

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**UTILIZAÇÃO DE UM ALGORITMO DE CAMINHO MÍNIMO NO
PROCESSO DE RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

INARA SOLDERA ROMANO DA SILVA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Dezembro - 2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**UTILIZAÇÃO DE UM ALGORITMO DE CAMINHO MÍNIMO NO
PROCESSO DE RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

INARA SOLDERA ROMANO DA SILVA

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Dezembro – 2009

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

S586u Silva, Inara Soldera Romano da, 1982-
Utilização de um algoritmo de caminho mínimo no proces-
so de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar / Inara
Soldera Romano da Silva - Botucatu : [s.n.], 2009.
vii, 71 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulis-
ta, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009
Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva
Inclui bibliografia.

1. Cana-de-açúcar. 2. Palhiço. 3. Agricultura de preci-
são. 4. Algoritmo de Dijkstra. 5. Enfardamento. I. Silva,
Helenice de Oliveira Florentino de. II. Universidade Esta-
dual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Botuca-
tu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "UTILIZAÇÃO DE UM ALGORITMO DE CAMINHO MÍNIMO NO PROCESSO
DE RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR"**

ALUNA: INARA SOLDERA ROMANO DA SILVA

ORIENTADORA: PROFª DRª HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFª DRª HELENICE DE OLIVEIRA F. SILVA



PROFª DRª ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA



PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

Data da Realização: 16 de dezembro de 2009.

“O gênio é composto de 2% de talento e de 98% de perseverante aplicação.”

(Ludwing Van Beethoven)

Aos meus pais Moacyr e Helena, aos meus irmãos Júnior e Uelinton. À minha querida sobrinha Júlia e ao meu noivo Cassiano... enfim à família que tanto amo, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me confiado mais este desafio e por ter iluminado meu caminho para conseguir vencê-lo.

À minha orientadora Prof. Dr. Helenice de Oliveira Florentino Silva, pela confiança, pela compreensão, pela paciência e apoio em todos os momentos.

Aos amigos José Guilherme Lança Rodrigues e Ramon Juliano Rodrigues pelo pontapé inicial para que eu me encorajasse a fazer o mestrado. Obrigado por me fazerem acreditar que seria possível!

Aos meus pais, pela educação que me passaram e pelo amor incondicional em todas as etapas da minha vida.

À Faculdades de Ciências Agronômicas (FCA) pela oportunidade do aprender e do aperfeiçoar.

Aos colegas de mestrado, aos colegas de trabalho, alunos, professores e amigos que de várias formas me incentivaram a concluir esta dissertação.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Produção percentual de automóveis por tipo de combustível no Brasil	10
Tabela 2. Diferenças de produtividade do palhço obtidos em diversas variedades, climas e solos apresentados por diversos autores	16
Tabela 3. Estimativa da energia contida em 1 ha de canavial, com produtividade agrícola de 70t.ha ⁻¹	20
Tabela 4. Estimativa da energia contida em 1 ha de canavial, com produtividade agrícola de 60t.ha ⁻¹	20
Tabela 5. Desempenho de enfardadoras de fardos cilíndricos e retangulares	29
Tabela 6. Desempenho do transporte em cada sistema de recolhimento do palhço	30
Tabela 7. Descrição dos tratamentos, massas, massas específicas e quantidades de terra dos fardos e capacidades das enfardadoras	32
Tabela 8. Localizações geográficas dos fardos de palhço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, correspondente ao enleiramento simples.....	51
Tabela 9. Localizações geográficas dos fardos de palhço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, correspondente ao enleiramento triplo	51
Tabela 10. Localizações geográficas dos fardos de palhço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, com relação ao enleiramento duplo.....	52
Tabela 11. Distâncias entre os fardos i e j na área referente ao enleiramento simples	55
Tabela 12. Distâncias entre os fardos i e j na área referente ao enleiramento triplo	55
Tabela 13. Distâncias entre os fardos i e j na área referente ao enleiramento duplo	56

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comportamento das vendas de veículos a álcool no Brasil	9
Figura 2. Variação da produção de cana-de-açúcar em alguns estados do Brasil entre 2007 e 2008	11
Figura 3. Produção de álcool no Brasil	12
Figura 4. Oferta Interna de Energia do Brasil	17
Figura 5. Matriz de Oferta de Energia Elétrica do Brasil (% e TWh)	18
Figura 6. Esquema de cogeração de energia elétrica com subprodutos da cana	19
Figura 7. Opções e etapas do recolhimento do palhicho de cana-de-açúcar para a geração de energia	23
Figura 8. Estimativa da demanda de investimentos em máquinas dos diferentes sistemas de recolhimento do palhicho	24
Figura 9. Eficiência energética de três diferentes sistemas de recolhimento de palhicho	25
Figura 10. Eficiência energética dos diferentes sistemas de recolhimento do palhicho	26
Figura 11. Percentagem de terra encontrada em três diferentes sistemas de recolhimento do palhicho	26
Figura 12. Custo efetivo do palhicho posto na usina por três diferentes sistemas de recolhimento	27
Figura 13. Enleiramento do palhicho, anterior ao enfardamento	28
Figura 14. Fardo prismático de palhicho	28
Figura 15. Fardo cilíndrico de palhicho	29
Figura 16. Estimativa do custo total do palhicho recuperado nos vários sistemas, em três distâncias (15, 50 e 100 km)	31
Figura 17. Mapa de localização dos fardos, com diferenciação de tipos de fardos, percurso realizado pelas enfardadoras e divisão das áreas do talhão, em função dos tipos de enleiramento	34
Figura 18. As sete pontes que cruzavam o rio Pregel na cidade de Königsberg, Prússia Oriental	35
Figura 19. Exemplo de grafo $G(V, A)$	37

Figura 20 As pessoas são os vértices do grafo e as ligações entre elas, as arestas, indicam se são amigas ou não	37
Figura 21. As pessoas são os vértices do grafo e as ligações orientadas entre elas, as arestas, indicam se são pai, mãe, filho ou filha	38
Figura 22. As cidades são os vértices e o tempo de vôo entre elas, as arestas do grafo	39
Figura 23. Grafo G : Estimativas iniciais dos seus vértices, e pesos e orientação de suas arestas	43
Figura 24. Ilustração de mapa com a localização dos fardos enumerados em cada divisão das áreas do talhão	50
Figura 25. Ilustração de um grafo $G(V, A)$ que o algoritmo de Dijkstra modificado pode ser aplicado. $w(i, j) = w(j, i)$ para todo vértice i, j de V	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Centímetro	cm
Dólar	US\$
Equivalente barril de petróleo	EBP
Equivalente barril de petróleo por dia	EBP.dia ⁻¹
Equivalente barril de petróleo por hectare	EBP.ha ⁻¹
Grama	g
Grau Celsius	°C
Hectare por hora	ha.h ⁻¹
Mega calorías	Mcal
Megawatt	MW
Metro	m
Metro cúbico	m ⁻³
Porcentagem	%
Quilograma	kg
Quilograma por metro cúbico	kg.m ⁻³
Quilômetro	km
Quilowatt.....	kW
Real	R\$
Real por mil litros	R\$.1000L ⁻¹
Real por tonelada	R\$.t ⁻¹
Terawatt-hora	TWh
Tonelada	t
Tonelada por dia	t.dia ⁻¹
Tonelada por hectare	t.ha ⁻¹
Tonelada por hora	t.h ⁻¹

1. RESUMO

A atual preocupação com o meio ambiente tem feito com que empresas produtoras de cana-de-açúcar invistam na mudança do sistema de colheita. Essa mudança consiste na redução da queima do canavial na pré-colheita e na utilização do corte mecanizado com cana crua. Porém, a colheita com corte mecanizado torna disponível a biomassa residual e sem as queimadas e com o maior acúmulo do palhiço sobre o solo, criam-se condições favoráveis para o aparecimento de parasitas e atraso da brota da cana, comprometendo a próxima safra. Vários autores mostram a viabilidade do uso do palhiço na produção de energia. Pois, além do potencial energético desta biomassa, têm-se como vantagens as questões ambientais, a manutenção de empregos e a substituição dos recursos energéticos de fontes naturais. Mas, as grandes dificuldades ainda encontradas para aproveitamento desse resíduo para geração de energia são o grande número de maquinário envolvido no sistema de coleta deste resíduo e o alto custo que este processo demanda, principalmente o custo com transporte. O presente trabalho tem como objetivo propor aplicações de técnicas matemáticas de otimização para auxiliar o planejamento do recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar para aproveitamento na geração de energia, estudando a melhor forma de carregamento dos fardos de palhiço, facilitando o transporte, diminuindo custos e desgastes de maquinários. Para isto, é sugerido o uso de técnicas de agricultura de precisão para mapear o palhiço enfardado, desta forma pode-se definir uma rota para recolher os fardos no campo e transportá-los para o centro de processamento. Para

determinação da rota, propõe-se o uso do algoritmo de menor caminho da teoria de grafos, utilizando uma variação do algoritmo de Dijkstra.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, palhiço, biomassa, energia, enfardamento, Agricultura de Precisão, algoritmo de Dijkstra.

SHORTEST PATH ALGORITHM IN PROCESS OF THE COLLECT OF CROP RESIDUE GENERATED BY THE SUGAR CANE CULTURE. Botucatu, 2009. 71p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: INARA SOLDERA ROMANO DA SILVA

Adviser: Prof^ª. Dr^ª. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

2. SUMMARY

The current concern with the environment has made sugar cane growers invest in changing their harvesting system. This change consists of the reduced burning of cane fields before harvesting and the use of mechanized cutting for raw canes. However, mechanized harvesting makes residual biomass available and, without the burning, the major accumulation of crop residue on the ground, creating favorable conditions for the emergence of parasites and delay of new shoots, affecting the next crop. Several authors show the feasibility of using crop residue for energy production. Besides the energy potential of the biomass, there are advantages for the environmental issues, preservation of jobs and the replacement of energy resources from natural sources. But the great difficulties still found in using this residue for power generation are the large number of machinery involved in the collection system of the waste and the high costs of this process, mainly transport costs. This paper aims to propose applications of mathematical optimization techniques to help plan the collection of sugar cane crop residue to be used for

power generation, by studying the best way of loading bales of crop residue, making it easy to transport them, therefore reducing costs and wear on machinery. For this, we suggested the use of techniques of Precision Agriculture to map the baled crop residue, which allows you to define a route to pick up the bales in the field and transport them to the processing center. To determine the route, it is proposed to use the shortest path algorithm from graph theory, using a variation of Dijkstra's algorithm.

Keywords: sugar cane, crop residue, biomass, energy, baling, Precision Agriculture, Dijkstra's algorithm.

3. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. A produção brasileira vem aumentando a cada ano e possui grande expressão na economia atual. A produção brasileira de cana-de-açúcar em 2008 foi da ordem de 653 milhões de toneladas, o que representou um crescimento de 19,2% em relação a 2007 e para safra 2009 estima-se uma produção de 671 milhões de toneladas (UNICA 2009a, IBGE 2009).

Atualmente uma grande preocupação dos órgãos ambientais e governamentais é a forma de colheita desta cultura, pois é prática comum a queima da palha antes da colheita, a qual causa grandes danos ambientais. Por outro lado, sem as queimadas e com o maior acúmulo do palhiço sobre o solo, formado por palhas, folhas verdes, ponteiros e/ou frações de colmos, gerado pelo sistema de colheita mecanizada, criam-se condições favoráveis para o aparecimento de parasitas e também o atraso na brota da cana, comprometendo assim, a próxima safra. Vários autores mostram a viabilidade do uso do palhiço na produção de energia, pois além do potencial energético desta biomassa, tem-se como principais vantagens as questões ambientais e a substituição de recursos energéticos de fontes naturais (RIPOLI 2002, TORREZAN 2003, COELHO 1999). Segundo Ripoli & Ripoli (1995), abandonando-se a prática da queima, o palhiço gerado pela colheita mecanizada e remanescente sobre o terreno pode ser recolhido e utilizado para a cogeração de energia elétrica nas próprias usinas e destilarias.

Vários estudos estão sendo realizados na busca da melhor opção de recolhimento do palhiço de forma a diminuir os custos tornando-o economicamente viável. O processo de recolhimento do palhiço em fardos passa por diversas etapas: enleiramento, compactação em forma de fardos, carregamento do caminhão, transporte deste material do campo para o centro de processamento e descompactação do palhiço para ser usado nas caldeiras da usina. Desta forma as grandes dificuldades ainda encontradas para aproveitamento desse resíduo na geração de energia são: o grande número de maquinários envolvidos neste sistema e o alto custo que este processo demanda.

O presente trabalho tem como objetivo propor aplicações de técnicas matemáticas de otimização para auxiliar o planejamento da coleta do palhiço da cana-de-açúcar para aproveitamento na geração de energia, estudando a melhor forma de recolhimento dos fardos de palhiço no campo, facilitando o transporte, diminuindo custos e desgastes de maquinários. Este trabalho propõe o uso de técnicas da Agricultura de Precisão para mapear o palhiço enfardado no campo, permitindo definir uma rota a ser seguida pelo transbordo, para recolher os fardos no campo e transportá-los para o centro de processamento, usando para isto uma variação do algoritmo de Dijkstra que determina uma rota de caminho mínimo.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Histórico da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) é uma espécie vegetal da família das gramíneas, que vem sendo cultivada desde a antiguidade (LEÃO, 2002). Não se sabe ao certo de onde veio a cana-de-açúcar, mas segundo diversos historiadores, há mais de 20 mil anos os povos das ilhas do Sul do Pacífico teriam descoberto as propriedades e as características desta planta alta, que crescia espontaneamente nas suas terras. O ponto de vista mais aceito atualmente é o de que a cana-de-açúcar foi cultivada pela primeira vez na Nova Guiné, mas foram os indianos os primeiros a extraírem o suco da cana e a produzirem pela primeira vez o açúcar.

Os portugueses, com a experiência adquirida com o cultivo da cana-de-açúcar na ilha da Madeira trouxeram-na para o Brasil. O primeiro engenho foi construído em São Vicente, por Martim Afonso de Souza, em 1532. No final do século XVI, o Brasil tinha na Bahia e em Pernambuco duas grandes e prósperas regiões produtoras de açúcar, enquanto São Vicente entrava em declínio. Além do clima tropical, o solo favorável e a proximidade dos portos de Salvador e Recife com o mercado consumidor (Europa) faziam a diferença. No início do século XVII, o Brasil tornou-se o maior produtor mundial de açúcar. Devido a vários fatores como o baixo nível técnico da produção, distância dos principais

centros de consumo, significativa expansão do açúcar produzido da beterraba, progressivo aumento da cultura cafeeira, domínio da técnica de cristalização do açúcar por Cuba, entre a segunda metade e o final do século XIX o Brasil despencou do primeiro para o quinto lugar na produção de açúcar. Somente após a Abolição da Escravatura, a agroindústria açucareira investiu na modernização dos equipamentos e ampliação das usinas. O Brasil, finalmente, entrava na era do açúcar centrifugado (ARBEX, 2001).

Em setembro de 1973, o preço do barril do petróleo no mercado internacional custava US\$ 2,91; em janeiro de 1974 atingiu a cifra de US\$ 12, caracterizando aquilo que ficou conhecido como o primeiro “choque” do petróleo. O Brasil comprava 80% do petróleo consumido e com a alta de preços, o país teve que enfrentar o crescimento da importação que passou de US\$ 600 milhões para mais de US\$ 2 bilhões. O período de 1979/1980 é identificado como o segundo “choque” do petróleo. Em 1975 foram apresentados ao Presidente da República Brasileira estudos com diversas fontes de biomassa como: sorgo, sacarina, batata doce, mandioca e a cana-de-açúcar, visando à produção de um combustível alternativo e renovável. Com isso, em 14 de novembro de 1975, o decreto nº 76.593 cria o Programa Nacional do Álcool – Proálcool, numa tentativa de amenizar o problema energético. O programa tinha por objetivo a substituição dos combustíveis veiculares derivados do petróleo por álcool, possibilitando a ampliação da área plantada com cana-de-açúcar e a implantação e o reequipamento de várias destilarias anexas a usinas. A experiência serviu como alternativa para diminuir a vulnerabilidade energética do País, devido à crise mundial do petróleo. Primeiramente, o programa era destinado à produção do álcool anidro para mistura com a gasolina; em 1978 surgem as primeiras frotas com veículos movidos exclusivamente a álcool (ARBEX, 2001; BANCO DE DADOS DE BIOMASSA NO BRASIL, 2009; UNICA, 2009a).

No Brasil, o etanol é uma fonte de energia alternativa que tem sido usada como combustível para automóveis desde 1979 (GUTIERREZ et al., 1991). A Figura 1 mostra a percentagem de carros movidos a álcool vendidos no Brasil de 1979 a 1999.

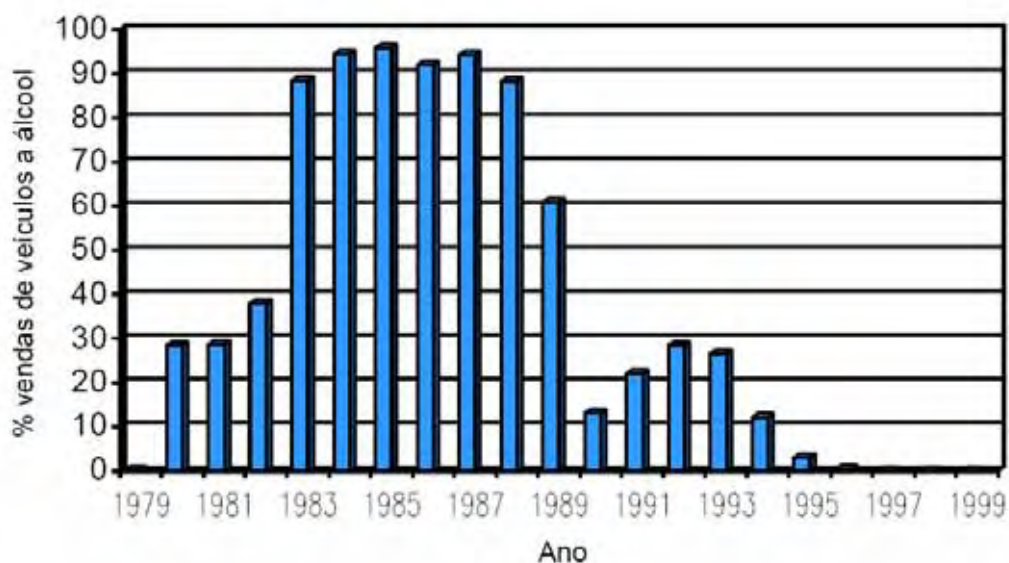


Figura 1. Comportamento das vendas de veículos a álcool no Brasil. (Fonte: ARBEX, 2001).

O programa começava a ruir na medida em que o preço internacional do petróleo baixava, e o preço do açúcar aumentava. Com a alta do preço do açúcar, para os donos de usina era mais vantajoso produzir açúcar do que produzir álcool (NOVAES, 2002; CLEMENTE, 2003). A partir de 1989, com a subsequente falta de confiança da população no abastecimento de álcool, reduziram-se as vendas dos veículos a álcool a níveis extremamente baixos (menos de 1% em 1996 e quase nulas em 1997) (COELHO, 1999). Apesar do pioneirismo brasileiro no ramo do álcool combustível, a "volta" do veículo a álcool foi possível devido a uma tecnologia desenvolvida nos Estados Unidos chamada "Flex Fuel" (Gasolina/álcool em qualquer mistura em um único tanque de combustível). A Tabela 1 mostra a produção anual de automóveis e comerciais leves por tipo de combustível no Brasil.

De acordo com a UNICA (2009b), o etanol de cana-de-açúcar foi recentemente reconhecido pela EPA (Environmental Protection Agency), a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, como o biocombustível que permite a maior redução de emissões de gases causadores do efeito estufa entre os disponíveis atualmente.

Tabela 1. Produção percentual de automóveis por tipo de combustível no Brasil.

Ano	Automóveis e Comerciais leves			
	gasolina	álcool	flex fuel	diesel
1995	93,7	2,6	-	3,7
1996	95,5	0,4	-	4,1
1997	94,8	0,1	-	5,1
1998	92,5	0,1	-	7,4
1999	91,5	0,9	-	7,6
2000	92,1	0,6	-	7,2
2001	94,1	1,1	-	4,8
2002	92,7	3,3	-	3,9
2003	90,7	2	2,9	4,4
2004	77,1	2,3	15,2	5,3
2005	56,1	2,2	36,1	5,6
2006	39,5	0	56,3	4,1
2007	27,4	0	69,1	3,5

(Fonte: Adaptado de ANFAVEA, 2008).

4.2. A cultura da cana-de-açúcar

Segundo o IBGE (2008), a produção brasileira de cana-de-açúcar em 2008 foi da ordem de 653 milhões de toneladas, o que representou um crescimento de 19,2% em relação a 2007. A expansão da área plantada em 12,5%, com relação ao ano anterior, tem como principais responsáveis os novos projetos que estão sendo implantados no país para atender as demandas de álcool, além da introdução de novas variedades de cana-de-açúcar e novas tecnologias.

O Estado de São Paulo é o maior produtor brasileiro de cana-de-açúcar com aproximadamente 387 milhões de toneladas em 2008, um crescimento de 18,3% na produção em relação a 2007, veja Figura 2. O Estado é responsável por 59,3% da produção brasileira, e deve destinar uma grande quantidade de cana para produção de álcool, com o objetivo de suprir a demanda pelo combustível de outros países e abastecer o mercado interno (IBGE, 2008). A cultura da cana-de-açúcar no Estado, que ocupou em 2007, 4,3 milhões de hectares e elevou a produção de açúcar a 19 milhões de toneladas e a de etanol a 13 bilhões de litros, gera cerca de 300 mil empregos e contribui com R\$ 21 bilhões ao PIB (Produto Interno Bruto) paulista (GOLDEMBERG et al., 2008).

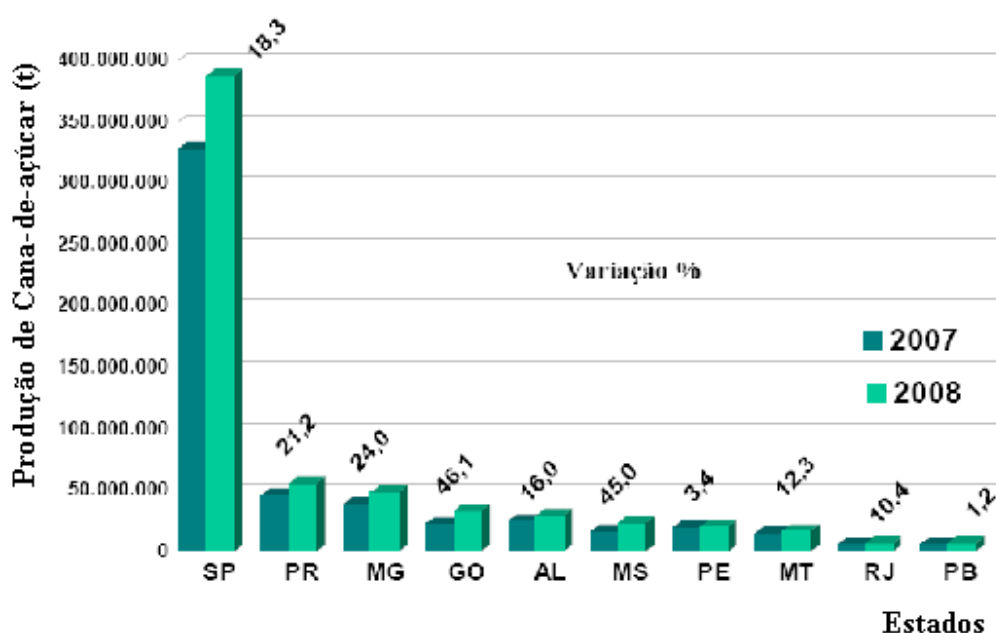


Figura 2. Variação da produção de cana-de-açúcar em alguns estados do Brasil entre 2007 e 2008. (Fonte: Adaptado IBGE, 2008).

A produção de São Paulo ajudou o Brasil a atingir a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. A cana ocupa cerca de 7 milhões de hectares, ou seja, 2% de toda a terra arável do País. As regiões de cultivo são Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitindo duas safras por ano. Portanto, durante todo o ano o Brasil produz açúcar e etanol para o mercado interno e externo (UNICA, 2009a). Segundo Goldemberg et al. (2008), o Brasil é o maior produtor mundial de açúcar, o segundo de etanol e também o maior exportador de açúcar e etanol.

Estima-se, para a safra 2009, uma produção de 671 milhões de toneladas e produtividade agrícola de $79,5 \text{ t.ha}^{-1}$ (IBGE, 2009). Estes números do setor sucroalcooleiro representam grande expressão na economia nacional atual, sendo a cana a principal biomassa energética do Brasil.

A cultura de cana-de-açúcar atualmente é produzida para obtenção de etanol e açúcar. De acordo com o MAPA (2009), o Brasil possui cadastradas, 15 unidades produtoras de açúcar, 151 unidades produtoras de álcool e 247 unidades mistas (açúcar e álcool) totalizando 413 usinas de cana-de-açúcar. Na safra 2007/2008 foram produzidos 31

milhões de toneladas de açúcar e 22 milhões de m³ de etanol, ou seja, 22 bilhões de litros de etanol no país (GOLDEMBERG et al., 2008). A Figura 3 mostra a produção de álcool no Brasil.

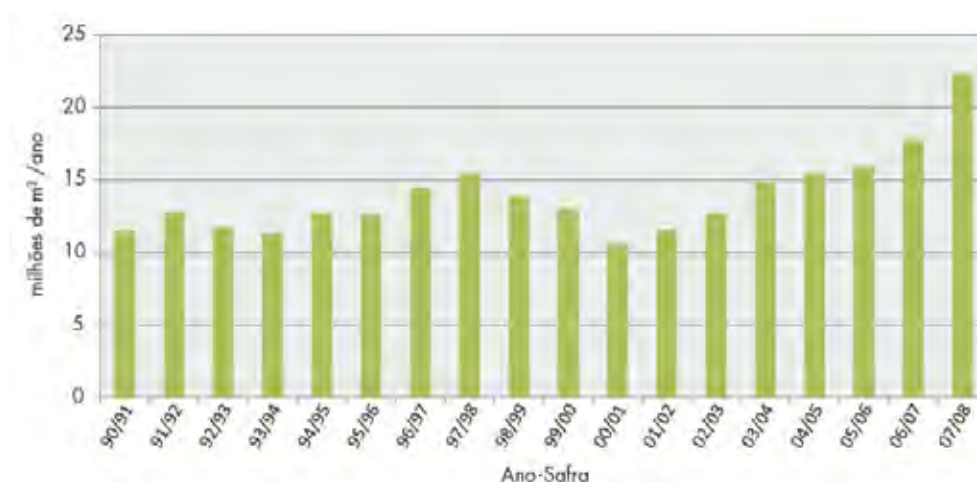


Figura 3. Produção de álcool no Brasil. (Fonte: GOLDEMBERG et al., 2008).

Em decorrência da crescente atividade sucroalcooleira, diversos estudos têm sido realizados visando melhorar o aproveitamento dos resíduos, que hoje são reconhecidos como subprodutos da cana, como a levedura, vinhaça, torta de filtro, bagaço e palhiço da cana-de-açúcar. (TEIXEIRA et al., 2007).

Estudos sobre utilização racional de resíduos na agricultura são fundamentais para minimizar problemas ambientais (AZANIA, et al., 2004). De acordo com Demajorovic (1995), citado por Pelizer et al. (2007), resíduos são sobras oriundas da produção que possuem valor econômico agregado, por possibilitarem aproveitamento no próprio processo produtivo, diferenciando-se do termo lixo, que não possui nenhum tipo de valor, já que é aquilo que deve apenas ser descartado.

Para Pelizer et al. (2007), o termo resíduo é utilizado em sentido amplo, englobando não somente sólidos (torta de filtro, bagaço e palhiço da cana) como também os efluentes líquidos (levedura e vinhaça) e os materiais presentes nas emissões atmosféricas. Portanto, o que antes era resíduo, hoje é considerado mais um produto das usinas.

4.3. Palhiço da cana-de-açúcar

Na colheita manual da cana-de-açúcar é prática comum a queima da palha visando facilitar o corte e aumentar a segurança, pois o fogo elimina palhas e animais peçonhentos que podem ferir os trabalhadores. Mas, a Lei Estadual nº 11.241 de 19 de setembro de 2002, dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. A prática deverá ser eliminada até 2021 nas áreas mecanizáveis e até 2031 nas áreas não mecanizáveis. Em 4 de junho 2007, representantes do governo do estado de São Paulo e da UNICA, assinaram, no evento “Ethanol Summit” em São Paulo, o Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista. Este protocolo tem por objetivo induzir a redução da queima da palha da cana-de-açúcar em prazo mais curto daquele previsto da Lei Estadual de Queima, Lei 11.241/02. De acordo com o protocolo, as indústrias da cana-de-açúcar tomarão medidas para eliminar a queima em 2014 e 2017, respectivamente, para as áreas consideradas mecanizáveis e não mecanizáveis.

A poluição gerada pela queima da palha da cana-de-açúcar na pré-colheita tem gerado muitos problemas devido à grande emissão de fumaça e fuligem que atingem os centros urbanos, trazendo sérios transtornos à população das cidades próximas aos canaviais. A fuligem, que permanece por longo tempo em suspensão no ar, é considerada uma das causas da alta incidência de doenças respiratórias no Brasil (SANTOS et al., 2002; CETESB, 2004), citados por MAGALHÃES et al. (2007). A relação entre a poluição e a morbidade e mortalidade foi objeto de vários estudos ao longo da última década, especialmente para emissões provenientes de automóveis e indústrias, mas com pouca área de investigação sobre emissões provenientes de queima na agricultura (ÁLVAREZ, 2007).

Além de cumprir e atender às necessidades ambientais, deixar de queimar os canaviais traz outras vantagens, pois a prática da queima altera a composição e a proporção de impurezas em relação à cana crua. A quantidade e o tipo de impurezas presentes na matéria-prima têm influência sobre diversos parâmetros da composição do caldo da cana-de-açúcar, tais como Brix, Pol, açúcares redutores e cinzas (BOVI & SERRA, 2001).

Com a Lei das queimadas, a colheita mecanizada de cana crua é inevitável e com isto há um grande aumento do palhiço gerado pela colheita mecanizada nas lavouras. O palhiço é o material remanescente sobre a superfície do solo após a colheita,

constituído de folhas verdes, palhas, ponteiros, frações de colmos e eventualmente frações de raízes e partículas de terra (RIPOLI & RIPOLI, 2007; TOLENTINO et al. 2007).

Correia & Durigan (2004), estudando a emergência de plantas daninhas em solo coberto com palhiço, concluíram que deverá haver uma redução na densidade populacional das espécies *B. decumbens*, *S. spinosa* e *D. horizontalis* quando a quantidade de palhiço for igual ou superior a 10 t.ha⁻¹. No entanto, as espécies *I. grandifolia* e *I. hederifolia* tendem a manter-se como plantas problema, enquanto *I. quamo-clit* deverá aumentar a sua densidade populacional.

Há relatos em Ripoli & Ripoli (2007) que em 1988 quando iniciou-se estudos do aproveitamento do palhiço, a reação da comunidade sucroalcooleira foi de total desinteresse, mas hoje este comportamento mudou, o seu grande potencial é para fins de cogeração de energia elétrica, conjuntamente com o bagaço, ou para produção de álcool, pelo sistema DHR – Dedini Hidrólise Rápida. Assim, o palhiço está se consolidando como uma importante agregação de valor para o setor sucroalcooleiro (RIPOLI, s.d.).

A atual legislação estadual permite parcialmente a atividade de queima de pré-colheita. Com isso, além dos problemas ambientais exaustivamente conhecidos que tal prática impõe, o país está deixando de aproveitar uma importante fonte energética de biomassa renovável (RIPOLI & GAMERO, 2007). Segundo Ripoli & Ripoli (1995), abandonando-se a prática da queima, o palhiço gerado pela colheita mecanizada e remanescente sobre o terreno pode ser recolhido e utilizado para a cogeração de energia elétrica nas próprias usinas e destilarias. Mas, o problema ainda reside na grande quantidade de palhiço deixado no solo e nos altos custos que requer o processo de recolhimento deste para ser aproveitado no próprio setor.

Estudando a biomassa da colheita mecanizada, Abramo Filho et. al. (1993), mostraram que a camada de 8 a 10 cm de palhiço deixado sobre o solo, faz com que a temperatura sob o palhiço e junto ao solo seja 5°C mais baixa que a ambiente. Segundo os autores as quantidades físicas de resíduos resultantes da colheita da cana dependem de uma série de condições intrínsecas à máquina colhedora, à planta e ao manejo da cultura. Foi observada também, uma maior manutenção da umidade do solo e controle de uma grande variedade de plantas daninhas.

Ripoli et al. (1990a) encontraram para três variedades de cana-de-açúcar (SP70-1284, SP70-6163, SP70-1143) variação de 17,40% a 31,50% em massa de palhiço, com relação à quantidade de colmos industrializáveis contidos num canavial.

De acordo com Ripoli & Ripoli (2007) Índice de Palhiço (IP) é a relação percentual, na unidade de massa, existente em um canavial entre a quantidade de palhiço e a quantidade de colmos industrializáveis. Torrezan (2003) obteve para a cana, uma produtividade média de colmos industrializáveis de 78,00 t.ha⁻¹ e uma produtividade média estimada de palhiço de 27,01 t.ha⁻¹ com umidade de 22,80%, ou seja, um índice de palhiço de 34,63% na área estudada. Com base em matéria seca a produtividade estimada de palhiço foi 20,85 t.ha⁻¹ ou índice de palhiço 26,73%.

Abramo Filho et al. (1993), estudando os resíduos da colheita mecanizada de cana crua, encontraram 21,3 t.ha⁻¹ de palhiço, com umidade de 22,34% e 6,92% de terra junto ao palhiço, 90% de matéria orgânica e 6,92% de cinzas. Segundo os autores a quantidade de palhiço deixado no campo oscila de 13 a 20 t.ha⁻¹ de matéria seca (MS) e é diferente para cada variedade de cana-de-açúcar. De acordo com Lima (2006) a produtividade da cana-de-açúcar, dependendo da variedade, é em torno de 90 t.ha⁻¹, e oferece 22 t.ha⁻¹ de bagaço e 25 t.ha⁻¹ de palhiço.

A Tabela 2 mostra as grandes variações que podem ocorrer na produtividade do palhiço, cujas variações dependem da variedade da cana, do clima e do solo de cultivo. Maiores esclarecimentos das variedades, umidades, solo e clima que geraram tais produtividades, podem ser encontrados nas referências citadas na primeira coluna da tabela.

A cultura canavieira pode gerar biomassa da ordem de 15 a 30% em peso da parte aérea das plantas, dependendo das condições de campo (variedade, idade, número de corte e condições edafo-climáticas), cujo poder calorífico é equivalente ao da madeira e superior ao próprio bagaço da cana. Poder calorífico é a quantidade de calor que se desprende durante a combustão completa da unidade de massa do combustível (CORRÊA NETO, 2001). A quantidade de energia aproveitável a partir de resíduos de extração vegetal é função do poder calorífico desses resíduos (CLEMENTE, 2003).

Tabela 2. Diferenças de produtividade do palhico obtidos em diversas variedades, climas e solos apresentados por diversos autores.

Autores	Produtividade do palhico (t.ha ⁻¹)
Ripoli et al. (1990)	9,70
Ripoli et al. (1991)	21,60
Abramo Filho et al. (1993)	21,30
Molina Jr et al. (1995)	33,85
Ripoli et al. (1995)	33,25
Ripoli et al. (1995)	26,35
Furlani Neto et al. (1996)	13,61
Furlani Neto et al. (1996)	24,32
Ripoli et al. (1999)	11,25
Sartori (2001)	14,40
Torrezan (2003)	27,00

(Fonte: LIMA, 2006).

4.3.1. O palhico como fonte de energia

O planeta Terra possui na sua superfície uma zona onde se desenvolvem os organismos vivos: a biosfera. A massa que constitui a biosfera é denominada biomassa. Essa biomassa contém uma energia química que, para as plantas verdes, provém da conversão da energia luminosa graças à fotossíntese (COUTO, L.C. et al, 2004). Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos (ANEEL, 2009).

A energia proveniente da biomassa pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. Entre as fontes de biomassa destacam-se os produtos da cana-de-açúcar, da lenha e outros resíduos como a casca de arroz, pó de serra, cavacos, briquetes de madeira; óleos animal e vegetal (abacate, algodão, amendoim, coco, dendê, mamona, milho, soja, urucum) e excrementos animais, dentre muitas outras. A biomassa é uma fonte de energia renovável com alta disponibilidade no Brasil.

A principal fonte de biomassa no Brasil é proveniente da cana-de-açúcar. A Figura 4 mostra a Oferta Interna de Energia (OIE) do País em 2008, de acordo com o MME.

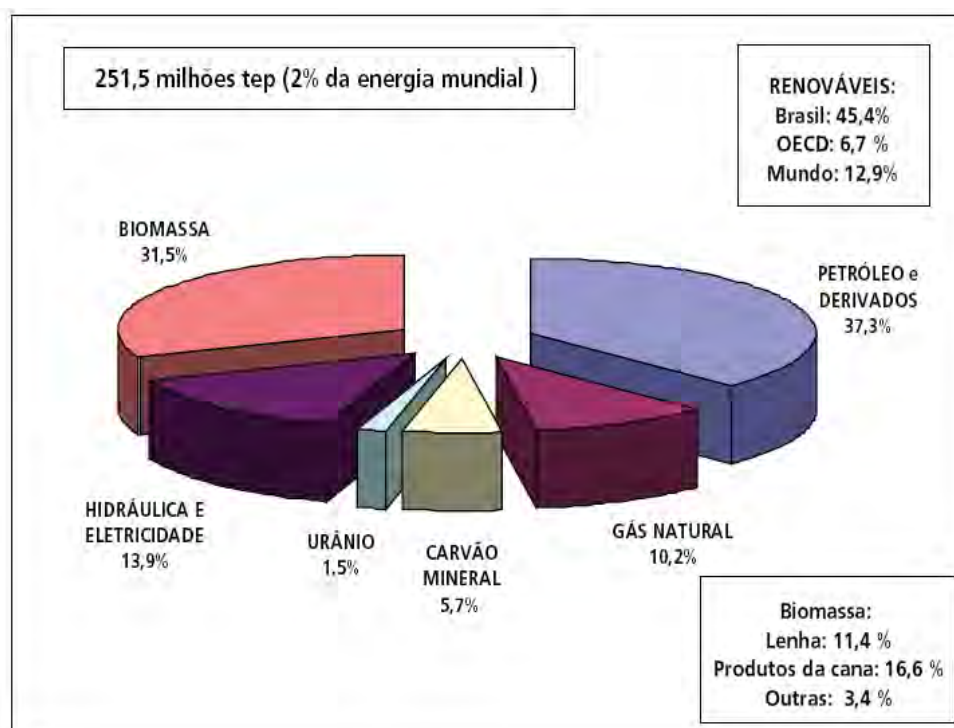


Figura 4. Oferta Interna de Energia do Brasil. (Fonte: MME, 2008).

No mundo, a geração de energia elétrica em sistemas de cogeração com o uso do bagaço de cana-de-açúcar é prática bastante comum. Um fator favorável para a implementação e modernização de unidades de cogeração com resíduos de cana é que a safra de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil coincide com o período seco do setor elétrico brasileiro, ou seja, o período em que geralmente não existe água disponível nos reservatórios das usinas hidrelétricas do sistema interligado brasileiro para suprimimento da demanda (CLEMENTE, 2003).

O sistema de geração de energia no Brasil que é essencialmente baseado em hidráulico de grande porte está sujeito à sazonalidade, pois este depende da disponibilidade de combustível primário existente, a água. Este fato tem ocasionado variações periódicas na quantidade de energia disponibilizada anualmente na rede de distribuição

existente. Isto significa que, num dado ano, pode-se ter uma disponibilidade de energia adequada ao consumo e, no ano subsequente, ter falta de energia (PALETTA, 2004). A Figura 5 apresenta a oferta de energia elétrica do Brasil em 2008.

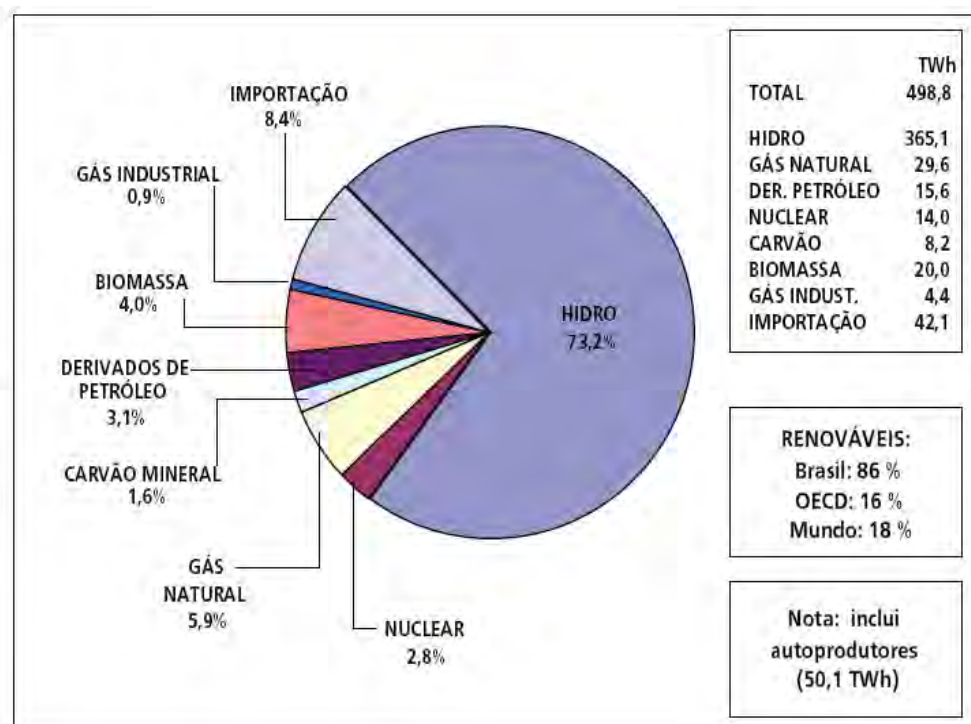


Figura 5. Matriz de Oferta de Energia Elétrica do Brasil (% e TWh). (Fonte: MME, 2008).

Ripoli et al. (2000), concluíram que a biomassa proveniente do bagaço e do palhico de cana-de-açúcar e da palha de arroz, se utilizados para cogeração, podem atender, anualmente, para a região Centro-Sul do Brasil, o seguinte número de habitantes, no que se refere ao consumo de eletricidade; palhico de cana: 7,0 milhões, bagaço de cana: 5,55 milhões e a palha de arroz: 0,26 milhões. Cerca de 12,5 milhões de pessoas podem ser servidas pela energia do palhico e bagaço, o que equivale mais do que a população atual de Portugal (10,6 milhões de pessoas).

Cogeração é a geração simultânea de energia térmica e mecânica a partir de uma mesma fonte primária de energia. A energia térmica produzida no processo de cogeração é utilizada diretamente no processo produtivo das usinas de açúcar e álcool como fonte de calor, já a energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho para o

acionamento dos diversos equipamentos mecânicos que compõem as usinas (como moendas e picadores) ou para acionamento de geradores para produção de energia elétrica. A palavra cogeração é usada para representar a empresa que possui em suas instalações equipamentos de cogeração. O combustível usado pelo cogerador pode ser convencional (gás, óleo, carvão, etc.) ou algum tipo de resíduo agroindustrial (cavacos de madeira, bagaço, palha de arroz, etc.) (COELHO, 1999; CLEMENTE, 2003). A Figura 6 apresenta esquematicamente uma usina com equipamento de cogeração.

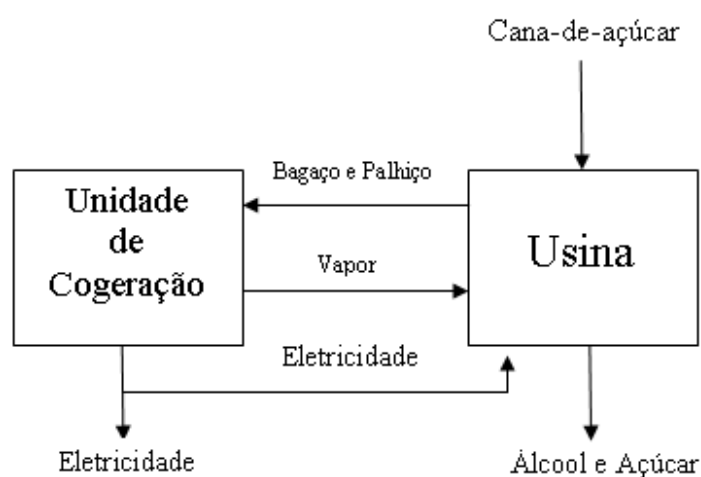


Figura 6. Esquema de cogeração de energia elétrica com subprodutos da cana. (Fonte: Adaptado CLEMENTE, 2003).

Rosa (1977), referindo-se à capacidade fotossintética da cana-de-açúcar comenta que 1,6% da energia solar incidente sobre a cultura é transformada em energia química, o que corresponde, em cada quilômetro quadrado de área plantada, a energia contida em 52 EBP.dia⁻¹. Apenas 6,8 EBP são transformados em álcool e/ou açúcar.

Ripoli et al. (1990b), partindo de resultados obtidos por vários autores brasileiros, estimaram a energia potencial disponível em 1 hectare de canavial (Tabela 3), com produtividade agrícola de 70 t.ha⁻¹.

Tabela 3. Estimativa da energia contida em 1 ha de canavial, com produtividade agrícola de 70 t.ha⁻¹.

Produtos	Quantidade	Energia Bruta (Mcal)	%
Etanol	5.250 L	20.877	28,07
Bagaço	17,5 t	31.325	42,12
Palhiço	9,7 t	22.166	29,81
Total	-	74.368	100

Também Ripoli & Molina Jr. (1991) estimaram a energia potencial disponível em 1 hectare de canavial (Tabela 4), tomando-se a produtividade nacional agrícola da cana-de-açúcar como 60 t.ha⁻¹. Afirmam que a utilização dos subprodutos da cana (bagaço e palhiço) como fonte de energia pode transformar a agroindústria sucroalcooleira em verdadeira usina de biomassa.

Tabela 4. Estimativa da energia contida em 1 ha de canavial, com produtividade agrícola de 60 t. ha⁻¹.

Produtos	Quantidade	Energia Bruta (Mcal)	%
Etanol	4.500 L	16.830	25,09
Bagaço	15 t	26.850	40,03
Palhiço	12 t	23.400	34,88
Total	-	67.080	100

Até 2006, mesmo com elevada produção de biomassa da cana-de-açúcar, a maioria das usinas e destilarias produziam energia elétrica apenas para o próprio consumo, sendo muito pequena a parcela comercializada com as distribuidoras de energia.

Para que a produção de energia elétrica a partir desta biomassa possa ser implementada em larga escala são necessários investimentos, por parte das usinas, na modernização dos processos produtivos e nos equipamentos geradores. Os produtores partidários da utilização desta fonte primária defendem que devem ser implantadas melhores linhas de financiamento e políticas que os incentivem a aumentar o parque gerador e que devem ser pagos melhores preços pela energia gerada devido às vantagens desta fonte de energia renovável (MENEGUELLO, 2006).

Em São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul foram identificados 210 empreendimentos com capacidade instalada potencial de 14.800 MW até

2015 e potencial de exportação de 10.200 MW para o sistema elétrico. Esse potencial, equivalente a uma usina do porte de Itaipu, está hoje adormecido nos canaviais da região. Apenas 39 empreendimentos que operam com biomassa da cana, e que juntos somam somente 2.800 MW ofereceram as garantias finais para participar do 1º leilão de energia de reserva, exclusivo para biomassa (JANK, 2009).

O 1º Leilão de Compra de Energia Reserva, realizado em 14 de agosto de 2008, contratou 548 lotes de 31 empreendimentos de geração, acrescentando ao Sistema Interligado Nacional (SIN) 2.379,40 MW. O resultado do Leilão possibilitou o aumento da participação da biomassa na matriz elétrica nacional, em conformidade com a política setorial de incentivo às fontes renováveis (MME, 2009).

Segundo a COOPERSUCAR (2009), ao utilizar energia da biomassa e tecnologia com baixa demanda relativa de insumos e combustível fósseis, o balanço energético do álcool torna-se ainda mais positivo - entre 9,2 a 11,7 unidades de energia produzida para cada unidade consumida na produção.

Lanças (1984) discorre sobre a evolução da utilização das alternativas energéticas. Com relação à utilização de biomassa em larga escala, descreve as seguintes vantagens: recursos abundantes, renováveis e disponíveis em diversas formas e grande variedade de uso; produção descentralizada, com recursos regionais e locais mais apropriados; redução da poluição ambiental em relação aos combustíveis fósseis.

A médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa (ANEEL, 2009). O palhico remanescente da colheita sem queima prévia ainda é pouco utilizado na cogeração de energia pelas usinas, devido, principalmente, à ausência de tecnologias que viabilizem o processo de retirada do campo, o grande número de maquinário envolvido no processo e ao elevado custo de transporte, uma vez que ocupa grande volume, dependendo do sistema utilizado.

4.3.2. Recolhimento do palhico

A principal questão em que o setor sucroalcooleiro busca resposta é como retirar o palhico do campo e disponibilizá-lo na usina de maneira mais adequada, pois, o

recolhimento dessa biomassa apresenta inúmeras opções. Usinas e órgãos de pesquisa oficiais e privados estão centrados nas seguintes opções de recolhimento do palhiço: a granel, por meio de colhedoras de forragens; enfardamento prismático ou cilíndrico; enfardamento por meio de prensas algodoeiras e colheita de cana integral, com as colhedoras operando com os sistemas de limpeza (exaustores e ventiladores) desligados (RIPOLI, et al. 2003a). A Figura 7 descreve as diferentes opções e etapas de recolhimento do palhiço de cana-de-açúcar.

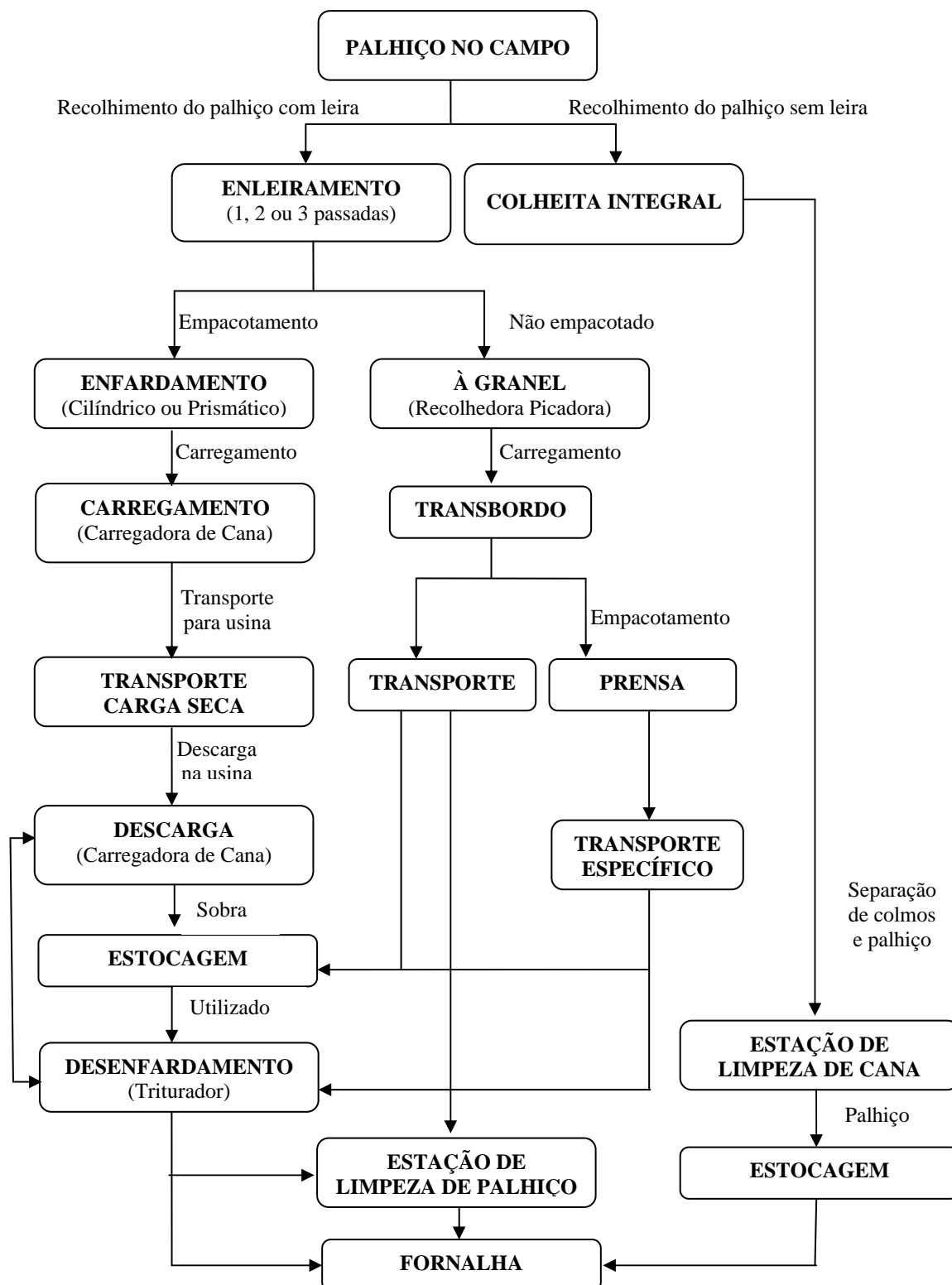


Figura 7. Opções e etapas do recolhimento do palhiço de cana-de-açúcar para a geração de energia. (Fonte: Adaptado FRANCO, 2003).

Segundo Magalhães & Braunbeck (2001), citados por Torrezan (2003), a palha seca apresenta uma baixa densidade e, para diminuir os custos com transporte, sugerem que seja efetuado um adensamento, onde o volume inicial é reduzido aproximadamente 15 vezes. De acordo com os autores, as tecnologias disponíveis para o adensamento são as enfardadoras de forragem de êmbolos e as rotativas.

Michelazzo & Braunbeck (2008), analisaram comparativamente seis sistemas de manejo do palhiço (fardo grande, picado a granel, briquetado, peletizado, fardo algodoeiro e integral) desde a colheita até a entrega na esteira da usina. De acordo com os autores, o sistema integral apresentou menor custo total, seguido dos sistemas picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, peletizado e briquetado.

A Figura 8 mostra uma estimativa do montante de investimentos necessários em máquinas para se processar 1.000 t.dia^{-1} de palhiço. Os sistemas de peletização e briquetagem foram os que apresentaram maiores investimentos. Apesar de conseguirem o maior grau de compactação entre os sistemas analisados, o fato de serem máquinas de baixa capacidade operacional, em torno de 50 t.dia^{-1} , elevam o custo final do palhiço, pois é preciso então adquirir-se maior número de máquinas para se processar o palhiço (Michelazzo & Braunbeck, 2008).

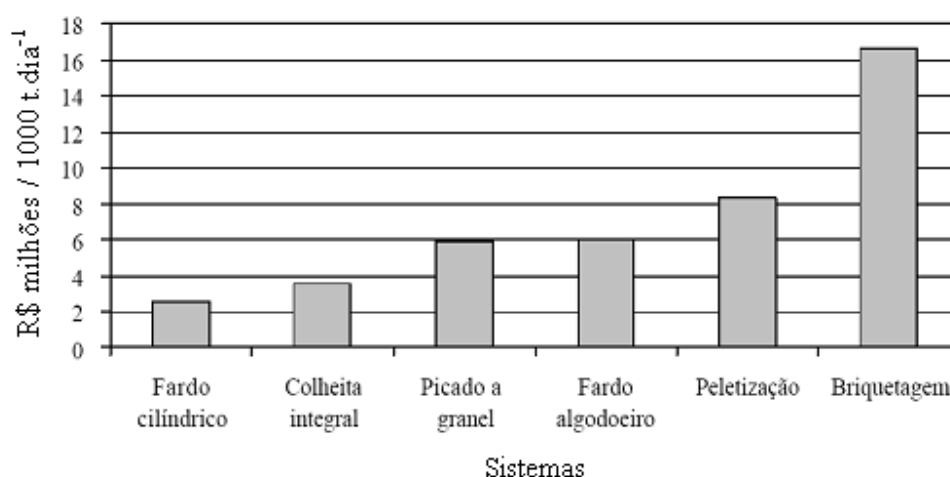


Figura 8. Estimativa da demanda de investimentos em máquinas dos diferentes sistemas de recolhimento do palhiço. (Fonte: MICHELAZZO & BRAUNBECK, 2008).

Para o sistema integral, o valor do investimento está entre os mais baixos, pois não é preciso adquirir novos equipamentos, uma vez que se aproveita o maquinário já utilizado pela cana. A maior demanda para o sistema integral está relacionada à estação de limpeza, que apesar de ter grande capacidade (aproximadamente 2.000 t.dia^{-1}) apresenta alto custo de implementação, próximo de R\$ 6 milhões.

Segundo Ripoli et al. (2003a), com os estudos desenvolvidos para o recolhimento do palhiço, as seguintes informações são fundamentais: a percentagem de terra existente no palhiço posto na usina, o custo da energia na forma de palhiço posto na usina por determinado sistema de recolhimento em EBP ou por litro de álcool, de gasolina ou ainda kW, e ainda a eficiência energética do sistema utilizado.

A Eficiência Energética é a relação entre a energia consumida, na forma de combustível, nas diversas operações mecanizadas e de transporte e a energia disponibilizada, na forma de palhiço colocado na usina. Ripoli et al. (2003b), avaliaram a eficiência energética (%) do palhiço recolhido em três diferentes sistemas, obtendo valores de 98,5% para a colheita integral, 98,0% para o palhiço colhido a granel e 83,0% para o palhiço enfardado.

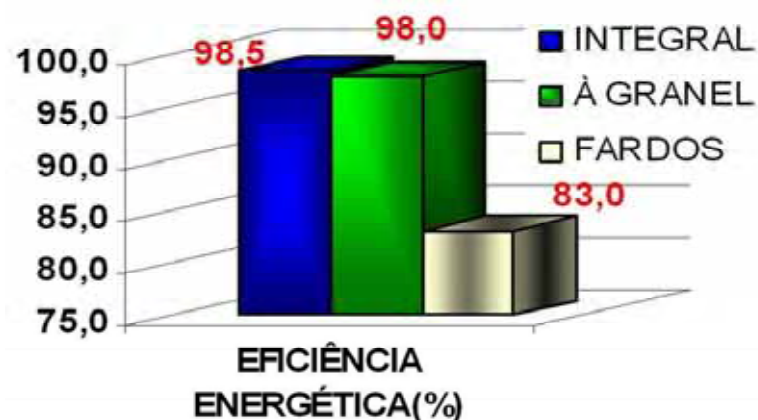


Figura 9. Eficiência energética de três diferentes sistemas de recolhimento de palhiço. (Fonte: RIPOLI 2003b).

Michelazzo & Braunbeck (2006), obtiveram os seguintes valores para a eficiência energética (%) dos diferentes sistemas de recolhimento do palhiço: colheita

integral 99,94%, fardo cilíndrico 99,37%, picado a granel 99,24%, fardo algodoeiro 98,87%, peletização 97,82% e briquetagem 96,67%, como mostra a Figura 10.

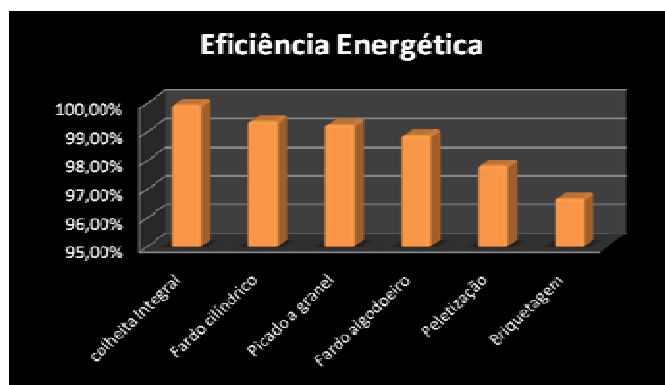


Figura 10. Eficiência energética dos diferentes sistemas de recolhimento do palhço.

Ripoli et al. (2003b), estudando os três sistemas de recolhimento do palhço, encontraram percentagem de terra de 4,50% para o palhço recolhido a granel, 1,39% para colheita integral e 0,63% para o palhço enfardado, como mostra a Figura 11.



Figura 11. Percentagem de terra encontrada em três diferentes sistemas de recolhimento do palhço. (Fonte: RIPOLI 2003b).

Segundo Franco (2003), a quantidade de terra pode ser influenciada por fatores como variedade da cana, maior exsudação (diretamente dependente da intensidade do fogo durante a queima), número de cortes da cana, pressa no carregamento (dimensionamento incorreto das frotas), dentre outros.

Ripoli et al. (2003b), estudando os custos efetivos do palhiço posto na usina obteve valores em $\text{R}\$.t^{-1}$ e valores em $\text{R}\$.1000L^{-1}$ de etanol, de acordo com a Figura 12.

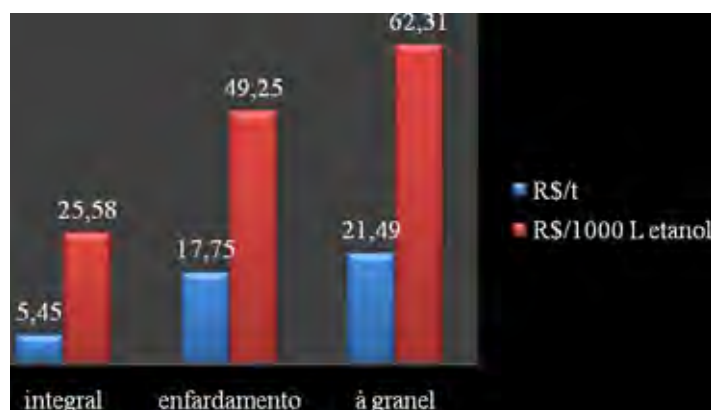


Figura 12. Custo efetivo do palhiço posto na usina por três diferentes sistemas de recolhimento.

4.3.2.1. Enfardamento do palhiço

Dentre as inúmeras opções para recolhimento do palhiço no campo, tem-se discutido e muito utilizado a retirada do palhiço em fardos (RIPOLI & GAMERO, 2007). Segundo Ripoli & Ripoli (2007) a enfardadora é uma máquina que coleta o palhiço da leira e comprime-o em um pacote fácil de ser manuseado (fardo). Normalmente a enfardadora é utilizada para feno, podendo ser utilizada para enfardar outros materiais como restos de culturas, palhiço de cana, etc.

Segundo Ripoli (2002), para a coleta do palhiço em fardos têm-se as seguintes operações: primeiro, o resíduo é enleirado por máquinas do tipo ancinho enleirador (Figura 13) e posteriormente, enfardado. Os fardos podem ser prismáticos (Figura 14) ou cilíndricos (Figura 15). Posteriormente os fardos são carregados e colocados em caminhões

para serem transportados para o centro de processamento. O grande número de maquinário envolvido no sistema de recolhimento do palhço tem dificultado e encarecido este processo.



Figura 13. Enleiramento do palhço, anterior ao enfardamento. (Fonte: RIPOLI, 2002).



Figura 14. Fardo prismático de palhço. (Fonte: RIPOLI, 2002).



Figura 15. Fardo cilíndrico de palhiço. (Fonte: RIPOLI, 2002).

Michelazzo & Braunbeck (2008) também apresentam as características gerais do sistema de recolhimento do palhiço, chamados por eles de fardo grande: depois de enleirado, o palhiço é recolhido pela enfardadora que realiza uma prensagem de baixa pressão, com amarração, utilizando-se mecanismo biela-manivela ou de rolo. Os fardos são liberados pela enfardadora e permanecem no campo para serem carregados e transportados até o pátio de armazenamento. No momento da queima, os fardos são picados para facilitar a alimentação e combustão na caldeira. A Tabela 5 apresenta os resultados de desempenho de enfardadoras cilíndricas e prismáticas de acordo com Molina Jr. (1991).

Tabela 5. Desempenho de enfardadoras de fardos cilíndricos e retangulares

Desempenhos		Tipos de enfardadoras	
		Fardos Cilíndricos	Fardos Retangulares
Efetivos	(ha.h ⁻¹)	0,29	0,22
	(t.h ⁻¹)	2,49	2,21
Operacionais	(ha.h ⁻¹)	0,24	0,1
	(t.h ⁻¹)	1,45	1,04
Massas médias/ fardos	(kg)	371	16,04
Massas específicas	(kg.m ⁻³)	146,9	99,6
Resíduos recolhidos	(t.ha ⁻¹)	8,63	10,06
Nº total de fardos		7.360	123.950
Recolhimentos	(%)	71	78

(Fonte: MOLINA JR., 1991).

Molina Jr. et al. (1991), estudando o desempenho operacional de uma enfardadora de forragens operando em resíduos de colheita manual de cana sem queima, encontraram capacidade efetiva de 0,61 ha.h⁻¹ e 2,89 t.h⁻¹.

Ripoli (2002), estudando o palhiço enfardado (prismático e cilíndrico) da cana-de-açúcar, obteve 42 fardos com produtividade média de 8,79 t.ha⁻¹, umidade média de 22,58% e energia média de 11,22 EBP.ha⁻¹.

A influência da densidade (massa específica) do material sobre a carga transportada para os sistemas de recuperação do palhiço pode ser vista na Tabela 6. Para o sistema de fardo cilíndrico, o peso da carga transportada é inferior ao peso bruto total permitido por lei, resultando em subutilização do caminhão e elevando o número de viagens. Visto que, para se atingir o peso permitido, as dimensões da carga ultrapassariam o permitido por lei (MICHELAZZO & BRAUNBECK, 2008).

Para Torrezan (2003), a vantagem de obtenção de fardos com massas específicas maiores é a economia do volume ocupado no transporte e no armazenamento, a facilidade de manejo e maior resistência às intempéries.

Tabela 6. Desempenho do transporte em cada sistema de recolhimento do palhiço. (Fonte: MICHELAZZO & BRAUNBECK, 2008).

Parâmetros	Sistemas					
	Picado a granel	Fardo algodoeiro	Fardo cilíndrico	Briquetagem	Peletização	Colheita integral
Carga efetiva ¹	6	10	11,5	35	35	28
Viagens ²	156	100	87	29	29	36
Caminhões ³	18	9	9	3	3	5

¹Carga efetiva (t) do caminhão para uma capacidade volumétrica da carga de 80 m³

²Número de viagens realizadas pelos caminhões nos sistemas para transportar 1000 t.dia⁻¹

³Quantidade de caminhões para transportar 1000 t.dia⁻¹

Ripoli & Gamero (2007) estudaram o recolhimento por enfardamento cilíndrico do palhiço da cana-de-açúcar. Dentre as inúmeras variáveis estudadas, as três fundamentais foram: índice de terra arrastada junto ao palhiço enfardado, com 1,39% em massa; eficiência energética do processo com 98% e o custo efetivo do equivalente energético do palhiço posto no pátio da usina de R\$10,90.EBP⁻¹.

No processo de recolhimento, as regulagens da máquina objetivando enfardar maior quantidade de palhiço resultarão em maior quantidade de terra que o acompanhará, aumentando a contaminação do material, o que não é desejável, pois poderá causar problemas nas fornalhas das usinas, caso o palhiço tenha o destino de ser utilizado como combustível (RIPOLI, 2002). Molina Jr. (1991), estudando o recolhimento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar concluiu que a operação de enfardamento deve-se dar com o enleiramento do material, uma vez que o não enleiramento mostrou-se ineficiente na tentativa de obter fardo com pequena quantidade de terra.

Michelazzo & Braunbeck (2008), estudando o custo total de recolhimento do palhiço em três distâncias (15, 50 e 100 km), Figura 16, concluiu que no sistema de fardo cilíndrico o custo de recolhimento do palhiço foi influenciado positivamente pela corda de amarrar o fardo, sobretudo pela quantidade de corda utilizada (cerca de 250 g por fardo) e por seu valor unitário (por volta de R\$9,00.kg⁻¹ de corda). O custo da corda é de cerca de R\$10,00.t⁻¹ de palhiço enfardado, representando quase 40% do custo total do enfardamento.

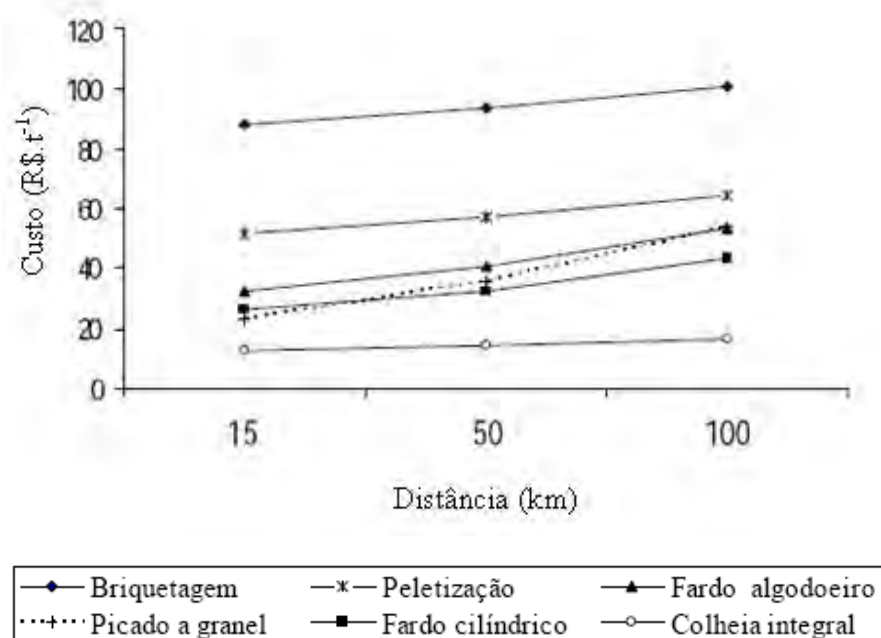


Figura 16. Estimativa do custo total do palhiço recuperado nos vários sistemas, em três distâncias (15, 50 e 100 km). (Fonte: MICHELAZZO & BRAUNBECK, 2008).

A COPERSUCAR, citada por Torrezan (2003), através do Projeto BRA/96/G31 (1998), realizou estudos para avaliar a viabilidade de recolher o palhiço deixado no campo após a colheita de cana crua e ensaiou algumas enfardadoras (Sode JS-90, Semeato ROL-1518 e New Holland NH-570). Os ensaios foram realizados de 2 a 3 dias após a colheita da cana crua. Com base nos ensaios, o sistema das enfardadoras de fardos retangulares é o mais indicado, pois apresentam: maior capacidade operacional; maior facilidade de operação com palhiço e pedaços de cana e melhor ocupação do espaço da carroceria do caminhão de transporte dos fardos. O resumo dos ensaios de enfardamento encontra-se na Tabela 7.

Para Torresan (2003), a retirada de palhiço por meio de ancinho enleirador e enfardadora prismática, é viável do ponto de vista operacional e de eficiência energética. De acordo com Ripoli (2002), a energia contida no palhiço, que ainda hoje é descartado com a prática de queima de pré-colheita, é considerável e deve ser levada em conta como componente relevante na matriz energética brasileira, mesmo este não sendo recolhido em sua totalidade.

Tabela 7. Descrição dos tratamentos, massas, massas específicas e quantidades de terra dos fardos e capacidades das enfardadoras.

Enfardadoras	Enleiramentos	Massa dos fardos (kg)	Massas específicas (kg.m ⁻³)	Quantidades de terra nos fardos (%)	Capacidade das enfardadoras (t.ha ⁻¹)
JS-90	Com	105,8	118,0	5,6	1,8
	Sem	119,3	129,3	2,8	2,0
ROL-1518	Com	285,4	94,7	6,2	2,7
	Sem	260,0	107,5	2,3	1,0
NH-570	Com	15,0	112,0	-	9,0
	Sem	-	-	-	-

(Fonte: TORREZAN, 2003).

4.3.2.1.1. Mapeamento do palhiço enfardado utilizando Agricultura de Precisão

A Agricultura de Precisão é um conjunto de técnicas e procedimentos que permite conhecer, localizar geograficamente e delimitar áreas de diferente produtividade,

através do emprego da informática, programas específicos, sensores, controladores de máquinas e sistema de posicionamento global (GPS), segundo Tschiedel & Ferreira (2002).

A Agricultura de Precisão é utilizada pela agricultura objetivando o incremento da eficiência da utilização de insumos, reduzindo os desperdícios e, por consequência, minimizando os impactos ambientais e os custos de produção. Segundo Kincheloe (1994), por meio da utilização de técnicas otimizadas pode-se aproveitar, ao máximo, o potencial da área cultivada e da cultura implantada.

Ripoli (2002) mapeou o palhiço enfardado utilizando as técnicas da Agricultura de Precisão. De acordo com o autor o palhiço resultante da colheita mecanizada da cana crua é enleirado com o ancinho enleirador de maneira que o número de passadas seja de uma a três e, após as leiras efetuadas, o material é enfardado com as enfardadoras disponíveis, podendo ser fardos prismáticos ou cilíndricos.

Após o enfardamento de parte do material contido no talhão, efetua-se o georreferenciamento de cada um dos fardos obtidos por meio de um receptor móvel de GPS. A seguir, com o auxílio de uma carregadora convencional de cana, efetua-se a pesagem individual dos mesmos, utilizando a célula de carga acoplada à garra da carregadora e cordas de nylon presas a ganchos metálicos. Utilizando o método do caminhamento para obtenção da área de interesse e munido de um receptor móvel e o coletor do GPS, levanta-se o contorno da área em questão. Os dados obtidos das localizações georreferenciadas dos fardos, após terem seus posicionamentos corrigidos resultam em um mapa, como ilustra a Figura 17. Para a elaboração do mapa da quantidade de palhiço enfardado são utilizados diversos softwares para obtenção, tratamento e disponibilização dos dados (RIPOLI, 2002).

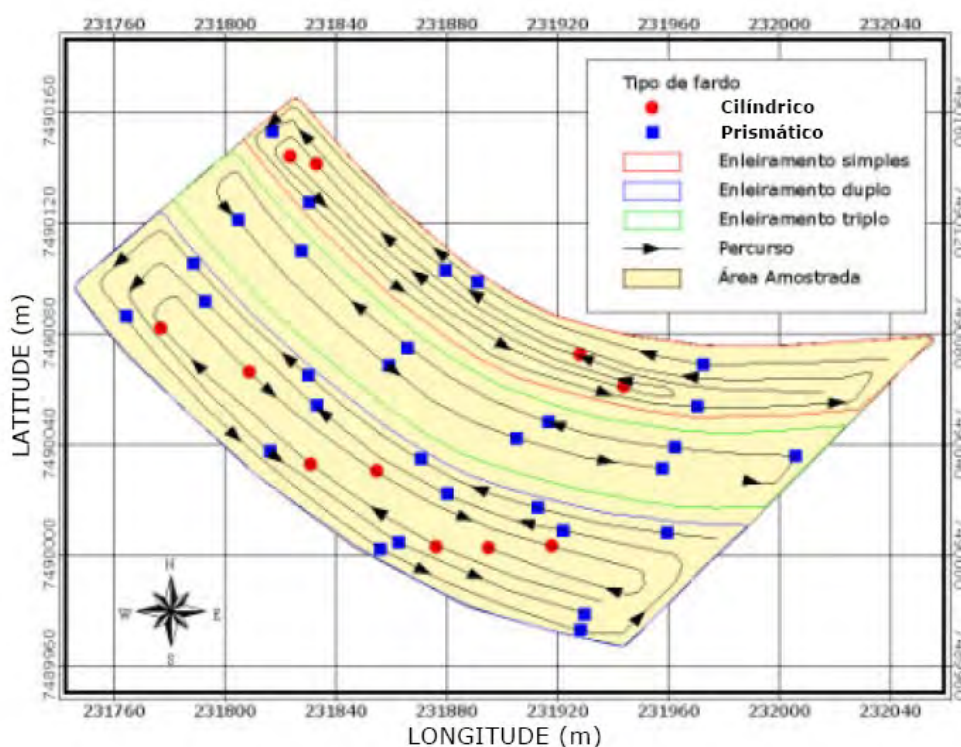


Figura 17. Mapa de localização dos fardos, com diferenciação de tipos de fardos, percurso realizado pelas enfardadoras e divisão das áreas do talhão, em função dos tipos de enleiramento. (Fonte: RIPOLI, 2002).

Com base no mapa pode-se observar a diferenciação dos tipos de fardos; a divisão da área do talhão em três partes, referentes ao número de passadas do ancinho enleirador, e o percurso efetuado pelas enfardadoras.

Segundo Ripoli (2002), o sistema de posicionamento utilizado no estudo apresentou resultados adequados para a localização dos fardos no talhão e para o levantamento da área em questão. De acordo com o autor, a correção diferencial da posição, em laboratório, permitiu a elaboração do mapa do palhiço enfardado, o que possibilita a aplicação de técnicas da Agricultura de Precisão em grandes áreas comerciais.

No processo de recolhimento do palhiço foi visto que primeiro o palhiço é enleirado, e depois compactado em forma de fardos. Pode-se usar a Agricultura de Precisão para localizar a posição geográfica de cada fardo no talhão. Assim, o próximo passo é definir a rota que o caminhão irá seguir para o recolhimento do palhiço no talhão, de forma

que o custo com transporte seja o mínimo possível. Este trabalho sugere a obtenção da rota utilizando técnicas da Teoria dos Grafos, as quais são discutidas a seguir.

4.4. Teoria dos Grafos

Otimização combinatória é a área que tem como foco o estudo de problemas nos quais o objetivo é minimizar ou maximizar uma dada função sobre os elementos de um domínio discreto, tipicamente finito. Essa área está intimamente relacionada com programação linear, teoria da complexidade computacional e teoria dos grafos (SILVA, 2007). A Teoria dos Grafos estuda objetos combinatórios que são bons modelos para muitos problemas em vários ramos da matemática, informática, engenharia, indústria e muitos outros. Muitos dos problemas envolvendo grafos tornaram-se célebres por terem interessante desafio intelectual e importantes aplicações práticas (FEOFIOFF et al., 2004).

O mais clássico e antigo problema que faz uso de grafos como modelo matemático é o problema das sete pontes de Königsberg. A Figura 18 ilustra o conjunto das sete pontes (a, b, c, d, e, f, g); elas conectam duas ilhas (A e D) entre si e as ilhas com as margens (B e C).

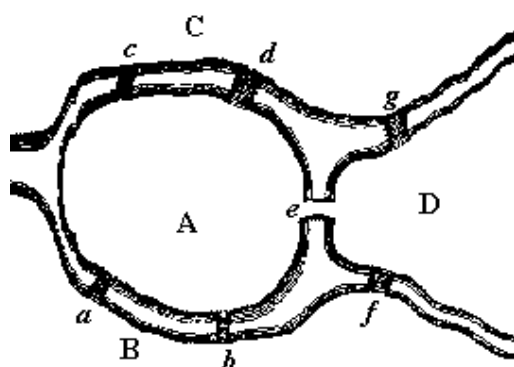


Figura 18. As sete pontes que cruzavam o rio Pregel na cidade de Königsberg, Prússia Oriental. (Fonte: Adaptado BIGGS et al., 1986).

Por muito tempo os cidadãos de Königsberg discutiram se era possível elaborar um percurso em torno da cidade que atravessasse cada uma das sete pontes apenas uma vez. O matemático suíço Leonhard Euler, em 1736, provou que não existia caminho que

possibilitasse tais restrições. Euler usou um raciocínio muito simples: transformou os caminhos em retas e suas intersecções em pontos (nós), criando possivelmente o primeiro grafo da história. Euler percebeu que para cada ponto deve haver um número par de caminhos, pois será preciso um caminho para “entrar” e outro para “sair”. O ciclo Euleriano é um percurso que começa em um nó de partida, passa por todos os nós do grafo e termina no nó de partida.

Considerando que muitos ramos da matemática foram motivados por problemas fundamentais de cálculo, de movimento, de medição; os problemas que levaram ao desenvolvimento da Teoria dos Grafos foram muitas vezes desenhados para testar a criatividade. Mas apesar da aparente banalidade de tais enigmas, a teoria dos grafos tornou-se um tema rico em resultados teóricos e de uma surpreendente variedade e profundidade (BIGGS et al., 1986). A partir desse estudo, o problema das sete pontes de Königsberg, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos com intuito de propor ou aplicar técnicas para resolução de problemas envolvendo grafos.

4.4.1. Alguns conceitos básicos da Teoria dos Grafos

Grafo é uma noção simples, abstrata e intuitiva, usada para representar a idéia de alguma espécie de relação entre os “objetos”. Graficamente, aparece representado por uma figura com nós ou vértices, significando os objetos, unidos por um traço denominado aresta, configurando a relação imaginada (ALOISE & CRUZ, 2001).

Um grafo $G(V, A)$ é definido pelo conjunto finito de vértices V e pelo conjunto de pares ordenados de vértices, chamadas arestas, A . Uma aresta de G é denotada por (u, v) .

A Figura 19 ilustra um grafo $G(V, A)$, onde $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ e $A = \{\{1, 3\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{6, 6\}\}$.

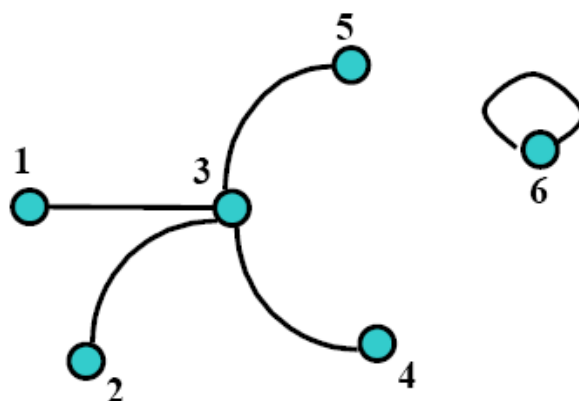


Figura 19. Exemplo de grafo $G(V, A)$. (Fonte: ALOISE & CRUZ, 2001).

A Figura 20 ilustra outra forma de representar um grafo $G(V, A)$, onde:

$V = \{x / x \text{ é uma pessoa}\}$

$A = \{(u, v) \mid u \text{ é amigo de } v\}$

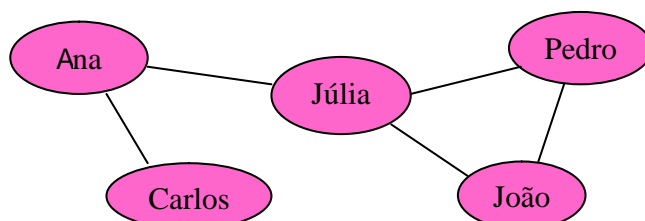


Figura 20. As pessoas são os vértices do grafo e as ligações entre elas, as arestas, indicam se são amigas ou não.

$V = \{\text{Ana, Carlos, Júlia, Pedro, João}\}.$

$A = \{(\text{Ana, Carlos}); (\text{Ana, Júlia}); (\text{Júlia, João}); (\text{Júlia, Pedro}); (\text{Pedro, João})\}.$

A relação u é amigo de v é uma relação simétrica, ou seja, se u é amigo de v então v é amigo de u . Como consequência, as arestas que ligam os vértices não possuem qualquer orientação.

4.4.1.1. Grafo orientado (dígrafo)

Na literatura, o termo grafo refere-se a não presença de orientações das arestas. Quando há necessidade de orientação das arestas, estes são chamados de grafo orientado, ou dígrafo, ou quiver.

Como exemplo, considere o grafo da Figura 21 definido por:

$$V = \{x / x \text{ é uma pessoa da família Castro}\}$$

$$A = \{(u, v) \mid u \text{ é pai ou mãe de } v\}$$

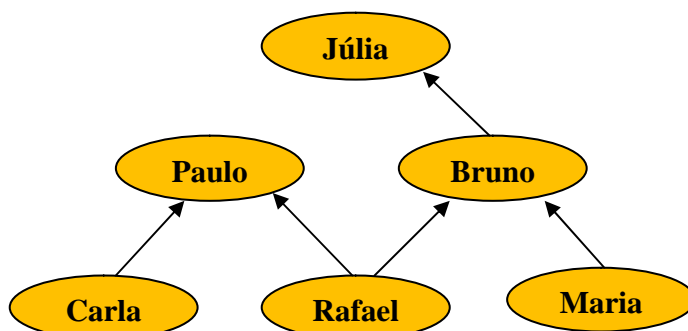


Figura 21. As pessoas são os vértices do grafo e as ligações orientadas entre elas, as arestas, indicam se são pai, mãe, filho ou filha.

$$V = \{\text{Carla, Rafael, Maria, Paulo, Bruno, Júlia}\}.$$

$$A = \{(\text{Carla, Paulo}); (\text{Rafael, Paulo}); (\text{Rafael, Bruno}); (\text{Maria, Bruno}); (\text{Bruno, Júlia})\}.$$

A relação definida por A não é simétrica, pois se u é pai ou mãe de v então v não pode ser pai ou mãe de u . Há, portanto, uma orientação na relação, com um correspondente efeito na representação gráfica de G .

4.4.1.2. Grafo valorado (ponderado)

Um grafo é valorado ou ponderado, quando um número real (peso) está associado aos vértices e/ou as arestas. Seja $G(V, A)$ um grafo valorado então existe uma ou mais funções relacionando V e/ou A com um conjunto de números. A Figura 22 mostra o grafo $G(V, A)$ valorado, onde:

$$V = \{x / x \text{ é uma cidade com aeroporto}\}$$

$$A = \{(u, v, t) / \text{há linha aérea ligando } u \text{ a } v, \text{ sendo } t \text{ o tempo esperado de vôo}\}$$

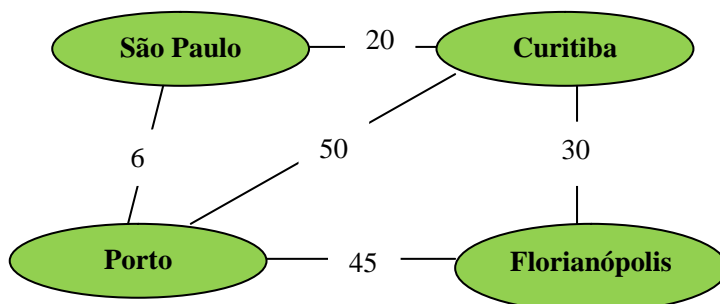


Figura 22. As cidades são os vértices e o tempo de voo entre elas, as arestas do grafo.

$V = \{\text{Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, São Paulo}\}.$

$A = \{(\text{Porto Alegre, Florianópolis}); (\text{Porto Alegre, Curitiba}); (\text{Porto Alegre, São Paulo}); (\text{Florianópolis, Curitiba}); (\text{Curitiba, São Paulo})\}.$

4.4.2. Algoritmo de Dijkstra para o cálculo do caminho mínimo

Dijkstra, em 1959, estudou e propôs um algoritmo para resolver dois problemas de conexidade em grafos: árvore geradora mínima e caminhos mínimos com fonte única. O problema dos caminhos mínimos é um problema clássico em otimização combinatória. Dados um grafo G com pesos não negativos nas arestas (grafo ponderado) e um vértice fonte s , encontrar caminhos (de pesos) mínimos de s a todos os demais vértices (NEVES, 2007). Dado um grafo com arestas ponderadas, o problema da árvore geradora mínima consiste em encontrar uma árvore geradora em que todos os vértices se conectem (direta ou indiretamente) uns aos outros. Essa estrutura deve possuir o menor peso possível, onde o peso é dado pela soma dos pesos das arestas escolhidas (mínima).

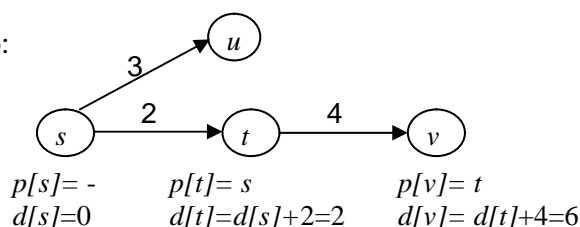
O algoritmo de Dijkstra é um algoritmo que localiza o caminho de custo mínimo entre um vértice fonte e um vértice escolhido do grafo, e não necessariamente este caminho de custo mínimo passará por todos os vértices (nós) do grafo. Este algoritmo não garante, contudo, a exatidão da solução caso haja a presença de arestas com pesos negativos (grafo conservativo). De acordo com Neves (2007), o algoritmo de Bellman-Ford resolve o problema de caminhos mínimos com fonte única em grafos conservativos; e o algoritmo Floyd-Warshall determina caminhos mínimos entre todos os pares de vértices, em um grafo conservativo.

Como definido, um caminho em G é uma sequência de vértices $P = \langle v_0, v_1, \dots, v_k \rangle$ tal que (v_i, v_{i+1}) é uma aresta de G para $i = 0, 1, \dots, k - 1$. Diz-se ainda que P é um caminho de v_0 a v_k .

O peso de um caminho P é a soma dos pesos (valores) das suas arestas e será denotado por $w(P)$. Para dois caminhos P e D de s a v , dizemos que P é menor que D se $w(P) < w(D)$. A distância de u a v em G , denotada por $\text{dist}(u, v)$, é definida como o peso mínimo de um caminho de u a v em G . Se tal caminho não existir, denota-se $\text{dist}(u, v) = \infty$.

Para cada vértice $v \in V$, o algoritmo de Dijkstra calcula uma estimativa $d[v]$ da distância do vértice fonte s até v e armazena o precedente $p[v]$ de v em um caminho de s a v com peso $d[v]$.

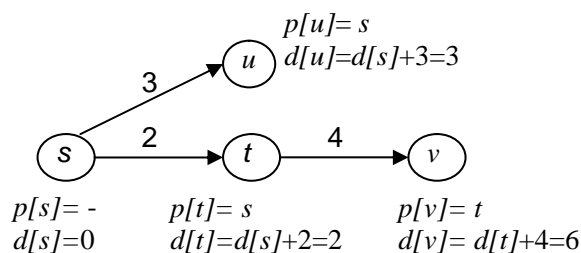
Exemplo:



Caminho de s a v é $\langle s, t, v \rangle$; peso = 6.

Durante sua execução, o algoritmo executa uma série de “relaxações” das arestas. Uma relaxação significa verificar se é mais “barato” chegar a v passando por u . Se o $d[v]$ atual é tal que $d[v] > (d[u] + w(u, v))$, isto significa que o caminho de s a v passando por u de peso $(d[u] + w(u, v))$ é menor que o caminho de peso $d[v]$ encontrado até o momento. Se isso ocorre, então o caminho de s a v é substituído por esse novo caminho que passa por u . Isto é feito atribuindo a $d[v]$ o valor $d[u] + w(u, v)$ e atribuindo ao predecessor $p[v]$ o vértice u . Em cada iteração, o algoritmo seleciona um vértice u e, para cada v sucessores de u aplica-se a relaxação.

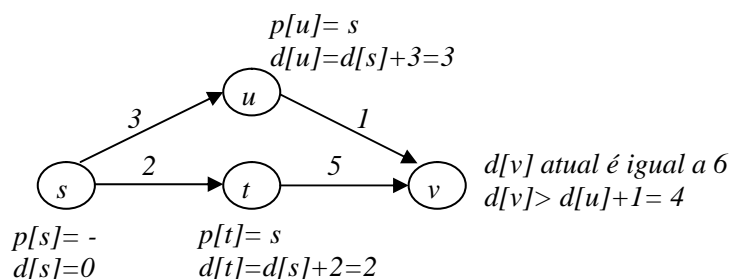
Exemplo de relaxação:



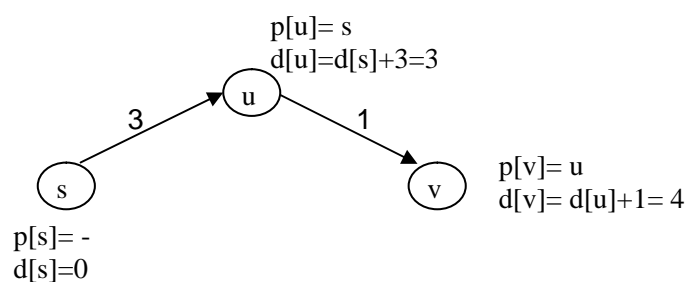
Caminho de s a v atual é $\langle s, t, v \rangle$;
peso $d[v] = 6$.



Verificar se é mais “barato” chegar a v passando por u .



O caminho de s a v é substituído pelo novo caminho que passa por u . Atribui a $d[v]$ o valor $d[u] + w(u, v)$ e atribui ao predecessor $p[v]$ o vértice u .



Tem um novo caminho s a v com peso menor.

Caminho atual passa a ser $\langle s, u, v \rangle$ com peso $d[v] = 4$.

Um conjunto Q é implementado como uma fila de prioridades. Uma fila de prioridades deve suportar as seguintes operações: inserir um novo elemento na fila, diminuir o valor da chave de um elemento específico da fila e remover um elemento com menor chave da fila.

O conjunto S contém os vértices escaneados (fechados). O elemento u de menor chave em Q é o vértice mais próximo de v ainda não escaneado (aberto). Este é extraído de Q , escaneado e inserido em S . Então as distâncias estimadas dos vértices e a árvore dos caminhos mínimos são atualizadas. Um vértice é escaneado no máximo uma vez durante a execução do algoritmo.

A árvore de caminho mínimo começa contendo apenas o vértice raiz s e a cada iteração, um novo vértice é acrescentado. Ao final, obtém-se uma árvore de caminho mínimo.

Uma vez fechados todos os vértices, para reconstruir o caminho mínimo de s para v , basta utilizar o vetor de precedentes $p[.]$. Mais precisamente, este caminho é a sequência $\langle s, \dots, p[p[p[v]]], p[p[v]], p[v], v \rangle$.

Resumidamente, o algoritmo parte de uma estimativa inicial para o custo mínimo e vai sucessivamente ajustando esta estimativa. Escolhido um vértice como raiz, este algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo, mas não necessariamente o caminho de custo mínimo passará por todos os vértices do grafo. Um vértice estará escaneado (fechado) quando já tiver sido obtido um caminho de custo mínimo do vértice raiz até ele. Caso contrário o vértice é dito estar não escaneado (aberto). A execução do algoritmo estará terminada quando todos os vértices estiverem escaneados.

Passos para utilizar o algoritmo de Dijkstra:

1. Atribua valor zero ao vértice raiz s e valor infinito aos demais vértices do grafo $G(V,A)$. O vértice raiz encontra-se aberto. $d[s] = 0$, $p[s] = -$, $d[t] = \infty$ para qualquer t tal que $t \in G(V,A)$ e $t \neq s$;
2. Os sucessores de s são abertos. A cada sucessor de s atualize $d[.]$ e $p[.]$ e feche o vértice s . $S = \{s\}$;
3. Enquanto houver vértice aberto:
 - Escolha k o vértice aberto cuja estimativa seja a menor dentre todos os vértices abertos;
 - Feche o vértice k e atualize S ;
 - Para os vértices j adjacentes (sucessores) de k faça:

- some a estimativa do vértice k com o custo da aresta que une k a j , $d[k] + w(k, j)$;
 - caso esta soma seja melhor que a estimativa anterior para o vértice j , substitua-a e anote k como precedente de j , atualize $d[j]$ e $p[j]$;
4. O menor caminho de s a v é $< s, \dots, p[p[p[v]]], p[p[v]], p[v], v >$. Fim.

Considere o grafo ponderado $G(V, A)$ da Figura 23, sendo s o vértice raiz de G . Com a finalidade de ilustração, será calculado o caminho de custo mínimo do vértice s ao vértice z usando o algoritmo de Dijkstra.

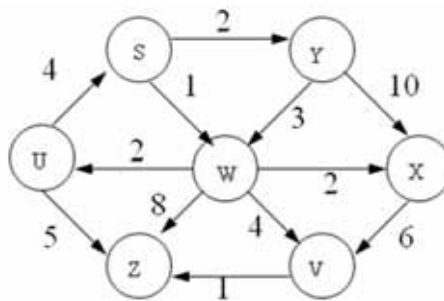
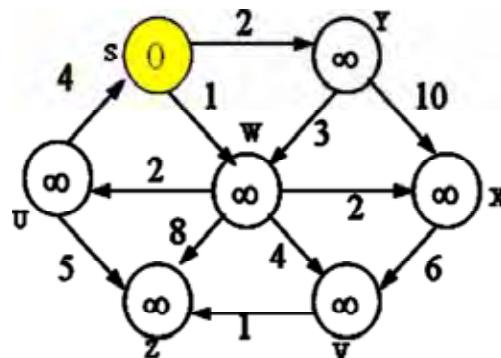


Figura 23. Grafo G : Estimativas iniciais dos seus vértices, e pesos e orientação de suas arestas.

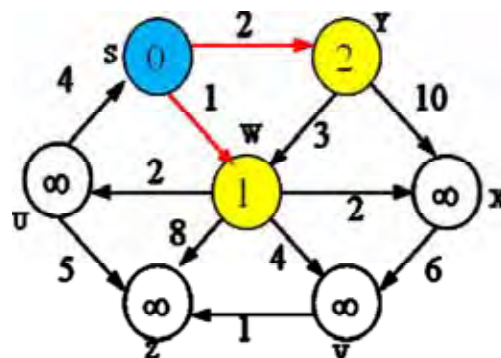
- Inicialmente todos os vértices têm estimativa de custo infinito, exceto s , vértice escolhido como raiz, que tem custo zero, $d[s] = 0$. O vértice s encontra-se aberto, pois é o vértice raiz. O conjunto S de vértices fechados está vazio.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Precedentes $p[i]$	-	-	-	-	-	-	-



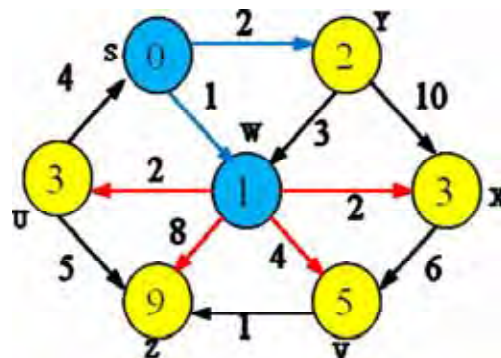
- Fecha o vértice s e calculam-se as estimativas para os vértices w e y ; vértices sucessores de s . $S = \{s\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	∞	∞	∞	∞
Precedentes $p[i]$	-	s	s	-	-	-	-



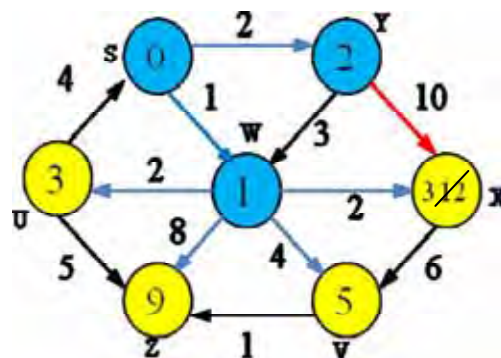
- Como a menor estimativa aberta é para o vértice w , fecha-se w e calculam-se as estimativas para os vértices x, u, z, v ; sucessores de w . $S = \{s, w\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	9	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	w	w



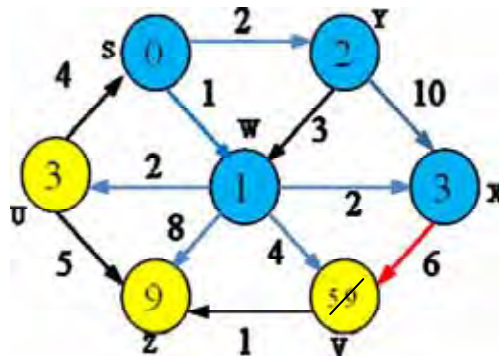
- A menor estimativa aberta é a do vértice y . Fecha-se y e calcula-se a estimativa para o vértice x , sucessor aberto de y . $S = \{s, w, y\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	$3 < 12$	3	9	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	?	w	w	w



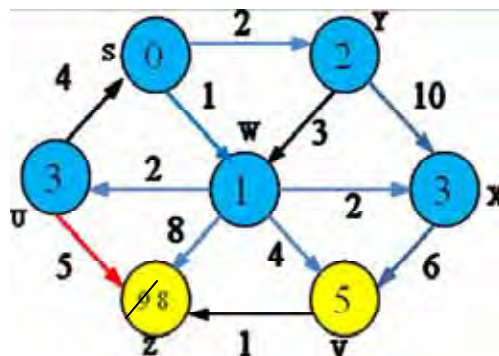
- A estimativa para o vértice x , tendo como precedente o vértice w é igual a 3. A estimativa para o vértice x , tendo como precedente o vértice y é igual a 12. Como $d[w] + w(w, x) < d[y] + w(y, x)$, ou seja, se $1 + 2 < 2 + 10$, escolhe-se a estimativa para o vértice x , tendo como precedente o vértice w . A menor estimativa em aberto para o vértice x e para o vértice u , é 3. Escolhido o vértice x , ao acaso, fecha-se x e calcula-se a estimativa para o vértice v , sucessor de x . $S = \{s, w, y, x\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	9	$5 < 9$
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	w	?



- A estimativa para o vértice v , tendo como precedente o vértice w é igual a 5. A estimativa para o vértice v , tendo como precedente o vértice x é igual a 9. Então, como $d[w] + w(w, v) < d[x] + w(x, v)$, ou seja, $1 + 4 < 3 + 6$, escolhe-se a estimativa para o vértice v , tendo como precedente o vértice w . A menor estimativa em aberto encontra-se no vértice u . Fecha-se u e calcula-se a estimativa do vértice u para o vértice z , sucessor de u . $S = \{s, w, y, x, u\}$.

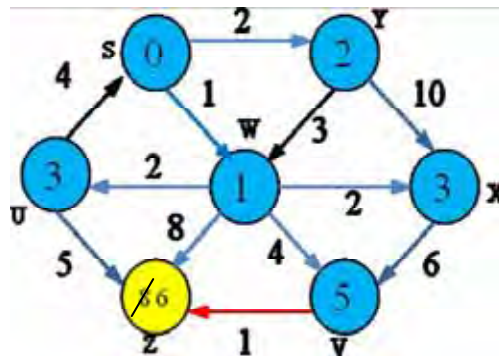
Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	$9 > 8$	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	?	w



- A estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice w é igual a 9. A estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice u é igual a 8. Então, como $d[w] + w(w, z) > d[u] + w(u, z)$, ou seja, $1 + 8 > 3 + 5$ escolhe-se a estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice u . A menor estimativa em aberto encontra-

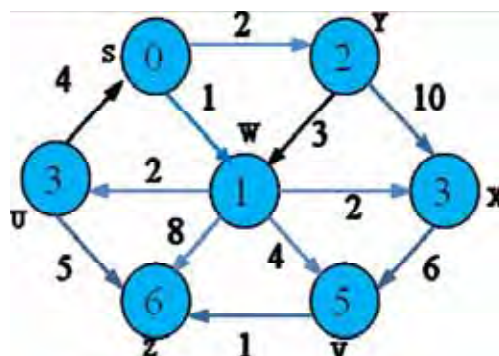
se no vértice v . Fecha-se v e calcula-se a estimativa do para o vértice z , sucessor de v . $S = \{s, w, y, x, u, v\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	$8 > 6$	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	?	w



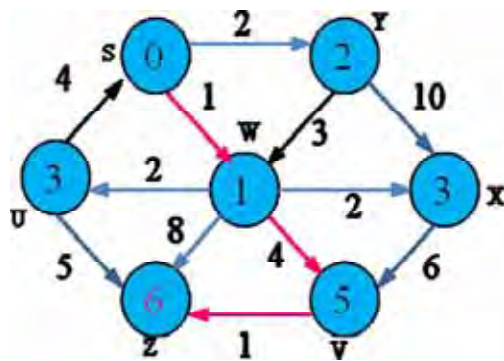
- A estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice u é igual a 8. A estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice o vértice v é igual a 6. Então, como $d[u] + w(u, z) > d[v] + w(v, z)$, ou seja, $3 + 5 > 5 + 1$, escolhe-se a estimativa para o vértice z , tendo como precedente o vértice v . Fecha-se o vértice z . Agora, todos os vértices estão fechados. $S = \{s, w, y, x, u, z\}$.

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	6	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	v	w



- O caminho de custo mínimo que vai do vértice s ao vértice z , tem custo mínimo 6. O vértice precedente de z é v . Por sua vez, o precedente de v é w . Por último, o precedente de w é s .

Vértices i	s	w	y	x	u	z	v
Estimativas $d[i]$	0	1	2	3	3	6	5
Precedentes $p[i]$	-	s	s	w	w	v	w



Então, o caminho de custo mínimo é: $\langle s, w, v, z \rangle$.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Material

Para simulações deste trabalho foi utilizado o programa Microsoft Office Excel 2003 em micro-computador Core 2 Duo com 1 GB de memória e 120 GB de disco rígido do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu.

5.2. Métodos

Através do mapeamento do palhiço enfardado, utilizando técnicas de Agricultura de Precisão, pode-se quantificar o material enfardado e avaliar a sua umidade, localização geográfica dos fardos e seu equivalente energético. A partir do mapa do palhiço enfardado, os fardos foram enumerados e posteriormente foi definida a rota de transferência dos fardos do campo para o centro de processamento, utilizando uma modificação do algoritmo de Dijkstra.

Para aplicação da metodologia proposta, considere o mapa do palhiço enfardado obtido por Ripoli (2002). Os fardos foram enumerados em cada divisão das áreas do talhão, conforme ilustrado na Figura 24.

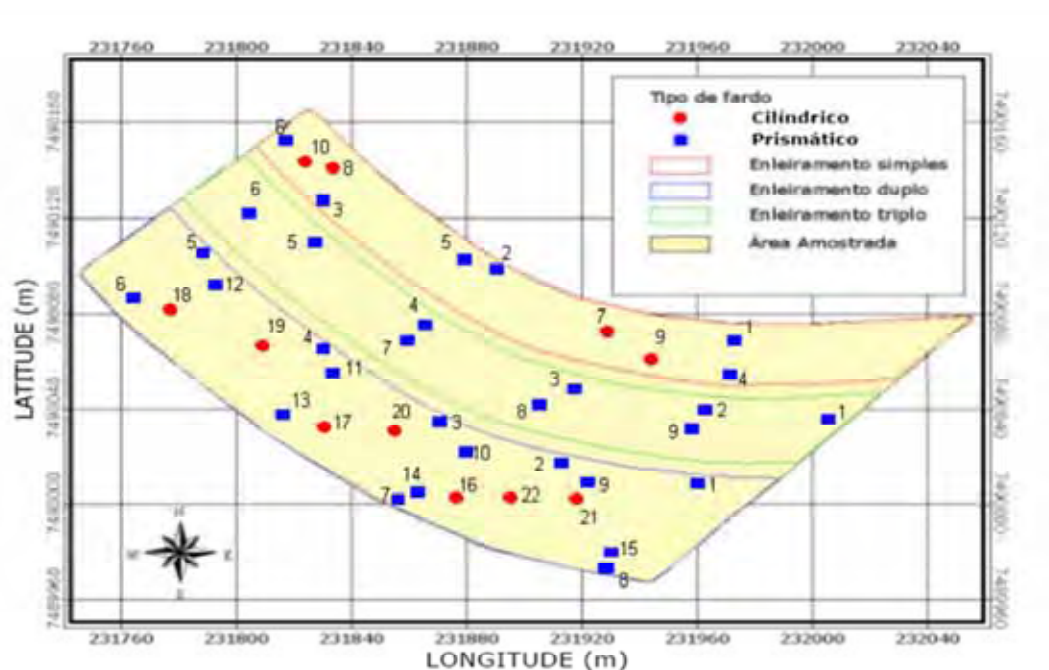


Figura 24. Ilustração de mapa com a localização dos fardos enumerados em cada divisão das áreas do talhão.

Com base na topografia da área e a localização geográfica exata de cada fardo foi calculada a distância entre os fardos em cada divisão das áreas do talhão, utilizando a fórmula matemática de distância entre dois pontos. De acordo com os conceitos da geodésia, a distância entre dois pontos da superfície da Terra é o mínimo comprimento entre as possíveis trajetórias sobre a superfície partindo de um ponto e atingindo o segundo.

As localizações geográficas dos fardos de palhço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas estão apresentadas nas tabelas 8, 9 e 10 que correspondem respectivamente aos enleiramentos simples, triplo e duplo.

Tabela 8. Localizações geográficas dos fardos de palhiço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, correspondente ao enleiramento simples.

Fardo	Latitude (°)	Longitude (°)	Massa (t)
1	-22,675286667	-47,608968889	0,4250
2	-22,674650000	-47,609878889	0,4470
3	-22,675394167	-47,608815000	0,4548
4	-22,674624444	-47,609972222	0,4722
5	-22,675043056	-47,609325000	0,3587
6	-22,674773333	-47,609908889	0,3345
7	-22,675461944	-47,608560556	0,3027
8	-22,675324444	-47,608537778	0,3019
9	-22,675003056	-47,609436111	0,3245
10	-22,674541389	-47,610036667	0,3222

(Fonte: Ripoli, 2002).

Tabela 9. Localizações geográficas dos fardos de palhiço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, correspondente ao enleiramento triplo.

Fardo	Latitude (°)	Longitude (°)	Massa (t)
1	-22,675904167	-47,609484444	0,4723
2	-22,675628056	-47,609917500	0,4561
3	-22,675178611	-47,610435278	0,4406
4	-22,675326389	-47,610127778	0,4234
5	-22,675655833	-47,609687778	0,4336
6	-22,675908889	-47,609078333	0,4569
7	-22,675910556	-47,609299722	0,4995
8	-22,675869722	-47,608675000	0,4412
9	-22,675781389	-47,609125833	0,4142

(Fonte: Ripoli, 2002).

Tabela 10. Localizações geográficas dos fardos de palhiço georreferenciados no campo, em graus, com suas respectivas massas, correspondente ao enleiramento duplo.

Fardo	Latitude (°)	Longitude (°)	Massa (t)
1	-22,675338056	-47,609923056	0,3175
2	-22,674967500	-47,610321111	0,3085
3	-22,675309444	-47,609640278	0,3063
4	-22,675907500	-47,609682222	0,3094
5	-22,676184167	-47,608985000	0,3045
6	-22,675858056	-47,609040556	0,3328
7	-22,675731944	-47,609443333	0,3516
8	-22,675437500	-47,609893611	0,3311
9	-22,675092500	-47,610281667	0,3121
10	-22,675135278	-47,610557778	0,3128
11	-22,675581389	-47,610061944	0,3095
12	-22,675886667	-47,609616111	0,3232
13	-22,676131667	-47,608970278	0,3328
14	-22,675592222	-47,608643333	0,3548
15	-22,675502222	-47,609083611	0,3582
16	-22,675253611	-47,609573611	0,3402
17	-22,674931944	-47,609941111	0,3321
18	-22,674828056	-47,610158611	0,3507
19	-22,675309444	-47,609640278	0,3402
20	-22,675555000	-47,609196667	0,3625
21	-22,675662500	-47,608688889	0,3483
22	-22,675627778	-47,608219444	0,3603

(Fonte: Ripoli, 2002).

O recolhimento dos fardos começa sempre pelo o de número 1, sugerindo como número 1 o fardo mais próximo da estrada de entrada em cada divisão das áreas do talhão, de onde partirá o veículo que irá recolhê-los. Partindo do fardo número 1, a ordem de recolhimento dos demais é definida pelo algoritmo proposto.

O algoritmo utilizado para determinar a rota de recolhimento dos fardos é uma modificação do algoritmo de Dijkstra. A mudança no método de Dijkstra foi feita obrigando que o caminho de custo mínimo envolva necessariamente todos os vértices do grafo, ou seja, fazendo com que necessariamente sejam recolhidos todos os fardos. Os vértices

do grafo são os fardos distribuídos em cada divisão das áreas do talhão e as distâncias entre eles as arestas do grafo. O algoritmo está descrito a seguir.

5.2.1. Algoritmo de custo mínimo

Este algoritmo considera que todos os vértices do grafo $G(V, A)$ estão ligados entre si e que o custo de uma aresta independe do sentido do percurso ($w(i,j)=w(j,i)$ para todo vértice i, j de V), como ilustra a Figura 25.

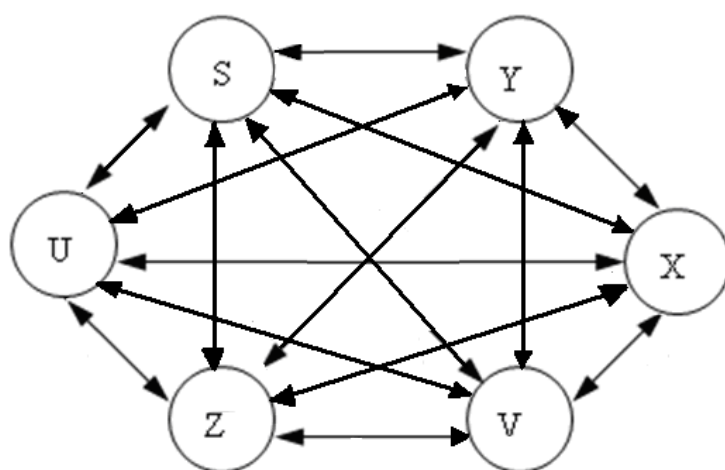


Figura 25. Ilustração de um grafo $G(V, A)$ que o algoritmo de Dijkstra modificado pode ser aplicado. $w(i,j) = w(j,i)$ para todo vértice i, j de V .

Passos para utilizar o algoritmo proposto: Dijkstra modificado. É considerado um grafo $G(V, A)$ onde $w(i,j) = w(j,i)$ para todo vértice i, j de V e deseja-se calcular o menor caminho de um dado vértice s até o vértice v , passando-se por todos os vértices de $G(V,A)$.

1. Atribua valor zero ao vértice raiz s e valor infinito aos demais vértices do grafo $G(V,A)$. O vértice raiz encontra-se aberto. $d[s] = 0$, $p[s] = -$, $d[t] = \infty$ para qualquer t tal que $t \in G(V,A)$ e $t \neq s$;

2. Os sucessores de s são abertos. A cada sucessor de s atualize $d[.]$ e $p[.]$ e feche o vértice s . $S = \{s\}$;
3. Enquanto houver vértice aberto:
 - Escolha k , o vértice aberto cuja estimativa seja a menor dentre todos os vértices abertos;
 - Feche o vértice k e atualize S ;
 - Para os vértices j adjacentes (sucessores) de k faça:
 - some a estimativa do vértice k com o custo da aresta que une k a j , $d[k] + w(k,j)$;
 - escolha o vértice t com a menor estimativa entre os vértices j , e anote k como precedente de t , atualize $d[j] = d[t] + w(t,j)$ e $p[j] = t$;
4. O menor caminho de s a v é $< s, \dots, p[p[p[v]]], p[p[v]], p[v], v >$. Fim.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distâncias entre os fardos são apresentadas nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11. Distâncias entre os fardos i e j na área referente ao enleiramento simples.

j	2	3	4	5	6	7	8	9	10
i									
1	86	155	15	100	176	45	157	30	167
2	-	69	91	14	92	44	73	62	82
3		-	160	55	28	113	13	131	17
4			-	105	183	47	163	29	173
5				-	79	58	59	76	68
6					-	137	20	155	11
7						-	117	18	126
8							-	135	9,7
9								-	144

Tabela 12. Distâncias entre os fardos i e j na área referente ao enleiramento triplo.

j	2	3	4	5	6	7	8	9
i								
1	43	90	147	193	218	152	100	50
2	-	47	105	153	178	109	57	11
3		-	59	108	133	62	12	44
4			-	50	74	8,7	54	103
5				-	25	50	104	152
6					-	74	128	177
7						-	55	106
8							-	52

A seguir são mostrados os passos de execução do algoritmo para o recolhimento dos fardos na divisão do talhão referente ao enleiramento simples.

Abre-se o vértice 1 (vértice aberto em amarelo).

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Precedentes $p[i]$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fecha-se 1 e abre-se os demais vértices. Calcula-se a estimativa para cada um dos vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de vértices fechados S (em azul) e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	86	155	15	100	176	45	157	30	167
Precedentes $p[i]$	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Menor estimativa: 4. Fecha-se 4 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	91	160	15	105	183	47	163	29	173
Precedentes $p[i]$	-	4	4	1	4	4	4	4	4	4

Menor estimativa: 9. Fecha-se 9 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	62	131	15	76	155	18	135	29	144
Precedentes $p[i]$	-	9	9	1	9	9	9	9	4	9

Menor estimativa: 7. Fecha-se 7 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	113	15	58	137	18	117	29	126
Precedentes $p[i]$	-	7	7	1	7	7	9	7	4	7

Menor estimativa: 2. Fecha-se 2 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	69	15	14	92	18	73	29	82
Precedentes $p[i]$	-	7	2	1	2	2	9	2	4	2

Menor estimativa: 5. Fecha-se 5 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	55	15	14	79	18	59	29	68
Precedentes $p[i]$	-	7	5	1	2	5	9	5	4	5

Menor estimativa: 3. Fecha-se 3 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	55	15	14	28	18	13	29	17
Precedentes $p[i]$	-	7	5	1	2	3	9	3	4	3

Menor estimativa: 8. Fecha-se 8 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	55	15	14	20	18	13	29	10
Precedentes $p[i]$	-	7	5	1	2	8	9	3	4	8

Menor estimativa: 10. Fecha-se 10 e calcula-se a estimativa para cada um dos demais vértices abertos. Atualizam-se o conjunto de nós fechados S e $p[.]$ dos vértices abertos.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	55	15	14	11	18	13	29	10
Precedentes $p[i]$	-	7	5	1	2	10	9	3	4	8

Fecha-se 6 e obtêm-se o menor caminho.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimativas $d[i]$	0	44	55	15	14	11	18	13	29	10
Precedentes $p[i]$	-	7	5	1	2	10	9	3	4	8

Então, o caminho de custo mínimo é: <1, 4, 9, 7, 2, 5, 3, 8, 10, 6>.

Portanto a sequência de recolhimento do fardos na área referente ao enleiramento simples é: 1- 4- 9- 7- 2- 5- 3- 8- 10- 6, obtendo o percurso mínimo de 209 metros.

Da mesma forma pode-se calcular o caminho mínimo para a divisão das áreas do talhão, referente aos enleiramentos duplo e triplo.

Passos de execução do algoritmo para o recolhimento dos fardos na divisão do talhão referente ao enleiramento triplo.

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Precedentes $p[i]$	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	90	147	193	218	152	100	50
Precedentes $p[i]$	-	1	1	1	1	1	1	1	1

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	47	105	153	178	109	57	11
Precedentes $p[i]$	-	1	2	2	2	2	2	2	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	103	152	177	106	52	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	9	9	9	9	9	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	59	108	133	62	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	3	3	3	3	3	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	54	104	128	55	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	8	8	8	8	3	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	54	50	74	9	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	8	4	4	4	3	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	54	50	74	9	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	8	7	7	4	3	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	54	50	25	9	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	8	7	5	4	3	2

Vértices i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estimativas $d[i]$	0	43	44	54	50	25	9	12	11
Precedentes $p[i]$	-	1	9	8	7	5	4	3	2

O caminho de custo mínimo é: $\langle 1, 2, 9, 3, 8, 4, 7, 5, 6 \rangle$.

A sequência de recolhimento dos fardos na área referente ao enleiramento triplo é: 1- 2- 9- 3- 8- 4- 7- 5- 6, obtendo um percurso de 248 metros.

Passos de execução do algoritmo para o recolhimento dos fardos na divisão do talhão referente ao enleiramento duplo. Da mesma forma que foi feito

anteriormente, em cada passo a primeira linha refere-se aos números dos vértices i , na linha 2 as estimativas $d[i]$ e na terceira linha $p[i]$.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	47	93	141	196	210	105	48	37	81	134	186	148	97	44	83	132	196	162	107	42	65
-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	13	58	108	165	176	68	37	37	45	100	154	112	60	31	47	96	162	128	71	8	28
-	9	9	9	9	9	9	9	1	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	57	108	165	175	63	33	37	43	99	153	109	55	27	42	93	161	127	69	8	23
-	21	21	21	21	21	21	21	1	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	9	21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	46	96	152	164	60	49	37	34	88	141	100	53	43	40	84	150	116	60	8	24
-	21	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	39	90	148	155	40	46	37	24	81	135	87	32	42	18	72	142	108	49	8	24
-	21	22	22	22	22	22	22	1	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	31	78	135	140	22	61	37	19	68	122	71	14	58	18	55	127	94	35	8	24
-	21	16	16	16	16	16	16	1	16	16	16	16	16	16	22	16	16	16	16	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	30	70	126	128	8	74	37	24	59	112	58	14	71	18	44	115	83	27	8	24
-	21	14	14	14	14	14	14	1	14	14	14	14	16	14	22	14	14	14	14	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	34	68	122	123	8	80	37	31	57	108	53	14	78	18	39	111	79	28	8	24
-	21	7	7	7	7	14	7	1	7	7	7	7	16	7	22	7	7	7	7	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	66	124	132	8	70	37	31	57	111	67	14	65	18	51	119	84	26	8	24
-	21	10	10	10	10	14	10	1	7	10	10	10	16	10	22	10	10	10	10	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	51	109	118	8	85	37	31	43	97	56	14	81	18	40	105	70	16	8	24
-	21	10	3	3	3	14	3	1	7	3	3	3	16	3	22	3	3	3	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	43	100	106	8	94	37	31	33	87	41	14	90	18	25	93	59	16	8	24
-	21	10	20	20	20	14	20	1	7	20	20	20	16	20	22	20	20	20	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	32	83	84	8	116	37	31	22	69	16	14	113	18	25	72	40	16	8	24
-	21	10	17	17	17	14	17	1	7	17	17	17	16	17	22	20	17	17	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	32	73	70	8	132	37	31	25	58	16	14	129	18	25	58	30	16	8	24
-	21	10	13	13	13	14	13	1	7	13	13	17	16	13	22	20	13	13	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	68	76	8	126	37	31	25	54	16	14	123	18	25	62	28	16	8	24
-	21	10	11	11	11	14	11	1	7	13	11	17	16	11	22	20	11	11	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	58	69	8	136	37	31	25	45	16	14	132	18	25	55	22	16	8	24
-	21	10	11	4	4	14	4	1	7	13	4	17	16	4	22	20	4	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	43	48	8	153	37	31	25	29	16	14	150	18	25	34	22	16	8	24
-	21	10	11	19	19	14	19	1	7	13	19	17	16	19	22	20	19	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	30	8	181	37	31	25	29	16	14	177	18	25	18	22	16	8	24
-	21	10	11	12	12	14	12	1	7	13	19	17	16	12	22	20	12	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	32	8	194	37	31	25	29	16	14	189	18	25	25	22	16	8	24
-	21	10	11	12	5	14	5	1	7	13	19	17	16	5	22	20	5	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	14	8	187	37	31	25	29	16	14	184	18	25	25	22	16	8	24
-	21	10	11	12	18	14	18	1	7	13	19	17	16	18	22	20	5	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	14	8	200	37	31	25	29	16	14	197	18	25	25	22	16	8	24
-	21	10	11	12	18	14	6	1	7	13	19	17	16	6	22	20	5	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	14	8	6	37	31	25	29	16	14	197	18	25	25	22	16	8	24
-	21	10	11	12	18	14	15	1	7	13	19	17	16	6	22	20	5	4	3	9	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	16	15	11	15	14	8	6	37	31	25	29	16	14	197	18	25	25	22	16	8	24
-	21	10	11	12	18	14	15	1	7	13	19	17	16	6	22	20	5	4	3	9	2

O caminho de custo mínimo é: < 1, 9, 21, 2, 22, 16, 14, 7, 10, 3, 20, 17, 13, 11, 4, 19, 12, 5, 18, 6, 15, 8>.

A sequência de recolhimento dos fardos na área referente ao enleiramento duplo é: 1- 9- 21- 2- 22- 16- 14- 7- 10- 3- 20- 17- 13- 11- 4- 19- 12- 5- 18- 6- 15- 8, obtendo um percurso de 572 metros.

Em geral os fardos são recolhidos no campo por transbordos tracionados por um trator. O transbordo é levado pelo trator ao caminhão, o qual fica aguardando fora do talhão, para posterior transporte dos fardos até o centro de processamento. A capacidade de carga do transbordo varia em função dos modelos existentes no mercado, podendo ser encontrados modelos com capacidade para até 22 t. Os mais tradicionais possuem capacidade para 8 t e capacidade volumétrica de 21 m³.

Os resultados médios obtidos pelo mapeamento utilizado para massa e volume dos fardos foram de 0,336 t e 1,54 m³ para os prismáticos e de 0,453 t e 2,72 m³ para os cilíndricos, ou seja, massa específica média de 218 Kg.m⁻³ para os fardos prismáticos e 166 Kg.m⁻³ para os fardos cilíndricos. Ripoli e Gamero (2007) obtiveram massa específica média de 124 Kg.m⁻³ para fardos cilíndricos.

Para as áreas referentes aos enleiramentos simples, triplo e duplo, as médias das massas colocadas nos transbordos seriam respectivamente 3,828 t, 3,024 t e 8,211 t, e os volumes médios seriam respectivamente 20,12 m³, 13,86 m³ e 42,14 m³, ou seja, as massas específicas seriam respectivamente 190 Kg.m⁻³, 218 Kg.m⁻³ e 194 Kg.m⁻³.

Torrezan (2003) obteve para áreas referentes aos enleiramentos simples, triplo e duplo, respectivamente, massas específicas de 211 Kg.m⁻³, 211 Kg.m⁻³ e 207 Kg.m⁻³, para fardos prismáticos.

O método proposto permitiu definir um caminho mínimo para recolhimento dos fardos de palhiço no campo. O ideal seria obter, para cada divisão das áreas do talhão, um só tipo de fardo (cilíndrico ou prismático) para melhor acomodação no transbordo e nos caminhões.

7. CONCLUSÕES

As técnicas matemáticas de otimização tem sido uma excelente ferramenta para auxílio nas gestões do setor sucroalcooleiro, contribuindo para comprovar que o recolhimento do palhiço é tecnicamente viável e pode ser utilizado para geração de energia como componente relevante na matriz energética brasileira.

O objetivo proposto para o presente trabalho foi atendido. O método utilizado permitiu definir uma rota mínima para recolhimento dos fardos de palhiço no talhão.

O método proposto é de fácil implementação computacional, podendo ser utilizado como ferramenta nos processos de gestão das empresas, definindo o caminho mínimo para recolhimento dos fardos de palhiço no campo, mapeados através de técnicas da Agricultura de Precisão, o que auxiliaria na redução de custos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO FILHO, et al. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, v. 67, n. 2, p. 23-25, 1993.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Biomassa. p. 77-92. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf). Acesso em: 12 jun. 2009.

ALOISE, D. J; CRUZ, J. S. da. Teoria dos grafos e aplicações. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Informática e Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001. Disponível em: http://www.dimap.ufrn.br/~dario/arquivos/Cap1_Grafos-2001.pdf. Acesso em: 06 jun. 2008.

ÁLVAREZ, E. D. La caña de azúcar: una amarga externalidad?. **Desarrollo Y Sociedad**, v. 53, n. 18, p. 117-164, 2007.

ARBEX, M. A. **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara – SP**. 2001. 188 f. Tese (Doutorado em Medicina/Patologia) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2008**.

AZANIA, A. A. P. M. et al. Emergência e desenvolvimento de guanxuma (*Sida rhombifolia*), capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) e cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) influenciados por subprodutos da destilação do álcool. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 331-336, 2004.

BANCO DE DADOS DE BIOMASSA NO BRASIL: Cana de açúcar no Brasil. Disponível em: http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_cana.asp. Acesso em: 27 mai. 2009.

BIGGS, N. L; LLOYD, E. K; WILSON, R. J. **Graph theory 1736-1936**. Oxford: University Press, 1986. 239 p.

BOVI, R; SERRA, G. E. Folhas verdes, folhas secas, fibra do colmo e a clarificação do caldo de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 457-463, jul./set. 2001.

CLEMENTE, L. **Avaliação dos resultados financeiros e riscos associados de uma típica usina de cogeração sucroalcooleira**. 2003. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Planejamento, Operação e Comercialização na Indústria de Energia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo**. 1999. 200 f. Tese (Doutorado em Energia) – Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (COPERSUCAR). Meio ambiente. Disponível em: http://www.copersucar.com.br/institucional/por/responsabilidade/meio_ambiente.asp. Acesso em: 01 jun. 2009.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Dissertação (Mestrado em Ciências/Planejamento Energético) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CORREIA, N. M; DURIGAN, J. C. Emergência de plantas daninhas em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 11-17, 2004.

COUTO, L. C. et al. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v.1, n. 1, p. 71-92, 2004.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematick** **1**, p. 269-271, 1959.

FEOFILOFF, P; KOHAYAKAWA, Y; WAKABAYASHI, Y. Uma introdução sucinta à teoria dos grafos. Disponível em: <http://www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/texto/TeoriaDosGrafos.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2009.

FRANCO, F. N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhço de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) a granel**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GOLDEMBERG, J; NIGRO, F. E. B; COELHO, S. T. **Bioenergia no estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008. 152 p.

GUTIERREZ, L. E. et al. Aumento da produção de etanol a partir de melaço de cana-de-açúcar pela adição de benzoato. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1991. p. 1-21.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE). **Estatística da produção agrícola** – dezembro de 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE). **Estatística da produção agrícola** – abril de 2009.

JANK, M. S. Opinião: o despertar da bioeletricidade. **UNICA**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/opinioao/show.asp?msgCode={B399CC8443F64C81B2F029BF8335D764}>. Acesso em: 01 jun. 2009.

KINCHELOE, S. Tools to aid management: the use of site specific management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 49, n. 2, mar./apr. 1994.

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

LEÃO, R. M. **Álcool, energia verde**. São Paulo: IQUAL – Instituto de Qualificação Editora Ltda, 2002. 255 p.

LIMA, A. D. de. **Modelos matemáticos aplicados a problemas na cultura da cana-de-açúcar e no aproveitamento da energia da biomassa**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

MAGALHÃES, D; BRUNS, R. E; VASCONCELLOS, P. C. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos como traçadores da queima de cana-de-açúcar: uma abordagem estatística. **Quim. Nova**, v. 30, n. 3, p. 577-581, 2007.

MENEGUELLO, L. A. **O setor sucroalcooleiro e a utilização da biomassa da cana-de-açúcar como fonte alternativa de energia**. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente / Dinâmica Regional e Alternativas de Sustentabilidade), Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2006.

MICHELAZZO, M. B; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 12, n. 5, p. 546-552, 2008.

MICHELAZZO, M. B; BRAUNBECK, O. A. Parâmetros técnico-econômicos do recolhimento do palhço por seis sistemas. **AGRENER 2006**. Disponível em: <http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/9.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia** – maio de 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Notícias: 1º leilão de reserva é realizado com sucesso com a contratação de 2,3 mil MW. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/news/selectNews.do?viewPublicationId=16607&queryUrl=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fsite%2Fsearch.do%3Fquery%3Dbiomassa>. Acesso em: 01 jun. 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha energética brasileira** – 2008.

MOLINA JR, W. F. **Enfardamento de resíduos de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*): avaliação dos desempenhos operacional e econômico**. 1991. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

MOLINA JR, W. F. et al. Estudo preliminar sobre enfardamento de resíduos de colheita de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1991, Londrina. **Resumos...** Londrina: SBEA, 1991, p. 61.

NEVES, P. T. **Variações e aplicações do algoritmo de Dijkstra**. 2007. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

NOVAES, W. Sinal vermelho no meio ambiente. **Revista Caros Amigos**, São Paulo, SP, v. 66, n. 6, p. 36-40, set. 2002.

PALETTA, C. E. M. **As implicações dos aspectos legais, econômicos e financeiros na implementação de projetos de geração de energia a partir de biomassa no Brasil: um estudo de viabilidade**. 2004. 170 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PELIZER, L. H; PONTIERI, M. H; MORAES, I. de O. Utilização de resíduos agroindustriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 2, n. 1, p. 118-127, 2007.

RIPOLI, M. L. C; GAMERO, C. A. Palhiço de cana-de-açúcar: ensaio padronizado de recolhimento por enfardamento cilíndrico. **Energ. Agric.**, Botucatu, SP, v. 22, n. 1, p. 75-93, 2007.

RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C. Caracterização dos principais constituintes da biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 4., São Paulo, 1995. **Resumos...** Piracicaba: Ed.EDUSP, 1995. v.1, p.463.

RIPOLI, M. L. C; RIPOLI, T. C. C; CASAGRANDE, D. V. O que fazer com o palhico? In: REUNIÃO AGRÍCOLA DA FERMENTEC, 8., 2003, São Pedro. **Anais...** Piracicaba: FERMENTEC, 2003b. 1 CD-ROM.

RIPOLI, M. L. C; RIPOLI, T. C. C; GAMERO, C. A. Colheita integral: retrocesso ou barateamento do sistema? **IDEA NEWS**, v. 4, n. 28, p. 66-67, jan. 2003a.

RIPOLI, T. C. C. et al. Equivalente energético do palhico da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: 1990a. p. 249-262.

RIPOLI, T. C. C; MIALHE, L. G; BRITO, J. O. Queima de canavial – o desperdício não mais admissível! **Álcool & Açúcar**, n. 54, p. 18-23, jul./ago. 1990b.

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

RIPOLI, T. C. C; MOLINA JR, W. F; RIPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 4, p. 677-681, out./dez. 2000.

RIPOLI, T. C. C. Recuperação da palha para fins energéticos. In: WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR E PALHA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL, 2., s.d. **Anais...** FEAGRI – UNICAMP, p. 1-12.

RIPOLI, T. C. C; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2. ed. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2007, 310 p.

ROSA, A. V. Energia derivada do aguapé. **Silvicultura**, São Paulo, SP, p. 179-183, dez. 1977. (Edição especial).

SÃO PAULO. (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB)**. Disponível em:

http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/Sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf. Acesso em: 06 jun. 2009.

SILVA, M. K. de C. **Relações min-max em otimização combinatória**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TEIXEIRA, F. A; PIRES, A. V; NASCIMENTO, P. V. N. Bagaço de cana-de-açúcar na alimentação de bovinos. **REDVET: Revista Electrónica de Veterinária**, v. 8, n. 6, p. 1-9, jun. 2007.

TOLENTINO, G; FLORENTINO, H. de O; SARTORI, M. M. P. Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com menor custo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 729-735, 2007.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TSCHIEDEL, M; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Notícias: recentes decisões favoráveis ao etanol são discutidas em evento do setor. Disponível em: <http://www.unica.com.br/noticias/show.asp?nwsCode={2EDEF1E9-1E6B-4C8B-9D386C170DC6DC4A}>. Acesso em: 16 mai. 2009b.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Setor Sucroenergético – Histórico. Disponível em: <http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59}>. Acesso em: 27 mai. 2009a.