

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

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL  
APLICADO AO EMPACOTAMENTO DO PALHIÇO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**ANGÉLICA FERNANDA SPADOTTO**

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  
Julho-2008

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

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL  
APLICADO AO EMPACOTAMENTO DO PALHIÇO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**ANGÉLICA FERNANDA SPADOTTO**

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Julho – 2008

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

S732d Spadotto, Angélica Fernanda, 1982-  
Desenvolvimento de programa computacional aplicado ao empacotamento do palhiço de cana-de-açúcar / Angélica Fernanda Spadotto. - Botucatu : [s.n.], 2008.  
iv, 55 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008  
Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva  
Inclui bibliografia.

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

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

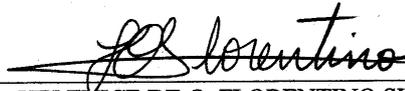
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL APLICADO AO  
EMPACOTAMENTO DO PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR"**

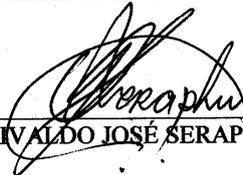
**ALUNA: ANGÉLICA FERNANDA SPADOTTO**

**ORIENTADORA: PROFA. DRA. HELENICE DE O. FLORENTINO SILVA**

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFA. DRA. HELENICE DE O. FLORENTINO SILVA



PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM



PROFA. DRA. MARISTELA OLIVEIRA DOS SANTOS

Data da Realização: 04 de julho de 2008.

**Sumário**

RESUMO .....	1
2. SUMMARY .....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4.1 O perfil da cultura canavieira no Brasil.....	9
4.2 Palhiço .....	11
4.3 Utilização do palhiço como fonte de energia .....	14
4.4 Recolhimento do palhiço .....	15
4.5 Legislação de transporte .....	19
5. PROBLEMAS DE CORTE E EMPACOTAMENTO .....	20
5.1. Modelagem matemática de problemas de corte e empacotamento .....	21
5.1.1 Problemas Unidimensionais .....	23
5.1.2 Problemas Bidimensionais .....	24
5.1.3 Problemas Tridimensionais .....	25
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
6.1 Problema a ser resolvido .....	38
6.2 Implementação.....	38
6.2.2 Software “Empacotamento” .....	40
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
8. CONCLUSÕES .....	46
9. REFERÊNCIAS .....	47
ANEXO 1 .....	52
ANEXO 2 .....	53

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Descrição dos Equipamentos.....	16
Tabela 2: Informações sobre o Fardo .....	17
Tabela 3: Custos estimados para enfardadora Sode JS-90, por tonelada de palha seca transportada para a usina, distância média 10 km do campo. ....	18
Tabela 4: Dados de entrada (cm).....	44
Tabela 5: Dados de saída – Camadas (cm).....	44
Tabela 6: Dados de saída – Fardos (cm).....	45
Tabela 7: Resumo Geral .....	45

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação da produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	9
Figura 2: : Produção de cana-de-açúcar por Região Brasileira na safra 2007/2008.....	10
Figura 3: Produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2006/2007. ....	11
Figura 4: Queima na pré colheita .....	12
Figura 5: Colheita manual .....	12
Figura 6: Colheita mecanizada da cana crua. ....	16
Figura 7: Área após Enleiramento e Início de Enfardamento. ....	17
Figura 8: Enfardadora Sode JS-90 em Operação .....	18
Figura 9: Carregamento de Fardos. ....	18
Figura 10: Corte unidimensional numa bobina .....	23
Figura 11: (a) é um problema ortogonal e (b) é não ortogonal.....	24
Figura 12: Problema orientado .....	24
Figura 13: Corte bidimensional. ....	25
Figura 14: Empacotamento de caixas.....	26
Figura 15: Tablados de plástico, madeira e aço.....	28
Figura 16: Empacotamento de caixas sobre paletes. ....	28
Figura 17: Carregamento de caixas no interior de um contêiner.....	28
Figura 18: Empacotamento de contêineres no porão de um navio.....	29
Figura 19: Cuboid Arrangment .....	33
Figura 20: Origem do eixo de coordenadas.....	34
Figura 21: Criação de Espaços. ....	35
Figura 22: Carregamentos .....	36
Figura 23: Determinação do comprimento da camada.....	43
Figura 24: Definição da camada.....	43
Figura 25: Repetição da camada dentro da capacidade do caminhão .....	44
Figura 26: Preenchimento completo do caminhão .....	44

## **RESUMO**

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Esta cultura é primariamente produzida para obtenção de álcool e açúcar. A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2007/2008 é estimada em 547 milhões de toneladas. Este aumento é devido ao clima, aos investimentos ocorridos nas indústrias atraídas pela crescente produção nacional de carros bicombustíveis e pelo aumento da venda de açúcar e álcool ao mercado externo. O crescimento acelerado dessa cultura fez com que alguns problemas surgissem. 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. A colheita com corte mecanizado torna disponível o palhicho e esse resíduo traz benefícios ao sistema produtivo, pois parte desta biomassa residual pode ser deixada no campo com a finalidade de melhorar as características químicas e físicas do solo e controlar plantas infestantes; o restante desse palhicho pode ser usado como uma excelente biomassa para uso na co-geração de energia. Porém, para viabilizar a co-geração, faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas que minimizem o custo da retirada e do transporte desse material. Diante disso, o objetivo desse trabalho é propor técnicas matemáticas para auxiliar na otimização do sistema de transporte do palhicho resultante da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, do campo para o centro de processamento, para ser aproveitado como matéria prima na co-geração de energia. Para isso, foram aplicadas técnicas de otimização,

buscando maximizar a quantidade de resíduos a ser colocada no caminhão, minimizando assim o custo com transporte.

**Palavras-chave:** Cana-de-açúcar, empacotamento, otimização.

PACKING THEORY APPLIED TO THE TRANSPORT OF THE SUGARCANE TRASH,  
Botucatu, 2007.

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

Author: ANGÉLICA FERNANDA SPADOTTO

Adviser: PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

## **2. SUMMARY**

Brazil is the larger sugarcane producer of the world. This culture is primarily produced to obtain alcohol and sugar. The Brazilian production in the season 2007/2008 is estimated in 547 million tones. This increase is due to the climate, to the investments occurred in the industries attracted by the increasing national production dual fuel cars and by the increase of the sugar and alcohol sales to the international market. The current preoccupation with the environment has made with that the sugar cane industry invests in change of the harvest system. This change consists in the reduction of the sugar cane plantation burning in the pre-harvest and the use of mechanized cut with raw sugar cane. However the harvest using mechanized cut becomes available the sugar cane trash and this residue bring benefices to productive system, therefore part of this residual biomass can be left in the field with purpose to improve the chemical and physical ground features and control infest plants; the remain of sugar cane trash can be used as excellent biomass to use in energy co-production. Ahead of this, the aims this work is optimize the sugar cane trash transport resulting of the mechanized harvest, of field to processing center, to be used to advantage as a raw material

to energy co-generation. To this were applied optimizations theories, trying maximize residues quantity to be placed in the truck, minimizing like the transport cost.

**Keywords:** Sugarcane, Packing, Optimization.

### 3. INTRODUÇÃO

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a estimativa para produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na safra 2007/2008 é de aproximadamente 547 milhões de toneladas. Esse número têm aumentado a cada safra (CONAB, 2007).

Com o aumento na produção de cana, aumentaram também as dimensões dos problemas no setor sucroalcooleiro, como exemplo cita-se a poluição causada pela queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar para facilitar a colheita. Com isto, leis foram criadas com o intuito de diminuir e proibir esta prática e a mecanização da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia ganhou impulso. As possibilidades de barateamento dessa operação e maior produtividade de trabalho são os principais fatores que estão contribuindo para aceleração deste processo.

A importância dessa cultura é que além de grande produtora de biomassa, ela é um reservatório de carbono, pois as plantas retiram CO<sub>2</sub> do ar e armazenam na forma de compostos orgânicos. Mas, existe uma grande preocupação com a colheita da cana, pois é prática comum a queima do palhico, constituído por folhas verdes, folhas secas, ponteiros e frações de colmos para facilitar a colheita

Segundo o SIGAM – Sistema Integrado de Gestão Ambiental, o decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003, regulamenta a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, que determinou prazos para a eliminação gradativa do

emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas, sendo de grande interesse agrícola e ecológico, estabelecendo prazos, procedimentos, regras e proibições que visam a regulamentar as queimas em práticas agrícolas.

Com a extinção da queima na pré-colheita, o palhiço, pode alcançar valores de até trinta toneladas por hectare (base em peso úmido) (RIPOLI et al., 2003). Segundo Franco (2003), essa biomassa traz benefícios ao sistema produtivo, pois melhora as características químicas e físicas do solo, controla plantas infestantes e pode ser usada como uma excelente biomassa para uso na co-geração de energia. Entretanto, para que o palhiço possa ser aproveitado em processos de co-geração de energia torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas que viabilizem sua retirada do campo e seu posterior transporte até as usinas, onde seriam queimados isoladamente ou junto ao bagaço (FRANCO, 2003).

Muitos estudos mostram que o palhiço pode ser utilizado para produzir mais álcool, via hidrólise ou rotas de gaseificação, e/ou energia elétrica excedente, para ser adicionada à rede; portanto, o aproveitamento da energia primária da cana pode ser dobrado. Assim, o palhiço tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas, que estão interessados em encontrar a maneira mais produtiva, econômica e eficaz para este manejo.

Nesse trabalho, é proposto o uso da teoria de otimização para melhoria do sistema de aproveitamento do palhiço resultante da colheita mecanizada da cana-de-açúcar para geração de energia, objetivando maximizar o volume de palhiço a ser colocado no caminhão para transferência dos fardos desse material do campo para o centro de processamento, minimizando assim o custo com transporte. Esse problema pode ser tratado matematicamente como um problema de corte e empacotamento.

O estudo dos problemas de empacotamento vem se tornando cada vez mais comum, diversos trabalhos apresentam problemas deste tipo como tema. Isso ocorre, principalmente, devido as aplicações práticas onde as soluções para estes podem ser usadas. Empresas encontram nestas soluções, meios para resolverem problemas comuns em seu dia-a-dia. Dentre estes se encontram problemas de transporte, corte de materiais e outros.

Softwares que buscam a otimização dessas atividades diminuem os custos necessários para realizá-las.

O empacotamento de contêineres em especial tem uma grande utilidade para empresas de transporte (principalmente de longas distâncias), onde o custo de um contêiner é bastante alto e qualquer desperdício de espaço pode tornar a entrega cara demais. Ou mesmo o transporte via caminhões, que pode evitar um número maior de viagens.

Os problemas de empacotamento e os de corte são semelhantes. “Cortar unidades maiores em unidades menores e empacotar unidades menores dentro de unidades maiores são problemas que podem ser vistos como dois lados de uma mesma moeda. Tal correspondência resulta da dualidade entre esses problemas” (Morabito apud Marques, 2000).

Problemas de empacotamento consistem em, dada uma determinada lista de itens, deve-se dispô-los de forma que todos ou o máximo possível consiga ser empacotado em um espaço determinado. As variações do problema são muitas, e se dividem em basicamente três categorias: empacotamento unidimensional, empacotamento bidimensional e empacotamento tridimensional. Cada categoria possui ainda variações de seus problemas. Gilmore e Gomory desenvolveram os primeiros trabalhos que apresentavam algoritmos que poderiam ser usadas na prática para problemas de tamanho médio (Dyckhoff; Scheithauer e Terno, 1997).

Estes problemas possuem soluções complexas e demandam por grande capacidade computacional, por esse motivo as soluções geralmente envolvem heurísticas para se encontrar um resultado bom<sup>1</sup> em um tempo hábil. Por sua complexidade, estes problemas se encontram na categoria de NP-difíceis. Os quais não possuem uma solução de ordem polinomial e geralmente são de ordem exponencial ou de ordem fatorial.

O problema proposto nesse trabalho consiste em carregar da melhor maneira possível o palhço remanescente da colheita de cana-de-açúcar no caminhão para diminuir os custos do posterior transporte desse material do campo ao centro de

---

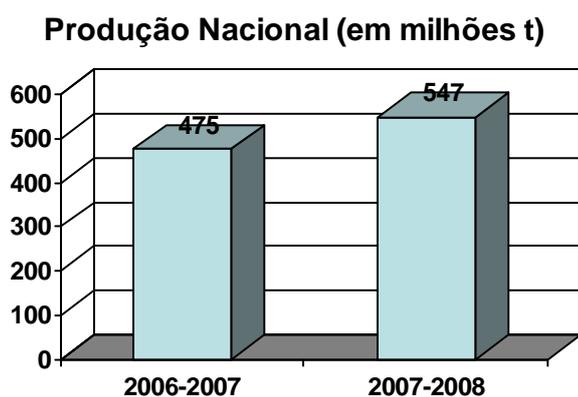
<sup>1</sup> É importante esclarecer que um resultado bom pode depender do contexto em que tal algoritmo está sendo aplicado. Geralmente o objetivo é alcançar um resultado que resolva o problema, mas este não será, obrigatoriamente, a melhor das soluções possíveis.

processamento para geração de energia. Para isso visou-se desenvolver um software simples para empacotamento 3D (em três dimensões) com o objetivo de apoiar o processo de alocação de volumes de palhiço de cana em formato prismático. O software recebe dados de forma manual, cadastrados pelo próprio usuário, e foi desenvolvido baseado na linguagem de programação PHP (acrônimo recursivo para “PHP: Hypertext Preprocessor”).

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 O perfil da cultura canvieira no Brasil

A produção brasileira de cana de açúcar no ano safra de 2006/2007 foi de aproximadamente 475 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 6,1 milhões de hectares (CONAB, 2007). A mesma fonte estimou para o ano safra 2007/2008 uma produção de aproximadamente 547 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de aproximadamente 6,9 milhões de hectares. Essa variação na produção pode ser observada na figura a seguir.

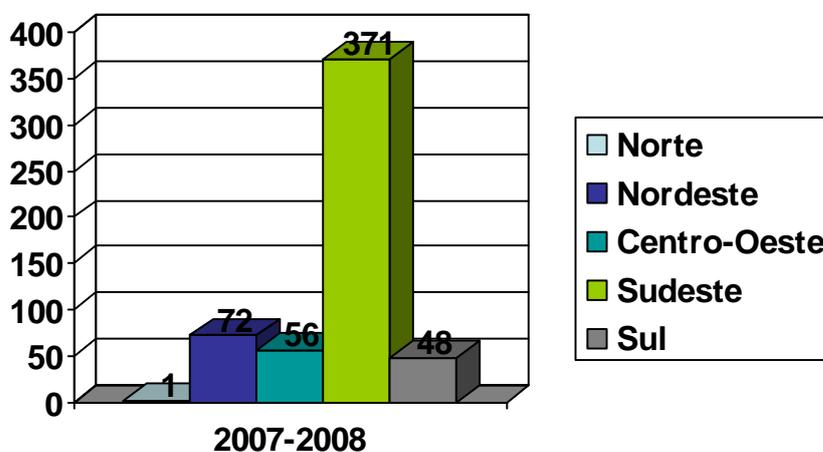


**Figura 1:** Variação da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: Conab (2007).

A região Centro-Sul é responsável por 86,6% da produção nacional, ocupa 82,3% da área a ser colhida e detém a maior produtividade média do país, de 83.236 kg.ha<sup>-1</sup>. A região Sudeste contribui com 370,7 milhões de toneladas, o correspondente a 67,7% da produção nacional e 78,2% da produção do Centro-Sul. A produção da região Norte-Nordeste é de 73 milhões de toneladas, correspondente a 13,4% da produção nacional, cultivada em uma área de 1,2 milhões de hectares, 17,7% da área a ser colhida no país (CONAB, 2007). Na Figura 2 pode se observar a produção em toneladas por região brasileira.

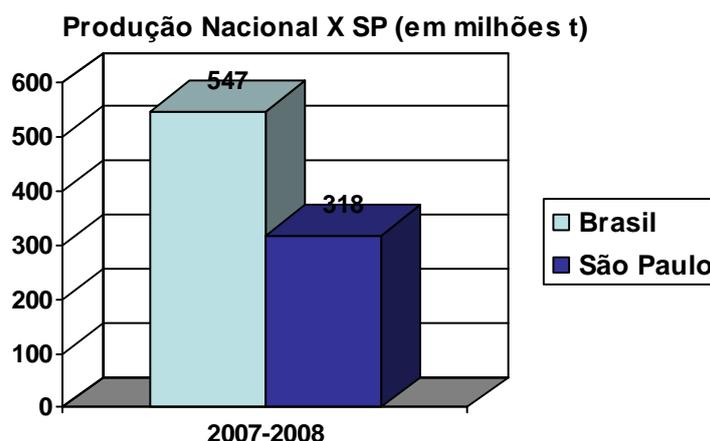
### Produção Regional (em milhões t)



**Figura 2:** : Produção de cana-de-açúcar por Região Brasileira na safra 2007/2008.

**Fonte:** Conab (2007)

O principal estado brasileiro produtor de cana-de-açúcar é São Paulo com aproximadamente 318 milhões de toneladas (58,2% da produção nacional) A Figura 3 mostra a produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2007/2008.



**Figura 3:** Produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2006/2007.

Fonte: Conab (2007)

#### 4.2 Palhiço

A denominação genérica e errônea para o resíduo da colheita de cana-de-açúcar, sem queima prévia, segundo Ripoli et al. (2003), tem sido “palha”, quando o correto tecnicamente seria “palhiço”, porque tal material não se constitui apenas de folhas de cana com baixo grau de umidade. Ripoli (1991), define o palhiço como sendo constituído de folhas verdes, palhas, ponteiros, colmos ou suas frações, rebolos ou suas frações, com terra a eles agregada.

O rápido crescimento da cultura de cana-de-açúcar fez com que alguns problemas ligados ao setor sucroalcooleiro surgissem, tais como, os danos ambientais causados pela queima do palhiço (Figura 4) para colheita manual (Figura 5). Esse problema tem sido discutido por órgãos ambientais e governamentais. Algumas leis têm sido impostas estabelecendo prazos para acabar com a queima na pré-colheita, o que tornaria inevitável a colheita mecanizada de cana crua. Assim, o destino do resíduo proveniente da colheita da cana-de-açúcar crua tornou-se objeto de várias pesquisas. (SPAROVEK, 1997).



**Figura 4: Queima na pré colheita**

Fonte: Ripoli (2002).



**Figura 5: Colheita manual**

Fonte: Ripoli (2002).

A prática da queima nas áreas de cana-de-açúcar ocorre na época da colheita, compreendida entre maio e novembro na região sudeste e entre setembro e fevereiro na região nordeste do Brasil. Segundo estes autores, se o palhicho não fosse queimado, esse poderia melhorar as condições do solo, pois é uma boa fonte de matéria orgânica e nitrogênio.

Segundo Furlani Neto et al.(1997) e Sparovek (1997), além de evitar as emissões dos gases responsáveis pelo efeito estufa, a prática de colheita de cana crua aumenta a quantidade de cobertura vegetal do solo nas soqueiras, diminuindo a erosão e aumentando a infiltração de água; acarreta melhoria nas qualidades tecnológicas (com

diminuição das impurezas minerais), apesar do menor rendimento de corte das máquinas e maior quantidade de impurezas vegetais.

Abramo Filho et al. (1993), estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram  $21,3\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de palhiço, com umidade de 22,34% e 6,92% de terra junto ao palhiço. Eles afirmam que a quantidade de palhiço deixado no campo oscila de 13 a  $20\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de matéria seca e é diferente para cada variedade, apresentando vantagens e desvantagens agrônomicas.

Molina Junior et al. (1995) encontraram, para a variedade SP 706163 (em segundo e terceiro cortes), no momento da colheita, valores de  $33,85 (+/- 9,83)$   $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de palhiço.

De acordo com Sartori (2001), existe uma grande variação na quantidade de resíduos resultantes da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia, indo de  $6,0\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  a  $22,8\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de palhiço, variação esta decorrente da variedade plantada, idade da planta e condições climáticas.

Ripoli (2002), ao estudar o mapeamento de palhiço enfardado de cana-de-açúcar, concluiu que sua variabilidade espacial é muito grande, encontrando valores que variaram de  $4,74$  a  $14,56\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , com umidade também bastante variável (11,1% a 39,6%), alertando ainda que maiores cuidados nas amostragens e determinação da produtividade desse material devem ser observados.

Esta matéria-prima desperta o interesse dos canavieiros, uma vez que o equivalente energético do palhiço gira em torno de 1,2 barris de petróleo por tonelada de material. Esse palhiço é encontrado nos canaviais na ordem de 9 a  $32\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  com base em peso úmido (RIPOLI, 2002). Ou seja, dependendo das condições da cultura, um hectare de canavial oferece entre 11 e 33 equivalentes barris de petróleo (FRANCO, 2003). Para Torresan (2003) esta variabilidade oriunda de fatores como as diferentes características das variedades utilizadas, as diferenças metodológicas adotadas em cada experimento e também o tempo decorrido entre a colheita mecanizada e a coleta das amostras.

### 4.3 Utilização do palhiço como fonte de energia

O alto custo da energia elétrica é fator limitante para o desenvolvimento de um país. O Brasil possui sua matriz energética basicamente concentrada em hidrelétricas, ficando sempre dependente das chuvas.

O fato desta atividade nesse setor ser sazonal e a co-geração de energia acontecer apenas durante a colheita não se tornam problemas, pois o sistema energético brasileiro é basicamente hidroelétrico e a época da colheita da cana coincide com o período em que os níveis dos reservatórios das hidrelétricas estão baixos, possibilitando às hidroelétricas armazenarem água, servindo como complemento a energia gerada pelas hidrelétricas.

Em relação à utilização de biomassa em larga escala, Lanças (1984) cita as seguintes vantagens e desvantagens:

- 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;
- colheita de grande quantidade de biomassa pode causar desequilíbrio ecológico em grandes proporções;
- baixa quantidade de energia por quantidade de massa, cuja viabilidade só poderá ser considerada quando o preço do petróleo for elevado;
- problemas de armazenamento e transporte devido às várias formas de biomassa;
- devido à produção descentralizada, a necessidade de transporte para os centros de conversão pode tornar inviável sua produção, dependendo das distâncias;
- para melhor eficiência é necessário um sistema de pré-secagem devido à umidade da biomassa.

Ripoli et al. (2000) apresentam uma equação para estimar a quantidade de pessoas por ano que poderão ser servidas de energia, se for produzida a partir do palhiço e do bagaço de cana-de-açúcar. Conclui que do palhiço,  $7,0 \times 10^6$  pessoas.ano<sup>-1</sup> poderão ser servidas de energia e, a partir do bagaço,  $5,5 \times 10^6$  pessoas.ano<sup>-1</sup>.

Beeharry (2001) avaliou a produção de resíduos e energia da biomassa da cana-de-açúcar e concluiu que a produção de energia pode ter um aumento de até 50%, com o acréscimo dos ponteiros, folhas e palha no sistema de produção.

#### **4.4 Recolhimento do palhiço**

O aproveitamento dos resíduos ainda é dificultado pelos elevados custos para as operações de recolhimento, adensamento, transporte, redução de tamanho e tecnologia para sua utilização (MICHELAZZO, 2005).

Ripoli et al. (1990) determinaram a massa média de material remanescente de colheita (palhiço) como sendo  $9,7 \text{ Mg.ha}^{-1}$  e com Poder Calorífico Útil (PCU), da ordem de  $2.280 \text{ kcal.kg}^{-1}$ . Estimaram que, em um canavial com produtividade de colmos de  $70 \text{ Mg.ha}^{-1}$  pode-se obter um equivalente energético de 20.877 Mcal em etanol, 31.326 Mcal no bagaço e 21.058 Mcal no material remanescente da colheita.

O transporte do palhiço tem elevado custo devido também à baixa massa específica que implica em grandes volumes a serem transportados. Em vista disso, sua compactação é de grande importância para diminuição dos custos do transporte, uma vez que esse diminui sensivelmente à medida que se aumenta a massa específica do volume transportado (MICHELLAZZO, 2005).

Em 1991, a Cooperativa de produtores de cana, açúcar e álcool do estado de São Paulo (Copersucar) iniciou um estudo para avaliar a viabilidade do recolhimento da palha deixada no campo após a colheita da cana sem queima prévia, como mostra a figura 4. A idéia era testar algumas enfardadoras e determinar seu desempenho. A necessidade de modificações ou desenvolvimento de outro equipamento para o recolhimento da palha da cana-de-açúcar, seria avaliada após os testes. A seguir, estão apresentadas figuras e tabelas referentes a esses testes.



**Figura 6:** Colheita mecanizada da cana crua.

Fonte: Copersucar (1998).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos testes de enfardamento do palhiço. Testes iniciais dão uma indicação do desempenho das três máquinas, cada uma com um sistema diferente de compactação. Os testes foram realizados de dois a três dias após a colheita da cana crua. Algumas informações sobre os fardos foram reunidas na Tabela 2.

**Tabela 1:** Descrição dos Equipamentos

Enfardadora	Tipo de Fardo	Sistema de Enfardamento	de Enleiramento	Capacidade enfardadora (toneladas/hora)
Sode	Cilíndrico	Rolos	Sim	1,8
JS-90		Fixos	Não	2,0
Semeato	Cilíndrico	Correias	Sim	2,7
ROL-1518	Grande	Tencionadas	Não	1,0
New Holland	Retangular	Prensa	Sim	9,0
NH-570	Pequeno		Não	3,0

Fonte: Copersucar (1998).

**Tabela 2:** Informações sobre o Fardo

Enfardadora	Enleiramento	Peso médio do fardo (kg/f)	Densidade do fardo (kg/m <sup>3</sup> )	Quantidade de terra no fardo (%)
JS-90	Sim	105,8	118,0	5,6
	Não	119,3	129,3	2,8
ROL-1518	Sim	285,4	94,7	6,2
	Não	260,0	107,5	2,3
NH-570	Sim	15,0	112,0	°
	Não	°	°	°

Fonte: Copersucar (1998).

A Tabela 3 mostra uma estimativa de custo para a enfardadora Sode JS-90. São dados aproximados pois os testes foram conduzidos por um curto período e, assim, muitos parâmetros foram estimados.

Nas figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as operações de enleiramento, enfardamento e carregamento do palhicho:



**Figura 7:** Área após Enleiramento e Início de Enfardamento.

Fonte: Copersucar (1998).



**Figura 8:** Enfardadora Sode JS-90 em Operação

Fonte: Copersucar (1998).



**Figura 9:** Carregamento de Fardos.

Fonte: Ripoli (2002).

**Tabela 3:** Custos estimados para enfardadora Sode JS-90, por tonelada de palha seca transportada para a usina, distância média 10 km do campo.

Enfardadora	Enleiramento	Custo de Enleirar (US\$.t <sup>-1</sup> )	Custo de Enfardar (US\$.t <sup>-1</sup> )	Custo do Fio (US\$.t <sup>-1</sup> )	Custo de carregar (US\$.t <sup>-1</sup> )	Custo de transporte (US\$.t <sup>-1</sup> )	Custo total (US\$.t <sup>-1</sup> )
JS-90	Sim	1,3	9,6	1,8	2,4	4,7	19,8
	Não	0,0	8,7	1,5	2,0	3,8	16,1

Fonte: Copersucar (1998).

Os resultados dos testes e os problemas operacionais apresentados no citado trabalho indicam que o sistema de enfardamento de fardos retangulares é o mais indicado. Primeiro, devido à maior capacidade operacional, segundo devido à maior

facilidade de operar com a palha e pedaços de cana, e terceiro, devido à melhor ocupação do espaço da carroceria do caminhão de transporte pelos fardos.

Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) a alta densidade é uma qualidade desejável do fardo, uma vez que assim pode-se recolher e transportar mais material por unidade de tempo e volume, reduzindo os custos. O MCT afirma ainda que ao contrário dos fardos cilíndricos, os fardos prismáticos retangulares possuem baixa resistência às intempéries e devem ser removidos para área coberta o mais breve possível. Se os fardos tiverem de ser estocados no campo, sem proteção, deve-se utilizar fardos cilíndricos.

#### **4.5 Legislação de transporte**

Para o transporte do palhiço é necessário obedecer às resoluções impostas pelo Conselho Nacional de Trânsito (Contran), que é o órgão competente para estabelecimento das diretrizes da Política Nacional de Trânsito. De acordo com a Resolução nº12/98 do Contran, o limite máximo autorizado de peso bruto total é de 45 Mg por unidade ou combinação de veículos ou 10 Mg de peso bruto por eixo isolado, nas superfícies das vias públicas. O Contran estabelece ainda para veículos, com ou sem carga, a largura máxima de 2,60 m e altura de 4,40 m. O limite para o comprimento é de 14 m, para veículos simples, 18,15 m para veículos articulados e 19,80 m para veículos com reboque. Não sendo permitido o registro e licenciamento de veículos cujas dimensões excedam às fixadas nesta resolução há necessidade de ser concedida uma autorização específica anual, fornecida pela autoridade com a circunscrição sobre a via e considerando os limites desta via. Esta autorização tem validade de um ano sendo renovada até o sucateamento do conjunto veicular, obedecendo ao volume de tráfego e traçado da via.

## **5. PROBLEMAS DE CORTE E EMPACOTAMENTO**

Desde o início da revolução industrial, as operações econômicas dos produtores de bens apresentam uma série de complicações, geralmente ligadas a tomadas de decisões vitais à sobrevivência desses produtores no mercado. Muitas decisões são relativas à produção e logística desses bens e pequenas variações no custo destas operações podem trazer grandes ganhos, o que, por sua vez, podem favorecer a competitividade das empresas no mercado. Dentre uma imensa variedade de problemas industriais, como transporte de produtos, seqüenciamento de máquinas em linhas de produção, entre outros, temos os problemas de corte e empacotamento. Problemas de empacotamento, em geral, são aqueles que requerem que certos objetos, chamados de itens, sejam empacotados em outros de tamanhos maiores, chamados de recipientes. Em algumas aplicações, ao invés de empacotar, o objetivo é cortar. Mas, em ambos problemas, os itens devem ser empacotados ou cortados sem sobreposição.

De fato, os problemas de corte e empacotamento são equivalentes pois representam a mesma tarefa no espaço, ou seja, o ato de empacotar ou cortar remete à divisão de um espaço (seja qual for a dimensão) em partições onde serão alocados os itens a serem empacotados/cortados. Imagine, por exemplo, a carga de um caminhão onde os itens não podem ser colocados um em cima do outro. Se temos um grande número de itens, vários caminhões serão necessários para transportá-los. Se cada caminhão representa um custo (frete ou combustível, por exemplo) precisamos acomodar os itens de tal maneira que

um número mínimo de caminhões seja necessário. Embora esses problemas sejam equivalentes, as diferenças ocorrem quando consideramos as diferentes restrições que ocorrem em cada caso, como, por exemplo, tipo de corte ou tipo de itens a serem empacotados juntos.

Por isso, os problemas de corte e empacotamento são considerados problemas de otimização combinatória e trazem consigo muitas variantes como: tipos de cortes, dimensionalidade, metas a serem alcançadas, geração de resíduos, entre outros, que influem substancialmente na maneira de construir as combinações de itens/recipientes.

Um problema de otimização combinatória pode ser definido como ação de maximizar ou minimizar uma função de várias variáveis sujeita a um conjunto de restrições, dentro de um domínio finito e enumerável. Embora o problema tenha um domínio finito, geralmente ele é muito grande e a simples enumeração das soluções pode tomar unidades muito grandes inviabilizando seu tratamento computacional.

Em vista disto, métodos que cubram eficientemente o espaço de busca são muito estudados. A variedade desses algoritmos é grande, passando por métodos exatos, heurísticos e de aproximação. Desses, destacam-se os métodos exatos de resolução, por apresentarem soluções ótimas dos problemas a que se destinam, e os métodos de aproximação que garantem uma qualidade da solução.

## **5.1. Modelagem matemática de problemas de corte e empacotamento**

Atualmente diversas variações dos problemas de corte e empacotamento foram apresentadas e muitos algoritmos e técnicas já foram desenvolvidas. As variações dos problemas podem ser através de alterações nas restrições, como, por exemplo, as caixas não podem sofrer rotações para serem empacotadas. Podem ser mudanças de objetivo, como em um problema de corte onde o objetivo pode ser cortar as peças de forma a maximizar o lucro ou mesmo minimizar os custos. E ainda, podem ser problemas que considerem dimensões diferentes, como unidimensional, bidimensional e tridimensional (KLEIN, 2005).

O problema do carregamento de itens menores em um recipiente maior apresenta uma estrutura que pode oferecer muitas variações. Boa parte dos estudos tem usado como referência as formas apresentada por Dyckhoff (1990). Em seu estudo, Dyckhoff (1990) extraiu características importantes desses problemas (dimensão, variedades das formas dos objetos e dos itens, variação da quantidade de objetos e itens, restrições no corte, entre outras) e construiu uma tipologia formada por quatro caracteres  $\alpha / \beta / \gamma / \delta$  representando a combinação de quatro propriedades relativas ao problema. Abaixo temos uma lista de todos os significados possíveis para os quatro caracteres  $\alpha / \beta / \gamma / \delta$ , totalizando assim 96 notações para os possíveis problemas.

1. Dimensão ( $\alpha$ ):

- (1) unidimensional;
- (2) bidimensional;
- (3) tridimensional;
- (N) n-dimensional, ( $n > 3$ ).

2. Tipos de tarefa ( $\beta$ ):

- (B) Todos os objetos disponíveis devem ser usados e apenas uma seleção de itens será produzida;
- (V) Todos os itens devem ser produzidos a partir de uma seleção de objetos.

3. Variedade dos objetos ( $\gamma$ ):

- (O) Um objeto;
- (I) Vários objetos idênticos;
- (D) Vários objetos diferentes.

4. Variedade dos itens ( $\delta$ ):

- (F) Baixa demanda de itens com formatos diferentes;
- (M) Alta demanda de itens com vários formatos;
- (R) Alta demanda de itens com pouca variação dos formatos;
- (C) Itens com formatos congruentes.

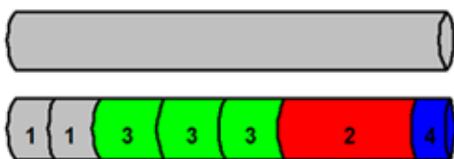
O foco desse trabalho é o problema classificado, segundo Dyckhoff (1990), como *3/B/O/R*, pois os fardos de palhiço são tridimensionais, deve-se carregar um único caminhão com uma seleção de fardos de diferentes tamanhos e tendo-se disponível alta demanda de fardos.

Podemos identificar duas restrições-chave físicas associadas a esse problema. Uma delas é a não-sobreposição: os fardos devem ser posicionados de modo a não ocuparem o mesmo espaço. Como as superfícies de contato não são perfeitas, alguns artigos, como George e Robinson (1980), definem folgas entre os fardos para evitar problemas de encaixe. A outra restrição refere-se ao fato de que os itens devem integralmente estar contidos no contêiner, respeitando suas dimensões.

### 5.1.1 Problemas Unidimensionais

Um problema é dito ser unidimensional quando apenas uma dimensão é considerada no processo (ANDRADE, 2006).

Soluções para esse tipo de problema possuem uma grande aplicabilidade na indústria. Exemplos para tal são as indústrias de corte de papel e as metalúrgicas, que cortam peças cilíndricas e precisam utilizar a matéria-prima da melhor forma possível para evitar sobras que não possam mais ser utilizadas. Na Figura 10, é possível perceber facilmente a existência de apenas uma dimensão importante, a largura, todas as outras não podem sofrer alterações (KLEIN, 2005).



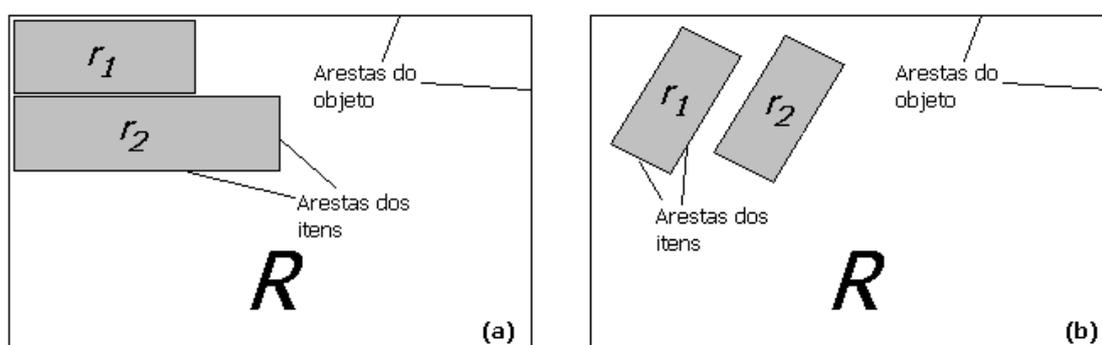
**Figura 10:** Corte unidimensional numa bobina

Fonte: Portal brasileiro de otimização

### 5.1.2 Problemas Bidimensionais

Segundo Miyazawa (1994) um problema de empacotamento bidimensional consiste em empacotar uma lista de retângulos em um retângulo maior.

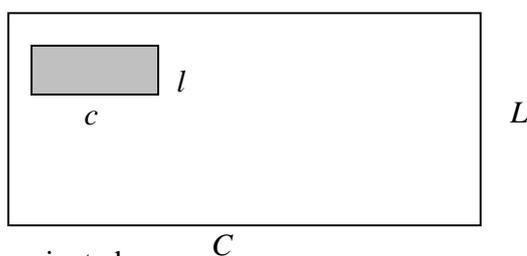
Os problemas bidimensionais podem ser ortogonais ou não. Ortogonais são quando as arestas dos itens (retângulos a serem empacotados) são paralelas a uma das arestas do objeto (retângulo maior). Veja a Figura 11, onde  $R$  é o objeto e  $r_1$  e  $r_2$  são itens.



**Figura 11:** (a) é um problema ortogonal e (b) é não ortogonal.

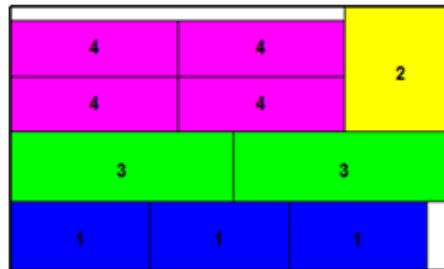
Fonte: Klein(2005).

Segundo Klein (2005) os problemas podem ser orientados ou não, sendo que um problema é orientado quando os itens não podem sofrer rotações. Supondo um retângulo (objeto) com as dimensões  $L$  (largura) e  $C$  (comprimento) e itens com dimensões  $l$  e  $c$ . O lado  $l$  é paralelo ao  $L$  e o  $c$  ao  $C$  como mostra a Figura 12.



**Figura 12:** Problema orientado

Na Figura 13 é apresentado um padrão de corte bidimensional



**Figura 13:** Corte bidimensional.

Fonte: Portal brasileiro de otimização

### 5.1.3 Problemas Tridimensionais

Problemas de empacotamento tridimensionais são problemas muito comuns. Basta imaginar cargas de contêineres, caminhões ou armazéns. O problema só é considerado tridimensional se três dimensões são relevantes ao processo de empacotamento (ANDRADE, 2006).

Os problemas de empacotamento ou corte tridimensionais buscam empacotar um conjunto de itens em um objeto, sendo que cada item possui uma largura  $l_i$ , uma altura  $a_i$  e uma profundidade  $p_i$ . O objeto, por sua vez, possui uma largura  $L$ , uma altura  $A$  e uma profundidade  $P$ . Assim como os problemas anteriores, o objetivo é maximizar ou minimizar uma determinada função.

Muitas empresas deparam-se com o problema do carregamento durante a realização de suas atividades produtivas. Os fardos de palhico, por exemplo, precisam ser alocados em caminhões. Uma das formas de otimizar esse processo é o empacotamento de um conjunto de fardos em um contêiner. A boa distribuição espacial dos itens aumenta a quantidade de fardos a ser carregado, minimizando assim o custo com o transporte dos fardos do campo ao centro de processamento.

O problema do contêiner é um dos problemas tridimensionais mais estudados, sendo que muitos trabalhos o focam, dando ênfase às suas duas principais versões, a *knapsack* e a *bin packing* (KLEIN, 2005).

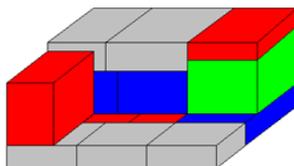
Na versão *knapsack* (mochila) existe apenas um contêiner e não existe a garantia de que todos os itens serão empacotados. Cada caixa possui um valor associado e o objetivo é alcançar um valor total máximo.

Já na versão *bin packing* o objetivo é empacotar todas as caixas do conjunto tendo disponível para isso mais de um contêiner. O objetivo é fazer com que o número de contêineres necessários seja o menor possível. Nesse caso, os contêineres possuem o mesmo tamanho. Quando os contêineres variam de tamanho, o problema é conhecido como *multi-container loading*.

As características do problema a ser resolvido nesse trabalho mostram que esse é um problema do tipo *knapsack*. O problema é encontrado na prática tanto no carregamento de caminhões quanto o de contêineres de transporte. As empresas em geral utilizam o conhecimento empírico adquirido por seus funcionários no carregamento. Entretanto esta abordagem pode apresentar bastante falha, principalmente por depender de uma ação humana, ação esta, que pode ser afetada pelo estado físico e mental desses funcionários (KLEIN, 2005).

Dada uma lista de caixas  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  e um contêiner  $C$ , o problema da mochila consiste em colocar as caixas de  $N$  em  $C$  de forma que o contêiner fique preenchido o máximo possível. Nesse tipo de problema nem todas as caixas precisam ser empacotadas, pois o limite é o contêiner e existe apenas 1 disponível para o empacotamento. Como o valor da caixa é o volume desta, o volume total é que será definitivo para a escolha da melhor distribuição da carga.

Para o problema será considerado  $A$  para a altura do contêiner,  $L$  para a largura e  $P$  para a profundidade. Para as caixas, as medidas serão  $a_i$  para a altura,  $l_i$  para a largura e  $p_i$  para a profundidade. O volume da caixa será igual a  $v_i = a_i l_i p_i$ , veja a Figura 14.



**Figura 14:** Empacotamento de caixas.

Fonte: Portal brasileiro de otimização

Esse tipo de problema faz parte do estudo de otimização e tem como objetivo maximizar ou minimizar uma determinada função. Esse objetivo é elaborado de acordo com as necessidades existentes na prática.

Além das restrições já citadas, pode-se encontrar na literatura, como em Bischoff e Ratcliff (1995), discussões sobre características do problema que podem ser relevantes apenas em algumas situações ou sobre qualidades do carregamento que podem ser desejáveis, porém não-essenciais. Algumas delas serão descritas a seguir.

As restrições de orientação, por exemplo podem ser importantes quando a orientação é fixada (caixas frágeis que não podem ser viradas de ponta cabeça). Outra questão bastante discutida é a estabilidade, caracterizada pela capacidade de evitar que o carregamento movimente-se durante o transporte, causando prejuízos à carga.

Outras *condições* desejáveis em alguns casos são: o agrupamento de itens (itens iguais juntos); a separação de itens (itens cujo contato deve ser evitado, como alimentos e remédios); o carregamento completo de itens (como peças de uma mesma máquina); a distribuição de peso dentro do contêiner (é desejável uma distribuição uniforme).

A quantidade de caixas de cada tipo disponível também altera o direcionamento das estratégias. Quando não existem limites para a esta quantidade, o problema, segundo Morabito e Arenales (1997) é chamado *irrestrito*. Quando existe uma quantidade máxima de caixas, o problema é dito *restrito*, exigindo novas restrições. O contêiner e as caixas que formam a carga são considerados paralelepípedos.

O objetivo das abordagens aplicáveis a esse problema é a maximização do volume preenchido. No entanto, além das restrições-chave, o problema a ser focado busca condições de estabilidade. Além disso, trataremos de um problema dito *restrito*.

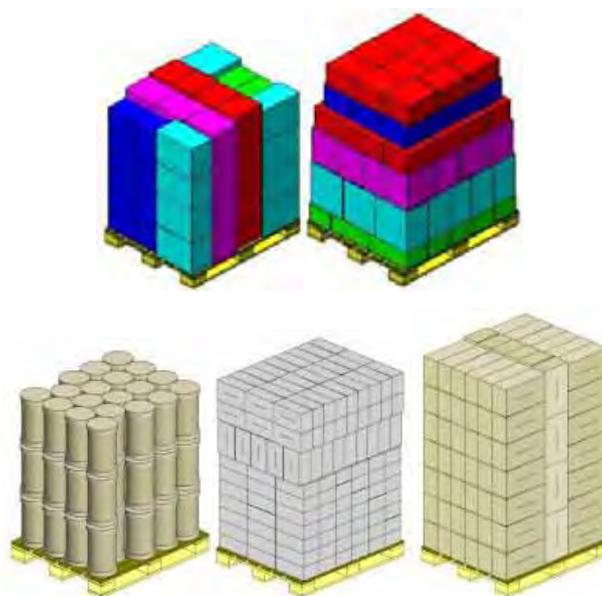
Identificando a complexidade geométrica na qual se insere o problema percebe-se que sua solução não é trivial, pois podem existir muitas possibilidades de padrões e a identificação da melhoria não apresenta lógica simples.

O empacotamento de caixas em paletes é um típico problema de empacotamento. As Figuras 15 e 16 mostra alguns paletes com e sem carregamentos.



**Figura 15:** Tablados de plástico, madeira e aço.

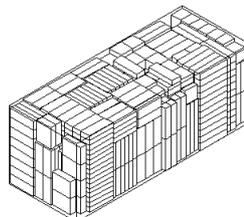
Fonte: Portal brasileiro de otimização



**Figura 16:** Empacotamento de caixas sobre paletes.

Fonte: Portal brasileiro de otimização

- Empacotamento de caixas num contêiner. Veja as Figuras 16, 17 e 18.



**Figura 17:** Carregamento de caixas no interior de um contêiner.

Fonte: Portal brasileiro de otimização



**Figura 18:** Empacotamento de contêineres no porão de um navio.

Fonte: Portal brasileiro de otimização

Em geral, os trabalhos que buscam resolver esses problemas são amplamente apoiados por heurísticas, visto que esses, na sua maioria, encontram-se na categoria  $NP^2$ . Estas heurísticas tentam encontrar uma solução de forma que o resultado seja alcançado em tempo hábil, entretanto elas não garantem que esse seja o melhor dos resultados possíveis. Para alcançar o melhor resultado pode-se utilizar um algoritmo que percorre todas as possibilidades. Porém, esse algoritmo pode se tornar inviável inclusive para pequenas entradas, pois o tempo computacional para testar todas as possibilidades é muito alto, tornando-o impraticável.

## 5.2 Algoritmos de corte e empacotamento

Inicialmente é apresentada uma breve descrição de alguns dos algoritmos criados para solucionar problemas de corte e empacotamento. Existe uma gama bastante grande de trabalhos que demonstram algoritmos que visam solucionar problemas desta categoria. Os problemas aos quais estes se propõem a buscar uma solução também possuem uma grande variedade, passando por problemas unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, além de diversas mudanças nas restrições. Os trabalhos aqui listados terão o foco em problemas relacionados à contêineres.

---

<sup>2</sup> Problemas da classe  $NP$  são aqueles que podem ser validados em tempo polinomial mas não existem algoritmos que os resolvam nesse tempo

Para modelagem do problema de carregamento de contêineres proposta por Morabito e Arenales (1997) considere:

- Conjunto de fardos de  $m$  tipos distintos agrupados.
- Cada fardo do tipo  $i$ , se caracteriza pelas dimensões de seu comprimento, largura e altura  $(l_i, w_i, h_i)$ .
- Tem-se disponível para carregamento a quantidade  $b_i$  do fardo tipo  $i$ .
- As dimensões do caminhão são:  $L, W, H$ .
- Os fardos são carregados com uma orientação fixada, ou seja, com  $l_i, w_i$  e  $h_i$  paralelos a  $L, W$  e  $H$ , respectivamente.
- $|A|$  o número de elementos do conjunto  $A$ .
- $\alpha_i$  uma variável inteira representando o número de fardos do tipo  $i$  no padrão.
- $v_i$  o volume do fardo do tipo  $i$ .

Sejam  $x_j$  o  $j$ -ésimo elemento do conjunto  $X$ ,  $y_k$  o  $k$ -ésimo elemento do conjunto  $Y$ ,  $z_l$  o  $l$ -ésimo elemento do conjunto  $Z$  (note que  $x_j, y_k$  e  $z_l$  não são incógnitas, isto é, são determinados a priori).

Para evitar a sobreposição dos fardos, define-se a matriz de incidência  $g_{ijklpqr}$  como:

$$g_{ijklpqr} = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j \leq x_p \leq x_j + l_i - 1, y_k \leq y_q \leq y_k + w_i - 1 \text{ e } z_l \leq z_r \leq z_l + h_i - 1. \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

que deve ser calculada a priori para cada fardo do tipo  $i$  ( $i=1,\dots,m$ ), para cada posição  $(x_j, y_k, z_l)$  ( $j=1,\dots, |X|, k=1,\dots, |Y|, l=1,\dots, |Z|$ ), e para cada posição

$(x_p, y_q, z_r)$  ( $p=1,\dots, |X|, q=1,\dots, |Y|, r=1,\dots, |Z|$ ).

Sejam  $J(i) = \arg \max_{j=1,\dots, |X|} \{ x_j \mid x_j \leq L - l_i \}$ ,  $K(i) = \arg \max_{k=1,\dots, |Y|} \{ y_k \mid y_k \leq W - w_i \}$  e  $L(i) = \arg \max_{l=1,\dots, |Z|} \{ z_l \mid z_l \leq H - h_i \}$ , e as variáveis de decisão  $a_{ijkl}$  definidas como:

$$a_{ijkl} = \begin{cases} 1 & \text{se um fardo do tipo } i \text{ é colocado na posição } (x_j, y_k, z_l), \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Segundo Morabito e Arenales(1997), o problema pode ser escrito como um programa 0-1. Cada variável 0-1 do programa representa a decisão de colocar ou não um fardo do tipo  $i$  na coordenada  $(x, y, z)$  dentro do caminhão. Sem perda de generalidade, pode ser mostrado que  $x, y$  e  $z$  pertencem respectivamente aos *conjuntos de discretização*.

$$X = \{ x \mid x = \sum_{i=1}^m \alpha_i l_i, x \leq L - l_0, \alpha_i \geq 0, \text{ inteiro} \}$$

$$Y = \{ y \mid y = \sum_{i=1}^m \beta_i w_i, y \leq W - w_0, \beta_i \geq 0, \text{ inteiro} \}$$

$$Z = \{ z \mid z = \sum_{i=1}^m \gamma_i h_i, z \leq H - h_0, \gamma_i \geq 0, \text{ inteiro} \}$$

O modelo pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{J(i)} \sum_{k=1}^{K(i)} \sum_{l=1}^{L(i)} v_i a_{ijkl} \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{J(i)} \sum_{k=1}^{K(i)} \sum_{l=1}^{L(i)} g_{ijklpqr} a_{ijkl} \leq 1, p = 1, \dots, |X|, q = 1, \dots, |Y|, r = 1, \dots, |Z| \\ & \sum_{j=1}^{J(i)} \sum_{k=1}^{K(i)} \sum_{l=1}^{L(i)} a_{ijkl} \leq b_i, i = 1, \dots, m \\ & a_{ijkl} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, J(i), k = 1, \dots, K(i), l = 1, \dots, L(i) \end{aligned}$$

O modelo tem por objetivo maximizar o volume de fardos carregados. Na primeira restrição são evitadas as sobreposições dos fardos no carregamento e na segunda restrição são controladas as quantidades  $b_i$  disponíveis de fardos do tipo  $i$ .

O grande número de variáveis e restrições em relação ao número de caixas são características comuns entre os modelos, restringindo a utilidade destes quase que exclusivamente para fins teóricos.

Bortfeldt e Gehring (1998) apresentam uma abordagem utilizando um algoritmo guloso<sup>3</sup> que gera as soluções. Para evitar os ótimos locais este algoritmo faz uso de uma pesquisa Tabu<sup>4</sup>. O problema à solucionar é um contêiner *knapsack* com as seguintes restrições:

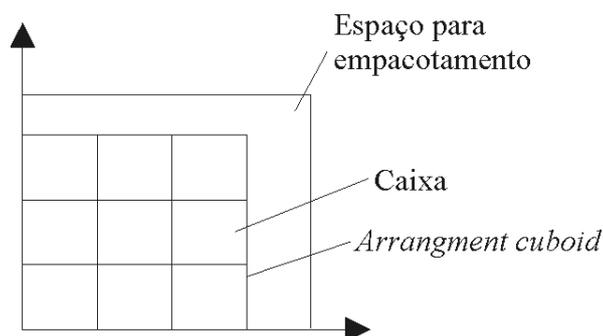
- Restrição de estabilidade: Uma caixa precisa ter suporte do contêiner e das caixas abaixo dela.
- Restrição de Orientação: Algumas laterais da caixa não podem ser usadas como altura.
- Restrição de empilhamento: Existem caixas que não podem possuir outras sobre elas.
- Restrição de peso: O peso total do carregamento não pode ser superior ao peso suportado pelo contêiner.

A técnica é preencher o contêiner recursivamente com agrupamento de caixas. Pisinger (2002) denomina essa técnica como *cuboid arrangement*. Cada *cuboid arrangement* (Figura 19) é formado por caixas que possuam a mesma dimensão. E, apesar das caixas que participam do arranjo serem selecionadas ao acaso, elas seguem uma orientação espacial. Conforme Bortfeldt e Gehring (1998), um *cuboid arrangement* sempre contém  $nx$  caixas na direção  $x$ ,  $ny$  caixas na direção  $y$  e uma caixa na direção  $z$ .

---

<sup>3</sup> Algoritmos gulosos tentam encontrar o ótimo local a cada estágio, ou seja, seleciona a melhor opção no estágio atual visando alcançar um ótimo resultado final (ótimo global). Maiores informações sobre algoritmos gulosos podem ser encontradas em Cormen *et al.* (2002).

<sup>4</sup> Pesquisa tabu é uma meta-heurística que evita cair em ótimos locais, ou seja, evita que o algoritmo caia em um ciclo dentro de um conjunto de soluções aparentemente ótimas.



**Figura 19:** Cuboid Arrangement

Fonte: Bortfeldt e Gehring (1998)

Já Cecílio e Morabito (2002) partiram da heurística original de George e Robinson (1980), que preenche o contêiner em camadas e combina espaços para melhorar o empacotamento. Eles alteraram alguns procedimentos deste com a finalidade de aprimorar a solução alcançada. Uma dessas alterações foi tentar combinar caixas de maneira a preencher os espaços vagos, o procedimento original busca o tipo de caixa que preenche o espaço vago e caso só encontre alternativas que preenchem uma das colunas, escolhe a que ocupa a maior área da base no espaço. Além disso, Cecílio e Morabito (2002) criaram duas novas versões da heurística proposta por George e Robinson (1980). É importante ressaltar que nesse problema são consideradas apenas as restrições geométricas, deixando de lado questões como caixas que não podem receber outra na parte superior, limite de peso que uma caixa pode suportar sobre ela, limite do volume que o contêiner pode suportar, etc.

A técnica apresentada por George e Robinson (1980) e utilizada por Cecílio e Morabito (2002) se chama *wall-building*, pois utiliza uma abordagem de camadas que são preenchidas visando ocupar a profundidade do contêiner.

Morioka e Ronconi (2002) apresentam uma comparação de várias heurísticas para solução desse problema e sugerem a utilização do heurística de George e Robinson.

Cecílio e Morabito (2004) partiram da heurística original de George e Robinson (1980), que preenche o contêiner em camadas e combina espaços para melhorar o empacotamento e alteraram alguns procedimentos desse com a finalidade de aprimorar a

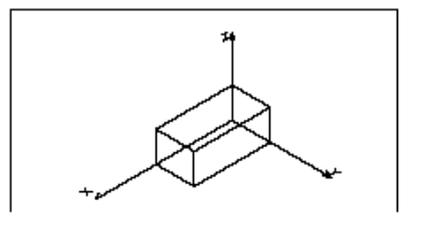
solução alcançada. Uma destas alterações foi tentar combinar caixas de maneira a preencher os espaços vagos, o procedimento original busca o tipo de caixa que preenche o espaço vago e caso só encontre alternativas que preencham uma das colunas, escolhe a que ocupa a maior área da base no espaço. Além disso, esses autores criaram duas novas versões da heurística proposta por George e Robinson (1980).

A técnica apresentada por George e Robinson (1980) e utilizada por Cecílio e Morabito (2004) é chamada *wall-building*, por utilizar uma abordagem de camadas que são preenchidas visando ocupar a profundidade do contêiner.

O algoritmo de George e Robinson (1980) baseia-se no carregamento por camadas verticais, partindo da parede de um dos lados do contêiner. As caixas são empacotadas segundo uma lista de prioridades, a serem detalhadas a seguir. Um empate no primeiro quesito leva a um desempate através do segundo e assim por diante.

Além disso, o algoritmo procura alocar caixas do mesmo tipo próximas umas das outras. Para isso, foram determinados dois *status*: *open* (tipos de caixa que já foram utilizados no carregamento) e *unopen* (tipos de caixa ainda não utilizados no carregamento). Toda vez que um novo tipo de caixa é utilizado, as caixas desse tipo passam de *unopen* para *open*. Caixas com *status open* apresentam prioridade sobre caixas com *status unopen*.

A implementação realizada baseou-se na implementação de Cecílio e Morabito (2000). Os dados do tamanho do contêiner e as informações sobre a quantidade e as dimensões de cada tipo de caixa constitui a entrada do programa. A primeira camada está encostada no fundo do contêiner, sendo sua coordenada de referência (0,0,0) relativa a seu vértice esquerdo inferior, conforme mostra a figura 20.



**Figura 20:** Origem do eixo de coordenadas.

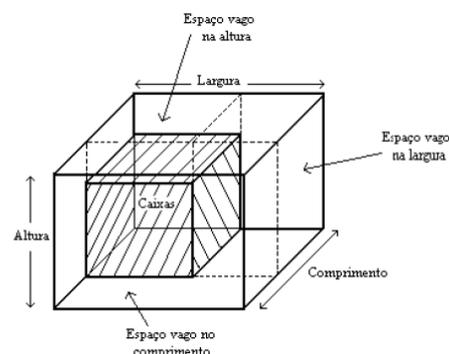
Fonte: Morioka e Ronconi (2002).

Em cada camada, a primeira caixa a ser carregada define a profundidade da camada. Procura-se carregar o máximo de colunas completas de caixas desse tipo inicial possíveis. O espaço restante à frente, ao lado e em cima das caixas já empacotadas forma os novos espaços de carregamento. Em seguida, esses novos espaços também são carregados e a caixa a ser utilizada é determinada de acordo com dois critérios diferentes, dependendo da situação. Se o espaço corresponder a uma nova camada, o algoritmo escolhe a caixa de maior prioridade. Senão, escolhe-se o tipo de caixa que melhor preenche o espaço restante, procurando-se carregar colunas completas.

No anexo 2 é possível visualizar os fluxogramas deste método.

### Criação dos Espaços

Após o carregamento de uma certa quantidade de fardos, o algoritmo verifica o espaço não-ocupado e o identifica como espaço disponível para novos carregamentos, conforme mostra a Figura 21. São criados três espaços: acima dos fardos empacotados (espaço da altura), ao lado (espaço da largura) e em frente (espaço do comprimento), conforme indica a figura a seguir. Os espaços na altura e na largura só são criados quando suas dimensões são maiores do que o parâmetro *MinMed*, que corresponde à menor medida entre as dimensões das fardos disponíveis para o carregamento. Já o espaço no comprimento é sempre criado, por menor que ele seja.



**Figura 21:** Criação de Espaços.

Fonte: Cecílio e Morabito (2000).

## Lista de Prioridades

Para a definição do fardo a ser utilizado no início de cada camada, o algoritmo utiliza como critério a ordenação dos fardos segundo três prioridades:

- Primeira Prioridade: Fardo com a maior entre as menores dimensões.
- Segunda Prioridade: Fardo com a maior quantidade disponível.
- Terceira Prioridade: Fardo com a maior dimensão.

Para escolher o tipo de fardo a ser carregado, o algoritmo procura escolher sempre o fardo de acordo com a primeira prioridade. Em caso de empate nesse quesito, observa-se a segunda prioridade e, em caso de duplo empate, utiliza-se a terceira prioridade. A justificativa da primeira está no fato de que é potencialmente mais difícil carregar fardos grandes e que, portanto, seria melhor alocá-las antes. No entanto, para esta prioridade, o algoritmo não observa todas as dimensões dos fardos e, sim, a menor entre as três (comprimento, largura, altura) para cada tipo. Tipos que apresentam maiores medidas são carregados prioritariamente em relação aos outros.

Já a segunda prioridade foi estabelecida devido ao fato de que fardos iguais apresentam maiores chances de efetuarem carregamentos homogêneos que ocupem melhor o espaço. Isso porque o carregamento de colunas completas normalmente resulta em menor desperdício de espaço, conforme podemos observar na Figura 22.



**Figura 22:** Carregamentos

Fonte: Morioka e Ronconi (2002).

A terceira prioridade está relacionada à primeira e representa o fato de que fardos que apresentem uma das medidas muito grandes podem ser difíceis de carregar e, portanto, pode ser melhor carregá-los antes.

Muitas outras técnicas foram desenvolvidas para se buscar a solução para as variações do problema de empacotamento de contêineres. Scheithauer

(1992) propõe uma abordagem utilizando programação dinâmica. Brunetta e Grégoire (2005) criaram uma abordagem que utiliza o algoritmo de Morabito e Morales para gerar padrões de empacotamento e, para as caixas não empacotadas por esta abordagem, são empacotadas pelo algoritmo de Pisinger. Entretanto estas abordagens, e tantas outras, resolvem problemas diferentes do que este trabalho se propõe a estudar. É importante citá-los para demonstrar que a variedade de problemas e algoritmos que buscam solucioná-los é bastante grande. Na seção seguinte será apresentado o algoritmo utilizado por este trabalho, que utiliza algumas técnicas utilizadas por algoritmos aqui apresentados.

## **6. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.1 Problema a ser resolvido**

O problema proposto nesse trabalho consiste em carregar da melhor maneira possível o palhiço remanescente da colheita de cana-de-açúcar no caminhão para diminuir os custos do posterior transporte desse material do campo ao centro de processamento para geração de energia.

Esse palhiço é enfardado no formato prismático com dois tamanhos distintos que serão chamados de fardo 1 e fardo 2.

O fardo chamado de fardo 1 é o produzido pela máquina Case 8575, com dimensões 87 cm x 82 cm x 210 cm. O fardo 2 é produzido pela máquina Claas 1200 e possui dimensões 120 cm x 70 cm x 175 cm. Esses fardos podem sofrer rotações antes do carregamento.

Foram considerados ainda as dimensões da carroceria do treminhão utilizado no transporte como sendo 220cm x 280 cm x 700 cm.

### **6.2 Implementação**

Este trabalho visou desenvolver um software simples para empacotamento 3D (em três dimensões) com o objetivo de apoiar o processo de alocação de volumes de palhiço de cana em formato prismático. O software recebe dados de forma

manual, cadastrados pelo próprio usuário, e foi desenvolvido baseado na linguagem de programação PHP (acrônimo recursivo para "PHP: Hypertext Preprocessor").

Esta linguagem foi escolhida devido se tratar de uma tecnologia Server-Based, o que possibilitará disponibilizar o software em sítios da internet interessados em prestar o serviço do software. Além disso, ela também permite o uso de bibliotecas complementares, como o FPDF, biblioteca utilizada para gerar arquivos em formato PDF, e GD2, biblioteca utilizada para gerar e manipular imagens.

### **6.2.1 A linguagem PHP**

Eleita a linguagem do ano de 2004 pela revista Info, a linguagem PHP é uma linguagem de script de código livre utilizada para o desenvolvimento de aplicações web embutido em códigos HTML. Seu nome é um acrônimo recursivo para "PHP: Hypertext Preprocessor". Diferentemente de outras linguagens de script, pode-se criar diretamente um arquivo html com PHP, valendo-se das tags iniciais e finais que permitem alternar as linguagens dentro de um mesmo script.

A linguagem foi desenvolvida originalmente por Rasmus Lerdorf, em 1994, como um CGI escrito em C que permitia a interpretação de um número limitado de comandos. Nessa ocasião, sistema foi denominado Personal Home Page Tools. Devido à aceitação do primeiro PHP e de maneira adicional, o seu criador desenhou um sistema para processar formulários ao qual deu o nome de FI (Form Interpreter) e o conjunto destas duas ferramentas, seria a primeira versão compacta da linguagem: PHP/FI (CRIARWEB)

A linguagem foi reescrita diversas vezes, adicionando novas funcionalidades e suporte a novos protocolos até que em 2004, foi lançada a versão cinco, a qual teve como principal novidade, a orientação a objetos, que foi totalmente reescrita tornando-a completamente funcional.

O PHP é uma linguagem extremamente simples, porém oferece muitos recursos poderosos. Ela roda do lado do servidor (Server-side), ou seja, o código fonte é processado pelo servidor e enviado somente o resultado para o cliente, o qual não tem acesso ao código fonte. Outro ponto extremamente importante, como dito anteriormente, é a orientação a objeto, porém seu uso não é obrigatório, sendo possível

também a programação estrutural ou a mistura das duas. Mais um fator não menos importante é a possibilidade de utilizá-lo na maioria dos sistemas operacionais e servidores web. O PHP não se limita a gerar somente HTML. As habilidades do PHP incluem geração de imagens, arquivos PDF e animações Flash criados dinamicamente. É possível a criação de qualquer padrão texto, como XHTML e outros arquivos XML. Porém, a característica mais forte e significativa dessa linguagem é seu suporte a uma ampla variedade de banco de dados e outros serviços como LDAP, IMAP, SNMP, NNTP, POP3, HTTP, entre outros (PHP)

Atualmente, o PHP é considerada a quinta linguagem mais utilizada no mundo, abrangendo 8,653 % dos programadores e está presente nos principais projetos web encontrados, como por exemplo, o PortalWikipédia e o Google.(TIOBE)

### 6.2.2 Software “Empacotamento”

Baseado na Heurística de George e Robinson foi desenvolvida uma implementação computacional, conhecida como **Empacotamento**, utilizando a linguagem de programação PHP – Hypertext Preprocessor (<http://www.php.net/>), com resultados apresentados utilizando a linguagem HTML - HyperText Markup Language, rodando sobre servidor Apache em Sistema Operacional GNU Linux Slackware 11 com Kernel 2.4. Os Arquivos foram editados utilizando a ferramenta Kate for GNU/Linux.

Um software que permita a experimentação do processo de carga, sem envolver objetos reais e com baixo custo, pode contribuir significativamente para melhorar o aproveitamento do espaço. Tal simulação refletirá diretamente nos custos do transporte visto que o sistema permitirá experimentar o carregamento com objetos virtuais em um ambiente com dimensões iguais ao compartimento que será carregado.

Atualmente existem algoritmos de empacotamento que buscam otimizar esse processo. Esta otimização consiste em empregar técnicas matemáticas com a finalidade obter a melhor solução possível para o problema em um tempo aceitável.

Com o software que este trabalho proporá, além de permitir que o usuário aloque as caixas manualmente, existirá o recurso de importar informações de algoritmos de empacotamento, agilizando ainda mais o processo de simulação. Outro caso é

o acompanhamento da montagem e da desmontagem dos volumes, a utilização deste software em dispositivos móveis leva a campo o experimento, aumentando ainda mais sua eficiência.

Este trabalho visa criar um ambiente de simulação de empacotamento, com apresentação do empacotamento em três dimensões. O software permitirá ao usuário experimentar o carregamento de volumes informando dados do volume (largura, altura, profundidade).

Para utilização do *software* implementado, **Empacotamento**, tem-se o seguinte procedimento:

O usuário:

- 1- Entra com os dados das dimensões orientadas do caminhão.
- 2- Entra com os dados das dimensões dos fardos sem orientação.

O software:

- 3- Procura a melhor combinação entre o comprimento da camada e os comprimentos dos fardos, para que se tenha a menor perda de espaço na largura.
  - 4- Define a posição dos fardos.
  - 5- Define a quantidade de camadas iguais possíveis ao longo do comprimento do caminhão.
  - 6- Calcula a dimensão restante como altura.
  - 7- Define a quantidade possível de fardos iguais sobre a fardo da base.
  - 8- Verifica se cabe outro tipo de fardo sobre a coluna.
  - 9- Coloca quantos fardos do outro tipo forem possíveis no espaço restante.
  - 10- Imprime resultado parcial.
  - 11- Verifica se o espaço restante é suficiente para alocar uma ou mais fardos.
  - 12- Aloca fardos no espaço restante, voltando ao ponto 1.
- Imprime resultado final.
- Encontra-se em anexo o layout do software.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram elaboradas análises qualitativas sobre o problema do transporte dos fardos de palhiço de cana-de-açúcar e a princípio foi usada a modelagem na forma de um problema 0-1, proposta por Morabito e Arenales, 1997. Porém, para solução exata do modelo o número de variáveis e restrições chegam à ordem de milhões, encarecendo o custo computacional da implementação (MORABITO E ARENALES, 1997).

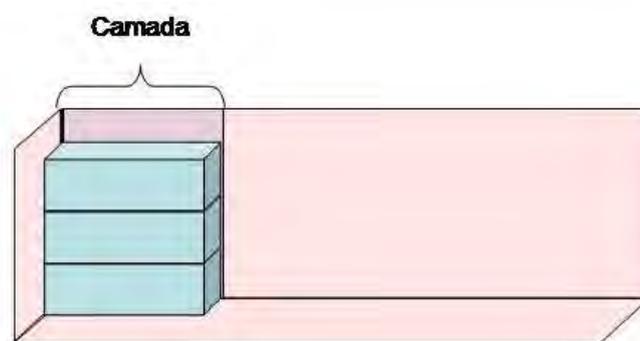
Por esse motivo buscou-se métodos heurísticos para solução do problema. Esses métodos buscam um carregamento através de camadas que podem ser verticais ou horizontais. Dentre os métodos heurísticos estudados escolheu-se a heurística de George e Robinson para ser implementada computacionalmente. Mas, devido as grandes dimensões o método não conseguiu encaixar os dois tipos de fardos disponíveis, ocasionando muita perda de espaço no carregamento.

Foi desenvolvido então, o software Empacotamento para trabalhar especificamente com o problema abordado. Nesta implementação foram considerados dados de entrada do programa: as dimensões já orientadas do caminhão e as dimensões de dois tipos distintos de fardos prismáticos retangulares. sem orientação

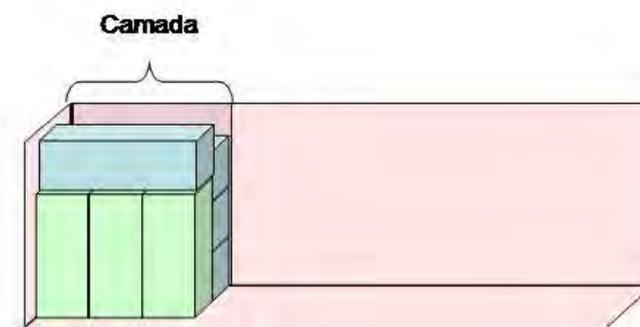
Os dados de entrada são uma lista de 2 tipos de fardos contendo suas dimensões (comprimento  $li$ , largura  $wi$ , altura  $hi$ ), além das dimensões do caminhão (comprimento  $L$ , largura  $W$  e Altura  $H$ ).

Inicialmente, é fornecida ao software a área o fundo do caminhão, para ser ocupada pela primeira camada.

São gerados todos os carregamentos geometricamente viáveis, que caibam dentro da área e não ultrapassem a altura máxima definida pela altura do contêiner. Como o critério para a seleção da melhor configuração é a área preenchida, escolhe-se o carregamento que apresente a maior ocupação superficial.

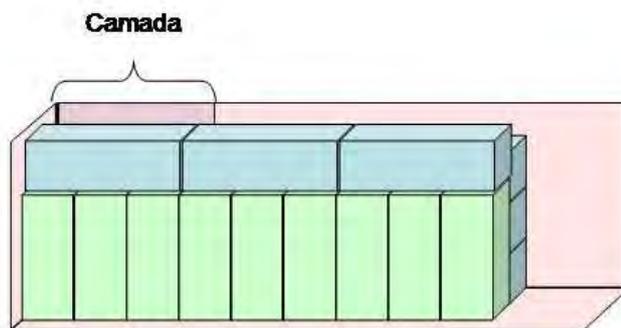


**Figura 23:** Determinação do comprimento da camada



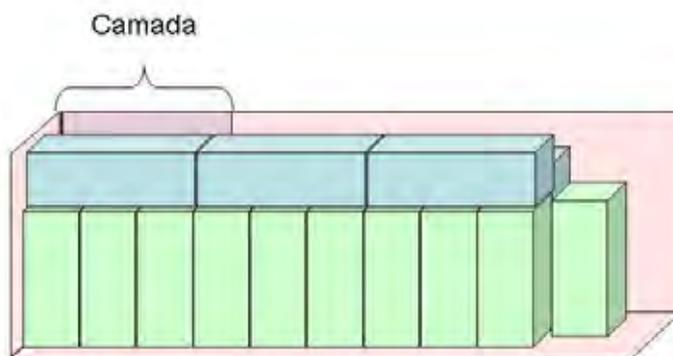
**Figura 24:** Definição da camada

Em seguida, essa camada é repetida quantas vezes forem possíveis para não ultrapassar o comprimento do caminhão. As novas superfícies são, então, carregadas da mesma maneira. Com isso, procura-se manter a estabilidade no carregamento.



**Figura 25:** Repetição da camada dentro da capacidade do caminhão

O espaço restante no final do caminhão é calculado e tratado como um novo problema



**Figura 26:** Preenchimento completo do caminhão

O que determina o fim do algoritmo é não caber mais nenhum tipo de fardo nos espaços restantes do caminhão.

Os resultados gerados pelo software estão mostrados nas tabelas a seguir.

A tabela 4 apresenta os dados de entrada do programa, que são as dimensões dos fardos e do caminhão.

**Tabela 4:** Dados de entrada (cm)

Caminhão			Fardo Tipo 1			Fardo Tipo 2		
Larg	Alt	Comp	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3
220	280	700	87	82	210	120	70	175

As tabelas 5 e 6 apresentam os dados de saída, referentes as camadas e aos fardos, respectivamente, gerados pelo software empacotamento.

**Tabela 5:** Dados de saída – Camadas (cm)

Tipo Camada	Comprimento	Quantidade de Camadas	Quantidade Fardo 1	Quantidade Fardo 2
A	210	3	4	3
B	70	1	0	1

**Tabela 6:**Dados de saída – Fardos (cm)

Tipo Fardo	Tipo Camada	Largura	Altura	Comprimento	Quantidade por camada
1	A	87	82	210	4
2	A	120	175	70	3
1	B	87	82	210	0
2	B	120	175	70	1

A tabela 7 apresenta um resumo geral dos resultados obtidos pelo software em questão.

**Tabela 7:** Resumo Geral

Quantidade Fardo 1	Quantidade Fardo 2	Espaço Disponível	Espaço Útil	Espaço Perdido
12	10	43,12m <sup>3</sup>	32,67m <sup>3</sup>	10,44m <sup>3</sup>

Estes resultados foram obtidos utilizando a linguagem de programação PHP – Hypertext Preprocessor (<http://www.php.net/>), com resultados apresentados utilizando a linguagem HTML - HyperText Markup Language, rodando sobre servidor Apache em Sistema Operacional GNU Linux Slackware 11 com Kernel 2.4. Os Arquivos foram editados utilizando a ferramenta Kate for GNU/Linux.

Os tempos computacionais foram menores que 3,0 segundos. Convém salientar que uma grande vantagem desta heurística, em relação a outros métodos da literatura, é sua simplicidade e facilidade de implantação nas situações reais.

Segundo dados de uma usina da região de Botucatu, atualmente são carregadas 24 m<sup>3</sup> de palhico, enfardados com dimensões de 1 m<sup>3</sup>, em cada caminhão que parte para a usina. A resolução do problema através do software empacotamento com os dois tipos de fardos permite carregar aproximadamente 33 m<sup>3</sup> de palhico, um aumento de aproximadamente 37 % da carga no caminhão.

## 8. CONCLUSÕES

O custo de transferência do palhiço de cana-de-açúcar do campo para o centro de processamento tem sido o grande empecilho para que este resíduo seja utilizado como matéria prima para geração de energia nas empresas sucroalcooleiras. Assim propôs-se técnicas de empacotamento, buscando maximizar a quantidade de resíduos a ser colocada no caminhão, minimizando assim o custo com transporte.

O modelo exato, proposto por Morabito e Arenales (1997), necessita de um tempo computacional excessivo e por sugestão do próprio autor do modelo passou-se a buscar uma solução heurística. Assim, desenvolveu-se um software específico para solução desse problema. O método desenvolvido apresentou um bom desempenho na tentativa de maximizar a ocupação volumétrica. Além disso, destaca-se que o tempo de execução do algoritmo foi muito baixo, não ultrapassando 3,0 segundos.

Futuramente, pretende-se expandir os resultados alcançados para fardos cilíndricos.

Além do fator econômico, com o aproveitamento do palhiço, a empresa colabora com a preservação do meio ambiente, através da colheita sem queima prévia do canavial e com a produção de energia limpa e renovável, e ao mesmo tempo, valoriza seus produtos em níveis nacionais e internacionais.

## 9. REFERÊNCIAS

ABRAMO FILHO, J. et al. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v. 67, n. 2, p. 23-5, 1993.

ANDRADE, C. E. **Um algoritmo exato para o problema de empacotamento bidimensional em faixas**. 2006. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação/ Teoria da Computação )–Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BEEHARRY, R. P. Strategies for augmenting sugarcane biomass availability for power production in Mauritius. **Biomass and Bioenergy**, Mauritius, v. 20, p. 421-429, 2001.

BISCHOFF, E. E.; RATCLIFF, M. S. W. Issues in the development of approaches to container loading. **Omega**, Swansea, v. 23, p. 377-390, 1995.

BORTFELDT, A.; GEHRING, H. **Applying tabu search to container loading problems**. In: Operations Research Proceedings. p. 533-538, 1998.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução sobre os limites autorizados das dimensões e do pesos dos caminhões com ou sem carga. Resolução nº 12/98, 23 de

setembro de 1997. Disponível em: <[http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/resolucao012\\_98.doc](http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/resolucao012_98.doc)>. Acesso em: 10 out. 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Resumo dos testes de enfardamento**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/21266.html>>. Acesso em: 13 jul. 2006.

BRUNETTA, L.; GRÉGOIRE, P. A general purpose algorithm for three-dimensional packing. **INFORMS Journal on Computing**, Maryland, v. 17, n. 3, p. 328-338, 2005

CECILIO, F. O.; MORABITO, R. **Método de otimização para o problema do carregamento de carga dentro de contêineres**. 2000. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção-Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

CECILIO, F. O.; MORABITO, R. Refinamentos na heurística de George e Robinson para o problema do carregamento de caixas dentro de contêineres. **Transportes**, Porto Alegre, v.12 nº1,p. 32-45, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar, safra 2006/2007, terceiro levantamento, novembro de 2006**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/BoletimCana-Novembro2006-07.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2007.

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

CRIARWEB. Breve História do PHP. Último acesso em 24 de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.criarweb.com/artigos/71.php>>.

DYCKHOFF, H. A typology of cutting and packing problems. **European Journal Operational Research**, Aachen, v. 44, p. 145-159, 1990.

FRANCO, F.N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar ( *Saccharum spp*) a granel**. 2003. 113 p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas)– Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

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

GEORGE, J. A.; ROBINSON, D. F. A heuristic for packing boxes into a container. **Computers and Operations Research**, Christchurch, v. 7, p. 147-156, 1980.

KLEIN, R. **Biblioteca java para solucionar o problema de carregamento de contêineres**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência da Computação) – Instituto de Ciência Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário FEEVALE, Nova Hamburgo, 2005.

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

MICHELAZZO, M. B. **Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola / Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Campinas, 2005.

MIYAZAWA, F. K. **Algoritmos de empacotamento tridimensional: novas estratégias e análises de desempenho**. 1994. 138 p. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MOLINA JUNIOR, W. F. et al. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduos de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 13, n. 5, p. 28-31, maio/jun. 1995.

MORABITO, R.; ARENALES, M. Abordagens para o problema do carregamento de contêineres. **Pesquisa Operacional**, São Carlos, v. 17, n. 1, p. 29-56, 1997.

MORIOKA, S. A.; RONCONI, D. P. Estudo de heurísticas para a resolução do problema de carregamento de paletes do distribuidor. Produção em iniciação científica da EPUSP, 2002.

OPTIMAL spektrum. **Portal brasileiro de otimização**. Optimal Spektrum é originalmente o site pessoal do Professor Robinson Hoto. Ele está hospedado nos servidores da Universidade Estadual de Londrina. Aqui também são divulgadas as atividades do grupo de pesquisa GPCE. Disponível em: <[www.simulab.uel.br/spek/](http://www.simulab.uel.br/spek/)> Acesso em: 23 maio 2007.

PHP. Manual do PHP. Último acesso em 24 de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.php.net.com/artigos/71.php>>.

PISINGER, D. **Algorithms for Knapsack Problems**. Copenhagen, 1995. 200 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Copenhagen, 1995.

RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhão enfiado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Tese (Mestrado em Agronomia / Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

RIPOLI, T.C.C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (*Sachcarum spp.*): equacionamento dos balanços energéticos e econômicos**. 1991. 150 p. Tese (Livre-Docência)-Escola Superior de Agricultura“Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, T. C. C. et al. Sugar cane biomass energy in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 13., Morocco, 1998. **Anais Morocco: ICAE**, 1998. v. 4, p. 51-57.

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

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JUNIOR, W. F.; RIPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 677-681, 2000.

SÃO PAULO. Sistema Integrado de Gestão Ambiental. Decreto Estadual n. 47.700, de 11 de março de 2003. Esse decreto apresenta normas para diminuição do emprego de fogo em canaviais na pré colheita de cana-de-açúcar Disponível em: <[http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Ambiental/Decreto%20Estadual%202003\\_47.700.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Ambiental/Decreto%20Estadual%202003_47.700.pdf)>. Acesso em: 16 maio 2007

SARTORI, M. M. P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 108p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SPAROVECK, G. et al. Aptidão das terras de Piracicaba para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 15, p. 14-17, 1997.

TERNO, J.; SCHEITHAUER, G.; SOMMERWEI ß, J. R. An efficient approach for tehe multi-pallet loading problem. **European Journal of Operational Research**, Dresden, v. 123, p. 372-381, 2000.

TIOBE SOFTAWARE. Ultimo acesso em 24 de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>>

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

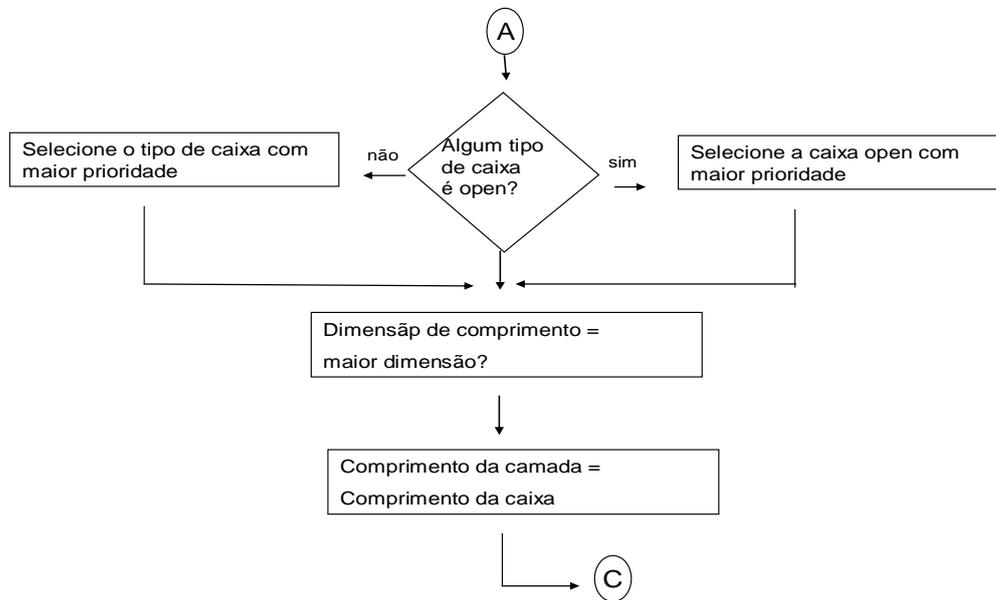
## ANEXO 1

Departamento de Bioestatística do  
 Empacotamento

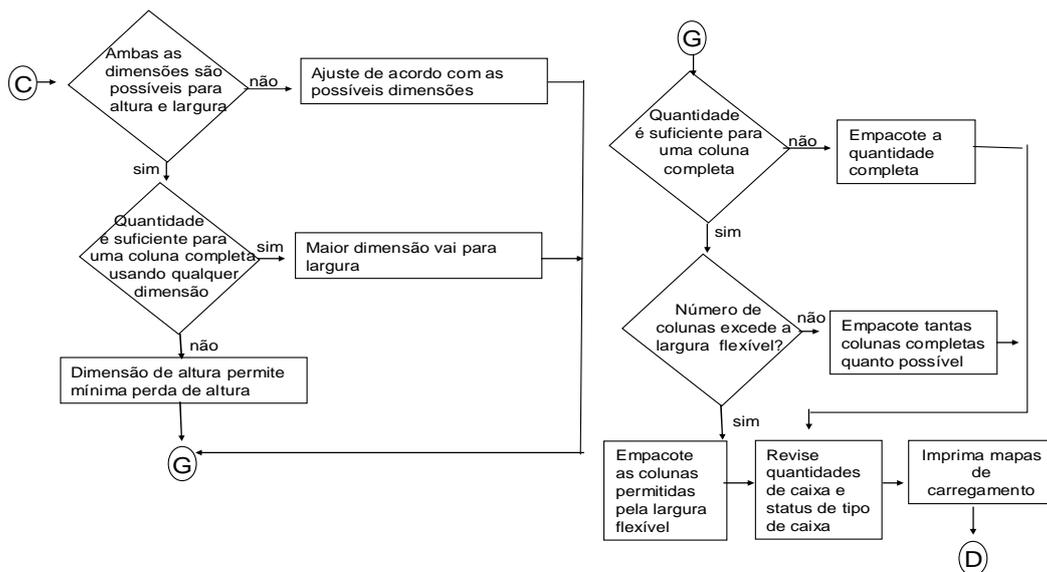
Dados do Caminhão	Largura: 220 cm Altura: 280 cm Comprimento: 700 cm
Dados da Camada	Comprimento: 210 cm Qtde Camadas: 3 Qtde Caixa 1 na base: 1 Qtde Caixa 2 na base: 3
Dados da Caixa 1	Largura: 87 cm Altura: 82 cm Comprimento: 210 cm Quantidade por camada: 4
Dados da Caixa 2	Largura: 120 cm Altura: 175 cm Comprimento: 70 cm Quantidade por camada: 3
Dados da Última Camada	Espaço Restante no Comprimento: 70 cm Comprimento: 70 cm Qtde Camadas: 1 Qtde Caixa 1 na base: 0 Qtde Caixa 2 na base: 1
Dados da Caixa 1	Largura: 87 cm Altura: 82 cm Comprimento: 210 cm Quantidade por camada: 0
Dados da Caixa 2	Largura: 120 cm Altura: 175 cm Comprimento: 70 cm Quantidade por camada: 1
Resumo Geral	Qtde Caixa 1: 12 Qtde Caixa 2: 10 Espaço Disponível: 43120000 Espaço Utilizado: 32677680 Perda de Espaço: 10442320
Alterar Parâmetros	Largura do Caminhão: <input style="width: 100px;" type="text" value="220"/> Altura do Caminhão: <input style="width: 100px;" type="text" value="280"/> Comprimento do Caminhão: <input style="width: 100px;" type="text" value="700"/>  D1 Caixa 1: <input style="width: 100px;" type="text" value="87"/> D2 Caixa 1: <input style="width: 100px;" type="text" value="82"/> D3 Caixa 1: <input style="width: 100px;" type="text" value="210"/> D1 Caixa 2: <input style="width: 100px;" type="text" value="120"/> D2 Caixa 2: <input style="width: 100px;" type="text" value="70"/> D3 Caixa 2: <input style="width: 100px;" type="text" value="175"/>  <input type="button" value="Atualizar"/>

## ANEXO 2

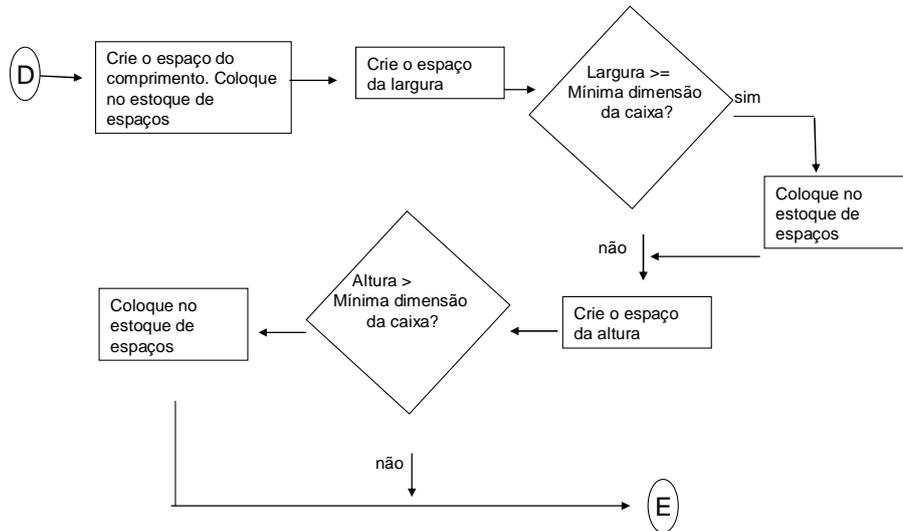
## Escolha do tipo de caixa para uma nova camada



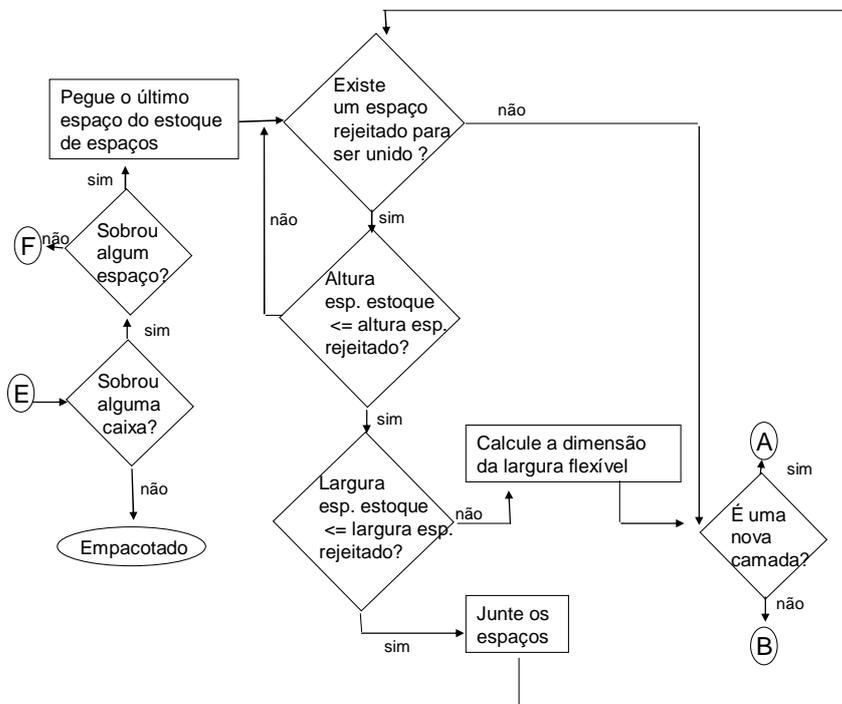
## Escolha das dimensões de largura e altura e quantidade de caixas

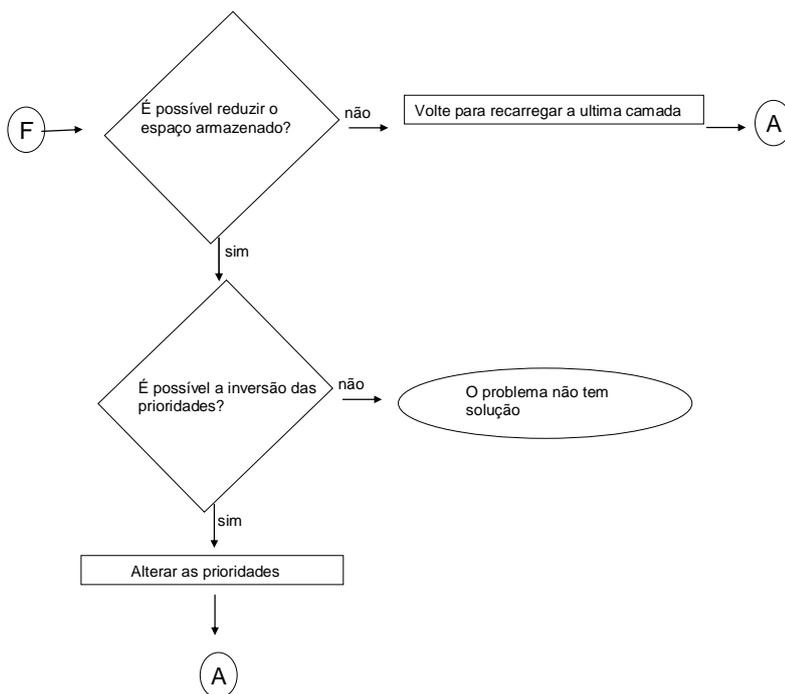


## Criação de novos espaços



## Escolha de um novo espaço





### Escolha do tipo de caixa para espaços que sobraram na camada

