de-açúcar. **Coleção SOPRAL**, São Paulo, no. 4, p. 40-48, 1983.

MEDEIROS, D. **Efeitos da palha de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) sobre o manejo de plantas daninhas e dinâmica do banco de sementes**. 2001. Tese (Mestrado), 126p., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MOLINA Jr, W. F. **Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) : avaliação dos desempenhos operacional e econômico.**1991.Tese (Mestrado), 101 p., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

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

MORAES, R.G. Cogeração. Seminários, UNESP- Botucatu-SP, Dez. 2001.

NASCIMENTO, C. A. O. Modelagem matemática e simulação das operações da indústria de açúcar e álcool 1 : Moagem da cana. **Revista Brasileira de Engenharia Química**\_São Paulo, v.9, n.4, p.9-13, 1986.

ONU 1992. Cúpula da Terra: Resumo da AGENDA 21, Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil, Rio de Janeiro, 1ª Tradução, 46 p., 1992.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. *Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, v.16, n.6, p.30-33, jul./ago., 1998.

PATURAU, J.M. **By-products of the cane sugar industry.** Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company; 1982. 366 p.

PERES, N. P. Bagaço de cana biomassa alternativa ao óleo, *Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, p.37 - 40, set./out., 1982.

PERES, N. P. Curso de segurança, instalação, operação e manutenção de caldeiras a vapor. Instituto brasileiro de segurança, São Paulo, julho, 1978.

PERRONE, J. C. Os processos hidrolíticos no aproveitamento dos recursos renováveis. *Silvicultura*, São Paulo, ed. Esp., p. 23-33, dez. 1977.

PHILLIPS, F.et PUGH, D.S. How to get a PhD. Open University Press, Milton Keynes, 1995.

RIPOLI, M.L. & RIPOLI, T.C. & GAMERO, C.A. Colheita integral: Retrocesso ou barateamento do sistema?. *IDEANews*, Ribeirão Preto, Ano 4; nº. 28; p 66-67. jan. 2003.

RIPOLI, M.L.C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*saccharum spp*) para fins energéticos**. 2004 213 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C.C.; DeLEÓN M.J.; MIALHE, L.G. **Perdidas de azúcar reductores totales como consecuencia de la queima em pré-cosecha de cañaverales**. In BAULBUENA BENEZ, S.H.; JORAJURIA, D. (Ed.) Ingenieria rural y mecanización agraria en el ambito latinamericano. La Plata: Universidad Nacional de La Plata,. 1998. p.250-255.

RIPOLI, T. C. C et RIPOLI, M.L.C. Biomassa de cana-de-açúcar colheita, energia e ambiente. Barros e Marques Ed. ELET. Piracicaba, Cap. 2. 2004. 302p.

RIPOLI, T. C. C. **Avaliação de alguns parâmetros de desempenho de três colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)** 1977. 91p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1977.

RIPOLI, T. C. C. O uso energético da biomassa de cana: implicações técnico-econômicas e sócio-ambientais. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO AGRÍCOLA E URBANO, 1995, Piracicaba, Resumos... Piracicaba, FEALQ, 1995. p.131-142.

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

RIPOLI, T. C.; MOLINA JR, W.F.; STUPIELLO, J.P.; NOGUEIRA, M.C. SACCOMANO, J. B. Potencial energético de resíduos de cosecha de la caña verde. Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v.10, n.1, p.23-26, set./out. 1991b.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JR., W.F.; RIPOLI, M.L.C. Energetic potential of the sugar cane biomass in Brazil. **Rivista di Ingegneria Agraria**, Bologna, v.31, n.1, p.1-7, Feb, 2000.

RIPOLI, T.C.C. Now it is the turn of palhiço. Idea News. November, year 1 - n. 3; Ribeirão Preto - SP, 2001.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA JUNIOR, W. F. Cultura canavieira: um desperdício energético. **Maquinaria Agrícola**, São Paulo, v.6, n..1, p.2-3, jan. 1991a.

RIPOLI, T.C.C.; PARANHOS, S. B. Colheita. In PARANHOS, S.B. (coord.) **Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, cap.5, p.517-597.

RIPOLI, T.C.C.; VILLA NOVA, N.A. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: novos desafios. *Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba v.11, n.1, p.28-31, set./out. 1992.

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

SAFFIOTI, W. O desperdício de energia na queima dos canaviais. **Revista Pau Brasil**, São Paulo, p. 40-43, nov./dez., 1985.

SÃO PAULO (estado) LEI no. 11.241 que regulamenta as queimadas estabelecendo normas para a utilização do uso do fogo em práticas agrícolas e pastoris e prevê novo prazo para o fim das queimadas. de 19 de setembro de 2002. Seção I, v. 112, n. 180 São Paulo, 20 de setembro de 2002.

SÃO PAULO (estado) LEI no.10.547 que amplia a oferta de energia através da biomassa. 02 de maio de 2000. São Paulo, 110 (83) Quarta-feira, 3 de maio de 2000.

SÃO PAULO (estado). DECRETO nº. 45.869 que amplia a oferta de energia através da biomassa. 22 de junho de 2001, Seção I, São Paulo, 1. 2001.

SARTORI, M.M.P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. Botucatu, 2001. 108p. Tese (Doutorado) FCA-UNESP - Universidade "Júlio de Mesquita Filho", 2001.

SCTDE/ICIDA - Curso de modelagem e simulação de processos na produção de açúcar, álcool e derivados, (apostila). ESALQ/USP, 1992.

SETTO, M.M. Cana-de-açúcar: Unicamp projeta nova colhedeira. **Jornal de Piracicaba**, p. B-5 Economia, julho 2003.

SILVA, J.C.T. Óleo vegetal no setor sucroalcooleiro: Estudos preliminares. CONBEA Unesp/campos de Bauru, 1996.

SILVA, J.C.T. Pesquisa operacional. (apostila), Faculdade de Engenharia de Produção. Unesp. Bauru, S.Paulo, 2003.

SILVA, M.R.S.; FROES, N.D.T. As cinzas de cana promovem câncer? *Revista STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba v.16, n.4, p.42. mar./abr. 1998.

SILVEIRA, L.T. Modelo para análise da viabilidade de implantação de projetos de co-geração de energia para indústria sucroalcooleiras. 9º SIICUSP - Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP. Piracicaba-SP, V. 1, p. 158, 2001.

STOUT, B. A. **Another Alternative: Energy from Agriculture**. In: STOUT, B. A. *Energy use and management in agriculture*. New York: Breton, 1984. p.169-244.

STUPIELLO J.P. Aproveitamento Energético: Experiência da Usina da Barra. Revista STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos – Nov./Dez., Vol. 20 no. 2, p. 38-39, 2001.

STUPIELLO, J. P. Alguns aspectos da qualidade da matéria prima. Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba. V.7, n. 3/5, p. 52-54, jun./jul., 1989.

TILLMANN, C. A. C. **Avaliação dos desempenhos operacional e econômico de sistema de colheita semimecanizada em cana-de-açúcar, com e sem queima prévia.** 1994. 111 p., Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética.** 2003, Tese (Mestrado), 88 p., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

VIEIRA, G. **Avaliação do custo, produtividade e geração de emprego no corte de cana-de-açúcar, manual e mecanizada, com e sem queima prévia.** 2003, 114p., Dissertação (Mestrado) FCA/UNESP – Universidade “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

WAGNER, H.M. Pesquisa operacional. Ed Guanabara, 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 1986.

YAMADA, M. C. Análise e modelagem das atividades produtivas e logísticas na agroindústria visando estudos de simulação : uma aplicação no setor de fornecimento de cana em indústria sucroalcooleira. **Anais** – In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Uberlândia 2001.

**ANEXOS**

**1) Unidade Industrial:**

Razão Social da unidade industrial: **Usina Açucareira Guaira Ltda** (CNPJ-44346583/0001-82)

Município: Guairá Estado: SP Responsável pela informação: Eng.Agr.Jaime Luiz Bassinello - Diretor

Capacidade de moagem diária (TCD):12.000

Capacidade de moagem anual (TCS): Própria: 2.156.000 Fornecedor: 44.000

Produção de açúcar/safra: 3.600.000 sacas 50kg

Produção de álcool/safra: 80.000.000 litros

Qualidade da Matéria prima (média safra): Pol: 14,37 Brix: 19,80 Fibra%: 12,26

**2) Descrição dos equipamentos de cogeração** (repetir a ficha, caso exista mais de um modelo):

**Caldeira tipo:** (valores médios da safra):

Pressão de vapor: 21kg/cm<sup>2</sup> Capacidade: 240 Fabricante: Dedini

Tipo de vapor: superaquecido Temperatura do vapor saturado °C:  
Temperatura do vapor superaquecido °C: 300

Pré-aquecimento de ar: Sim( X ) Não( )

Recuperador de calor: Sim( X ) Não( )

Retirada de gases forçada: Sim( ) Não( X ) Temperatura da fumaça °C: 190

Utiliza água desmineralizada: Sim( ) Não( X ) Temperatura da água reposição °C: 80

Tipo da grelha: basculante

Tipo de alimentação de bagaço: Dosador rotativo Umidade do bagaço%: 50 Pol do bagaço: 1,5 a 2,0

Fonte de energia principal: Bagaço( X ) Palhiço( ) Ambos( )

Lavagem de cana: Sim( ) Não( X )

Mesa de limpeza seca: Sim( X ) Não( ) Retirada de resíduo: Tipo Úmida( X ) Tipo Seca( ) R\$/t

Desenfundadora de palhiço enfardado: Não ( ) Sim ( ) R\$/t: Capacidade: t/dia

Trator descarregador de palhiço: Não ( X ) Sim ( ) R\$/t: Capacidade: t/dia

**3) Turbina/alternador:** (valores médios da safra)

Consumo bagaço: 38.600 t/MWh: 58

Condensação: Sim( ) Não( X )

Múltiplos estágios: Sim( X ) Não( )

Capacidade: 9.400kva Modelo: vários (3) Fabricante: TGM-NG

**4) Faturamento:**

Energia vendida para a Rede Pública:

Preço de Custo energia (MWh)R\$: Preço de venda energia (MWh) R\$:

Rede pública compradora de energia (empresa):

**5) Outras informações:**

Operação da mesa de limpeza a seco 4 anos sem problemas de manutenção e consertos.

Estimativa de custo de operação da mesa: rejuvenecimento R\$250,00; manutenção preventiva R\$300,00; troca de rolamento/rotor do ventilador e balanceamento R\$300,00; energia elétrica própria para operar 4 motores de 40CV.

Consumo de graxa de lubrificação dos rolamentos: 13 g/12.400h valor R\$4,09/kg motor 40CV

60g/1.900h valor R\$4,09/kg motor 300CV

**1) Unidade Industrial:**

Razão Social da unidade industrial: **Andrade Açúcar e Alcool SA**

Município: Pitangueiras Estado: SP Responsável pelas informações: Waldir Alexandre e Luiz Gonzaga Benetti

Capacidade de moagem diária (TCD): 15.000

Capacidade de moagem anual (TCS): Própria: 1.150.000 Fornecedor: 1.750.000

Produção de açúcar/safra: 167.000.000kg

Produção de álcool/safra: 160.000.000 litros

Qualidade da Matéria prima (média safra): Pol: 15,05 Brix: 18,56 Fibra%: 12,81

**2) Descrição dos equipamentos de cogeração** (repetir a ficha, caso exista mais de um modelo):

**Caldeira tipo:** (valores médios da safra):

Pressão de vapor: 21kg Capacidade: 405t (4) Fabricante: diversos (4)

Tipo de vapor: saturado Temperatura do vapor saturado °C: 220  
Temperatura do vapor superaquecido °C: 320

Pré-aquecimento de ar: Sim( X ) Não( )

Recuperador de calor: Sim( X ) Não( )

Retirada de gases forçada: Sim(X ) Não( ) Temperatura da fumaça °C: 160

Utiliza água desmineralizada: Sim( ) Não( X ) Temperatura da água reposição °C: 115

Tipo da grelha: Basculante

Tipo de alimentação de bagaço: Dosador rotativo Umidade do bagaço%: 50 Pol do bagaço: 1,80

Fonte de energia principal: Bagaço( X ) Palhicho( ) Ambos( )

Lavagem de cana: Sim( X ) Não( )

Mesa de limpeza seca: Sim( ) Não( X ) Retirada de resíduo: Tipo Úmida( ) Tipo Seca( ) R\$/t

Desenfundadora de palhicho enfardado: Não ( X ) Sim ( ) R\$/t: Capacidade: t/dia

Trator descarregador de palhicho: Não ( ) Sim ( X ) R\$/t: Capacidade: t/dia

**3) Turbina/alternador:** (valores médios da safra)

Consumo bagaço: t/MWh: 8

Condensação: Sim( ) Não( X )

Múltiplos estágios: Sim( X ) Não( )

Capacidade: 6Mwh Modelo: Fabricante:

**4) Faturamento:**

Energia vendida para a Rede Pública: Não

Preço de Custo energia (MWh)R\$: Preço de venda energia (MWh) R\$:

Rede pública compradora de energia (empresa):

**5) Outras informações:**

Custos e capacidades das máquinas de manuseio de bagaço no pátio:

Caterpillar 966: 3,8 m3; 1.020kg R\$80,86/h com capital; R\$60,19/h sem capital

Caterpillar 938: 2,8m3; 720kg R\$52,58/h com capital; R\$43,69/h sem capital

Caterpillar 930: 1,8m3; 450kg R\$46,76 com capital; R\$30,76 sem capital

**1) Unidade Industrial:**

Razão Social da unidade industrial: **Usina Santa Adelaide SA** (CNPJ:50.376.938/0001-89)

Município: Jaboticabal Estado: SP Responsável pela Informação: Marco Antonio Carleto

Capacidade de moagem diária (TCD): 12.000

Capacidade de moagem anual (TCS): Própria: 1.365.000 Fornecedor: 735.000

Produção de açúcar/safra: 3.060.000 sacos de 50kg

Produção de álcool/safra: 103.273.000 litros

Qualidade da Matéria prima (média safra): Pol: 15,80 Brix: 21,09 Fibra%: 11,57

**2) Descrição dos equipamentos de cogeração** (repetir a ficha, caso exista mais de um modelo):

**Caldeira tipo:** (valores médios da safra): APU-60 (2 unidades)

Pressão de vapor: 63,5kgf/cm<sup>2</sup> Capacidade: 175.000kh/h Fabricante: Caldema

Tipo de vapor: Superaquecido Temperatura do vapor saturado °C:  
Temperatura do vapor superaquecido °C: 480

Pré-aquecimento de ar: Sim( ☒ ) Não( ☐ )

Recuperador de calor: Sim( ☒ ) Não( ☐ )

Retirada de gases forçada: Sim( ☒ ) Não( ☐ ) Temperatura da fumaça °C: 150

Utiliza água desmineralizada: Sim( ☐ ) Não( ☐ ) Temperatura da água reposição °C: 115

Tipo da grelha: PIN Holle

Tipo de alimentação de bagaço: Rotativo Umidade do bagaço%:51,72 Pol do bagaço: 1,60

Fonte de energia principal: Bagaço( ☒ ) Palhão( ☐ ) Ambos( ☐ )

Lavagem de cana: Sim( ☐ ) Não( ☒ )

Mesa de limpeza seca: Sim( ☒ ) Retirada de resíduo: Tipo Úmida( ☒ ) Tipo Seca( ☐ ) R\$/t

Desenfundadora de palhão enfardado: Não ( ☒ ) Sim ( ☐ ) R\$/t: Capacidade: t/dia

Trator descarregador de palhão: Não ( ☐ ) Sim ( ☐ ) R\$/t: Capacidade: t/dia

**3) Turbina/alternador:** (valores médios da safra)

Consumo bagaço: t/MWh:

Condensação: Sim( ☐ ) Não( ☒ )

Múltiplos estágios: Sim( ☒ ) Não( ☐ )

Capacidade:34Mwh Modelo: Fabricante: TGM(turbina) / WEG(gerador)

**4) Faturamento:**

Energia vendida para a Rede Pública (MWh): 3.703,254 (2002) e 78.801,944 (2003)

Preço de Custo energia (MWh)R\$: Preço de venda energia (MWh) R\$: 110,00

Rede pública compradora de energia (empresa): CPFL

**5) Outras informações:**

O preço de venda do MWh é superior ao da tabela Proinfra devido à negociação durante o período do "apagão" ocorrido no Brasil para um período de cinco anos.