

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LEANDRO BARBARA
MARCELO TRANDAFILOV DE AGUIAR

**Sistema de Apoio à Tomada de Decisão para Projeto de
Sistemas de Geração de Vapor pelo Uso de Biomassa**

São Paulo
2009

LEANDRO BARBARA
MARCELO TRANDAFILOV DE AGUIAR

**Sistema de Apoio à Tomada de Decisão para Projeto de
Sistemas de Geração de Vapor pelo Uso de Biomassa**

Relatório apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a conclusão do Curso de Engenharia Mecatrônica.

Área de concentração: Geração de energia pela queima de Biomassas
Orientador: Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Barbara, Leandro

Aguiar, Marcelo Trandafilov de

Sistema de apoio à tomada de decisão para projetos de sistemas de geração de vapor pelo uso de biomassa/ Leandro Barbara, Marcelo Trandafilov de Aguiar. – São Paulo, 2009.

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

1. Biomassa
2. Caldeiras à Vapor
3. Pesquisa Operacional
4. Lógica Fuzzy

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho, por nos orientar durante este trabalho de conclusão de curso. Agradecemos sua dedicação, sempre mostrando novas visões sobre a engenharia e suas aplicações.

RESUMO

O projeto consiste em elaborar um sistema que auxilie o usuário na escolha de soluções para a geração de vapor através do uso de biomassa. Para tanto, foi estudada a cadeia produtiva de geração de vapor por meio da utilização de caldeiras para a queima de biomassa. As variáveis consideradas para o desenvolvimento deste sistema são: Esteiras Transportadoras, Caldeiras, Tipos de Insumo de Biomassa, Sazonalidade das Biomassas e Regionalização dos Insumos. Com este foco e o auxílio de ferramentas de pesquisa operacional, foi desenvolvida uma extensa busca de informações de mercado, além da coleta de uma variedade de informações técnicas para que, a partir de um banco de dados, pudesse ser aplicada Lógica Fuzzy na análise das variáveis, construindo-se assim critérios de classificação, pesos e medidas para posterior comparação das soluções que, consequentemente, geraram matrizes de decisão. Por fim, foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de manipular o banco de dados que contem as diversas informações citadas anteriormente e que fornecesse ao usuário as melhores soluções viáveis para geração de vapor.

Palavras Chaves: Biomassa, Caldeiras à Vapor, Pesquisa Operacional, Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

This project is based on the development of a system to assist the user in the choice of solutions for steam generation through the use of biomass. For this, we studied the production chain of steam generation through the use of boilers burning biomass. The variables that are analyzed for the development of this system are: conveyors, boilers, set of input biomass, biomass seasonality and regionalization. With this focus and use of tools of operational research, we developed an extensive search of market information as well as a variety of technical information. With these informations we organized a database and then applied Fuzzy Logic to create a classification criteria, weights and measures for further comparison of the solutions thus generated arrays decision. Finally, we developed a computational tool that is capable to manipulate the database supports tables containing the various solutions and to provide possible alternatives to the user to generate steam.

Keywords: biomass, steam boilers, operations research, Fuzzy Logic.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 – Volume de controle dos domínios que serão abordados	14
Ilustração 2 – Gráfico do Poder Calorífico Inferior pelo tipo de insumo comparando as diversas biomassas	29
Ilustração 3 – Produção de diversas biomassas	30
Ilustração 4 – Produção de diversas biomassas salientando a liderança do insumo Cana-de-açúcar.....	31
Ilustração 5 – Desenvolvimento do Mercado Fornecedor, Disponibilidade e Facilidade Logística pelos tipos de biomassa.....	31
Ilustração 6 – Relação dos tipos de caldeiras com sete critérios comparativos	37
Ilustração 7 – Inter-relação entre as tabelas que compõem o banco de dados.....	52
Ilustração 8 – Diagrama de Casos de Uso	52

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da produção de arroz no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 2 - Distribuição da produção de açaí no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 3 - Distribuição da produção de algodão arbóreo no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 4 - Distribuição da produção de algodão herbáceo no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 5 - Distribuição da produção de amendoim no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 6 - Distribuição da produção de abacaxi no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 7 - Distribuição da produção de babaçu no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 8 - Distribuição da produção de cacau no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 9 - Distribuição da produção de café no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 10 - Distribuição da produção de cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 11 - Distribuição da produção de madeira-carvão vegetal no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do.....	1
Figura 12 - Distribuição da produção de caju no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 13 - Distribuição da produção de castanha do pará no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 14 - Distribuição da produção de côco no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 15 - Distribuição da produção de palma no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 16 - Distribuição da produção de feijão no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 17 - Distribuição da produção de girassol no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 18 - Distribuição da produção de laranja no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 19 - Distribuição da produção de madeira no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 20 - Distribuição da produção de mamona no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 21 - Distribuição da produção de mandioca no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 22 - Distribuição da produção de milho no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 23 - Distribuição da produção de pinhão no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1
Figura 24 - Distribuição da produção de soja no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	1

Figura 25 - Distribuição da produção de azeitona no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)	1
Figura 26: Caldeira típica de leito fixo Brasil (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007).....	79
Figura 27: As diferentes zonas de uma caldeira de leito fixo. (Fonte: Energia da Gaseificação de Biomassa como opção Energética de Desenvolvimento Limpo, 2002)	80
Figura 28: Caldeiras de leito movente contracorrente. (Fonte: USHIMA, 1996).....	81
Figura 29: Caldeiras de leito movente contracorrente. (Fonte: CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Estudo da Arte, 2002)	82
Figura 30: (a) Diagrama de gaseificador tipo Imbert, (b) Desenho esquemático de gaseificador tipo Imbert. (Fonte: REED et all, 1994)	84
Figura 31: Regiões não ocupadas pelos jatos de ar. (Fonte: KAUPP)	85
Figura 32: Esquema do gaseificador de topo aberto do IIS. (Fonte: MUKUNDA et all, 2006)	86
Figura 33: Gaseificador de Leito Fluidizado. (Fonte: Energia da Gaseificação de Biomassa como opção Energética de Desenvolvimento Limpo, 2000)	88
Figura 34: Detalhamento de gaseificador de leito fluidizado. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007).....	88
Figura 35: Evolução da pressão na base de um leito de material particulado com o aumento da vazão de ar. (Fonte: CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. Estudo da Arte, 2002)	89
Figura 36: Caldeira de Leito Fluidizado. (Fonte: SERMATEC, Caldeiras de Leito Fluidizado, 2003)	90
Figura 37: Caldeira de leito fluidizado borbulhante. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007).....	91
Figura 38: Caldeira de leito fluidizado circulante. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007).....	93
Figura 39: Esquema completo da produção de briquetes (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)	94
Figura 40: Diferentes tipos de briquetes (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)	95
Figura 41 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por correia (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	99
Figura 42 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por ar (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	100
Figura 43 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por roletes (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	101
Figura 44 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por correntes (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	102
Figura 45 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por mecanismos flexíveis (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	103
Figura 46 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por calhas vibratórias (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	104
Figura 47 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por sistemas helicoidais (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)	105

Figura 48 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por sistemas acumuladores (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009) 106

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela com o modelo teórico de programação linear em pesquisa operacional	21
Tabela 2 – Relação entre os teores de umidade de algumas biomassas	30
Tabela 3 – Conjunto de quadros com a relação entre critérios qualitativos e suas referentes notas.....	34
Tabela 4 – Matriz de decisão dos insumos com base em seis critérios	35
Tabela 5 – Classificação dos insumos baseado na matriz de decisão	36
Tabela 6 – Tabela com a relação entre os critérios qualitativos e suas referentes notas.....	39
Tabela 7 – Classificação das caldeiras com relação à matriz de decisão	40
Tabela 8 – Classificação das caldeiras considerando as subdivisões.....	40
Tabela 9 – Tabela dos quadros comparativos entre os critérios qualitativos e suas referentes notas.....	43
Tabela 10 – Matriz de decisão e classificação correspondente aos oito critérios comparativos	44
Tabela 11 – Distribuição das biomassas pelos estados e suas intensidades de disponibilidade	45
Tabela 12 – Tabela comparativa entre os critérios qualitativos e suas referentes notas.....	46
Tabela 13 – Matriz de decisão e sua classificação correspondente aos critérios abordados.....	47
Tabela 14 – Sazonalidade das biomassas em períodos e quantidades de meses ao ano	48
Tabela 15 – Tabela comparativa entre critério qualitativo e sua referente nota	50
Tabela 16 – Classificação correspondente à matriz de decisão da sazonalidade....	50
Tabela 17 - Levantamento das possíveis biomassas existentes no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)	60
Tabela 18: Comparação entre briquetes feitos com casca e com serragem Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008).....	96

Sumário

1.	Introdução	13
1.1.	Objetivo	13
1.2.	Domínios a serem tratados	14
2.	SAD – Sistemas de Apoio à Decisão (DSS – Decision Support Systems).	17
2.1.	Definição	17
2.2.	Grau de Certeza na Decisão	17
2.3.	Objetivos	17
2.4.	Componentes básicos de um SAD	18
2.5.	Aplicação	19
3.	Quantificação dos Parâmetros	20
3.1.	Pesquisa Operacional	20
3.1.1.	Histórico	20
3.1.2.	Conceito	20
3.1.3.	Modelagem	21
3.1.4.	Análise do Método	23
3.2.	Lógica Fuzzy	23
3.2.1.	Histórico da Lógica Fuzzy	24
3.2.2.	Conjuntos Fuzzy	25
3.2.3.	Suporte em Fuzzy	25
3.2.4.	Cardinalidade em Fuzzy	26
3.2.5.	Operações entre Conjuntos Fuzzy	26
3.2.6.	Aplicabilidade da Lógica Fuzzy	27
4.	Composição da Matriz de Decisão	28
4.1.	Tomada de Decisão	28
4.2.	Biomassa	28
4.2.1.	Análise de Dados	28
4.2.2.	Elaboração das Formulações	32
4.2.3.	Estabelecimento de Notas	33
4.2.4.	Matriz de Decisão	34
4.3.	Caldeiras	36
4.3.1.	Análise de Dados	36
4.3.2.	Elaboração das Formulações	37
4.3.3.	Estabelecimento de Notas	39
4.3.4.	Matriz de Decisão	40
4.4.	Esteiras Transportadoras	41
4.4.1.	Elaboração das Formulações	41
4.4.2.	Estabelecimento de Notas	43
4.4.3.	Matriz de Decisão	44
4.5.	Estados Brasileiros	44
4.5.1.	Análises de Dados	44
4.5.2.	Elaboração de Formulações	45
4.5.3.	Estabelecimento de Notas	46
4.5.4.	Matriz de Decisão	47
4.6.	Sazonalidade dos Insumos	48
4.6.1.	Análise de Dados	48
4.6.2.	Elaboração de Formulações	49
4.6.3.	Estabelecimento de Notas	49
4.6.4.	Matriz de Decisão	50

5.	Ferramenta Computacional	51
5.1.	Aplicativo	51
5.2.	Desenvolvimento do banco de dados	51
5.3.	Plataforma	53
6.	Observações Finais.....	54
6.1.	Conclusão	54
6.2.	Trabalhos Futuros	56
	Anexo A - Levantamento dos dados.....	60
	Anexo B - Avaliação dos tipos de caldeiras.....	74
	Anexo C - Equipamentos Auxiliares	94
	Anexo D - Esteiras Transportadoras	99

1. Introdução

O atual momento que passa a economia e a sociedade, no meio de crises econômicas, escassez de matérias-primas, reaproveitamento de produtos através da reciclagem, visando primeiramente diminuir custos, e consequentemente diminuir a extração dos mesmos da natureza, os aprimoramentos em cadeias produtivas têm se mostrado cada vez mais oportunos e eficientes para o crescimento econômico das empresas.

Tal aprimoramento visa à utilização de energias renováveis, como a Biomassa.

A biomassa é qualquer recurso natural renovável, que pode ser utilizado para a produção de energia, através da sua queima.

Esta fonte de energia, apesar da sua subutilização, está se fortalecendo a cada dia e se viabilizando por meio de pesquisas tecnológicas desenvolvidas por universidades ou mesmo pelo investimento de empresas interessadas em redução de custos, pois além de ser uma alternativa que resulta numa diminuição do impacto ambiental, também pode significar uma forma de se reduzir os gastos com a geração de energia elétrica.

Dentro deste estudo sobre biomassa pôde-se constatar as oportunidades que são descobertas com o passar do tempo, desde a produção de energia pelos nossos antepassados, utilizando-se folhas secas e gravetos para a geração de calor, até a construção de usinas hidráulicas, térmicas e nucleares, utilizando-se da mais recente tecnologia existente no mercado.

1.1. Objetivo

Neste ponto de vista, a abordagem que será dada neste trabalho, é a elaboração de um sistema de apoio à decisão dos usuários interessados nessas soluções, que utilizam essas fontes renováveis de energia, que vem se tornando o maior refúgio para a diminuição da dependência de fontes não renováveis: a biomassa.

Na Ilustração 1, um esquema do volume de controle que delimita o campo de ação contemplado neste trabalho.

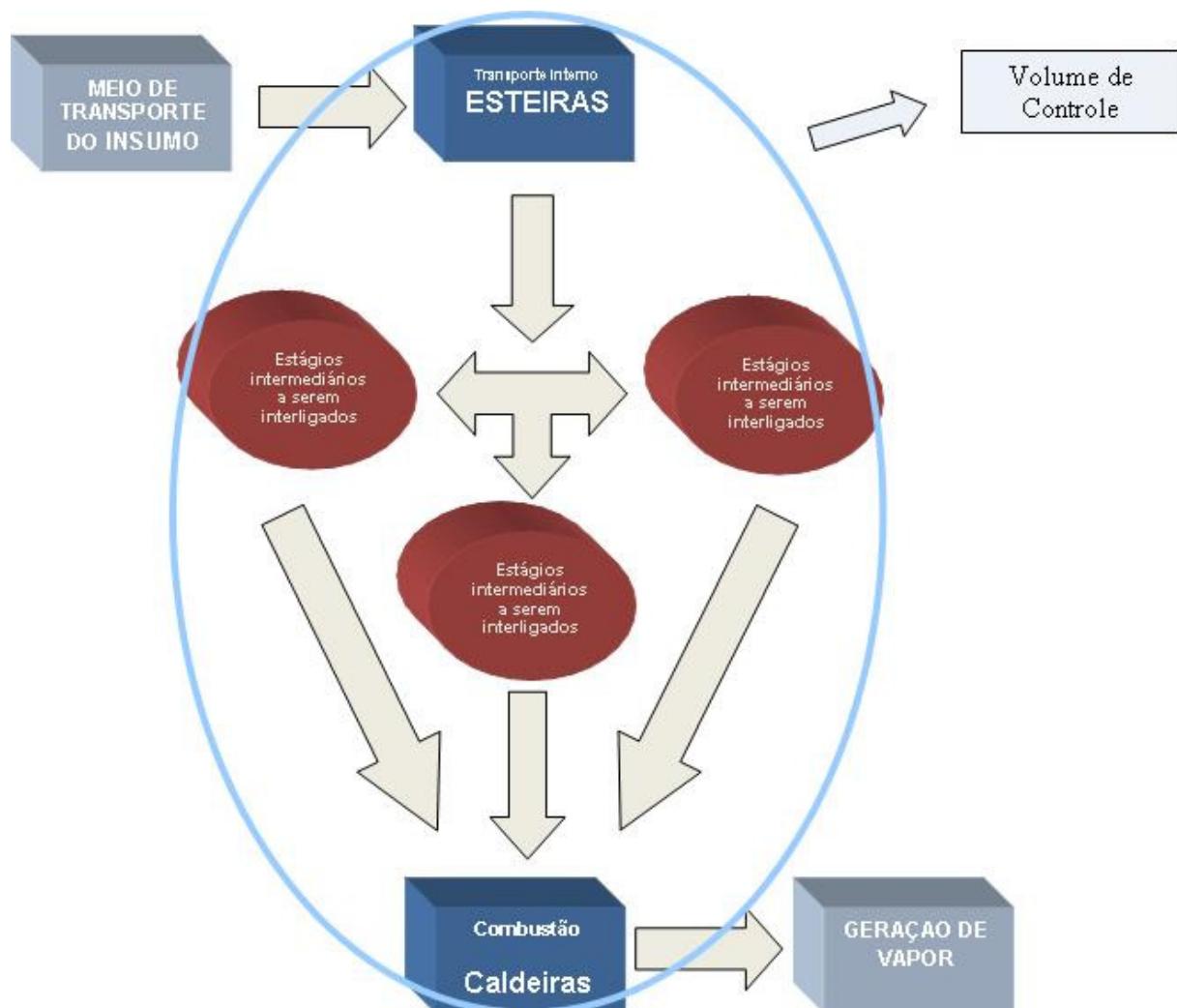


Ilustração 1 – Volume de controle dos domínios que serão abordados

1.2. Domínios a serem tratados

Para uma análise sobre o processo como um todo, deve-se atentar para alguns domínios característicos da cadeia de geração de vapor. Neste processo através da queima de biomassa, além do estudo aprofundado sobre quais caldeiras são melhores para cada tipo de insumo, capacidade de instalação, área útil fabril e região devem ser analisados outros equipamentos auxiliares, como se segue.

- Briquetadeiras, moedoras, para o preparo do insumo antes de ser utilizado como combustível, caso se mostre necessário.
- Sistema de esteiras transportadoras para levar o insumo até o silo da caldeira.
- Silo para armazenamento do insumo que será utilizado na caldeira
- Tanque de captação de cinzas pesadas no fundo das caldeiras, com sistema de transporte destas cinzas.
- Grande quantidade de sopradores de fuligem para eliminarem continuamente os depósitos sobre os tubos.
- Sistema de proteção contra a incidência direta das cinzas nos feixes de troca de calor para evitar a erosão (telhas de sacrifício)
- Sistema de captação de cinzas leves levadas com os gases em direção a chaminé (coletores e precipitadores).

Nesta abordagem será visto com maior detalhe as esteiras transportadoras e as briquetadeiras, uma vez que a maior parte dos insumos já se encontra nas condições adequadas de moagem, assim não se tornando necessária uma análise sobre moedores. Os sistemas de armazenagem e coleta de cinzas também não serão analisados, pois não são altamente determinantes nos fatores de geração de vapor.

1.3. Organização do Trabalho

O capítulo 2 refere-se a Sistemas de Apoio à Decisão. Nesse capítulo mostramos sua definição e listamos seus componentes básicos, que nos auxiliaram na implementação do aplicativo.

No capítulo 3 é mostrado a quantificação dos parâmetros usados para análise e construção das matrizes de decisão, bem como seu conceito e modelagem usada, tomando como base a *Lógica Fuzzy*.

No capítulo 4, mostramos como foram feitas as tomadas de decisão, desde a criação da matriz de decisão para cada objeto de estudo em questão, salientando como foram feitas as análises dos dados, a elaboração

formulações, o estabelecimento das notas, até a construção das matrizes de decisão.

O capítulo 5 se refere à ferramenta computacional, explicando o motivo pelo qual utilizamos o Visual Studio 2008 para a implementação do aplicativo. Mostra também, como o banco de dados foi construído para que as relações fossem possíveis, e por fim, apresenta o funcionamento do aplicativo.

Por fim, no capítulo 6 constam as considerações finais sobre o trabalho em questão.

2. SAD – Sistemas de Apoio à Decisão (DSS – Decision Support Systems)

2.1. Definição

Um SAD é um sistema que apóia e não substitui um gerente na sua tomada de decisão. Esses sistemas envolvem atividades as quais tentam proporcionar ao profissional a “melhor” decisão.

2.2. Grau de Certeza na Decisão

A quantidade de estrutura de um problema diz respeito à quantidade necessária de julgamento e avaliação humana em cada trabalho. Quanto mais estruturado for um processo, mais simples será automatizá-lo e mais estável será o sistema de informação (SI) decorrente.

Existem três tipos de problemas levando-se em conta o grau de certeza na decisão:

- Problemas Estruturados: no qual as variáveis e dados relevantes são conhecidos e há pouco julgamento e avaliação;
- Problemas Não-Estruturados: no qual não há uma definição clara e nem todas as variáveis são conhecidas e alguns dados são indisponíveis;
- Problemas Semi-estruturados: nos quais algumas partes podem ser resolvidas por métodos de decisão formal.

2.3. Objetivos

O objetivo de um SAD é o apoio ao administrador, gerente ou gestor nas atividades de tomada de decisão e não a substituição do tomador de decisões. Esse tipo de Sistema de Informação é orientado a tarefas decisórias não-estruturadas ou semi-estruturadas, não cabendo tal tipo de sistema para os problemas estruturados.

2.4. Componentes básicos de um SAD

O componente básico de um SAD é o seu banco de dados e seus gerenciamentos.

Um sistema de dados para um SAD pode ser caracterizado da seguinte forma:

- Capacidade de combinar diversas fontes de dados através do processo de extração e obtenção de dados de forma fácil e rápida..
- Capacidade de acrescentar e excluir fontes de dados sistematicamente.
- Capacidade de retratar estruturas de dados lógicas de modo que o usuário compreenda o que está disponível e possa especificar os acréscimos e exclusões necessários.

Existem dois tipos básicos de extração de dados (Data Mining):

A primeira pode ser guiada pelo usuário, ou seja, o usuário fica responsável em definir regras para a mineração de dados. Isso pode envolver a utilização de critérios mais flexíveis e, possivelmente, pessoais. Nesse modelo, é importante ter uma preocupação em facilitar a visualização dos dados pelo usuário. Assim, recomenda-se a implantação de sistemas de visualização onde elementos de naturezas diversas apresentam-se em cores e formas diferentes para o usuário.

A segunda forma é do tipo automático, no qual todo o tipo de regra fica a cargo do sistema informatizado.

Hoje em dia, há uma tendência de uso de novas arquiteturas de banco de dados, o Datawarehouse. Nessa arquitetura, os bancos de dados são desenhados para permitir que as pessoas que tomam decisão sejam capazes de fazer suas próprias análises.

Outro componente é o subsistema de Modelos de Aplicação, que deve ter a capacidade de criar modelos rápidos e fáceis, dando suporte a todos os níveis gerenciais, com a capacidade de se inter-relacionar através do banco de dados.

O último componente é a interface usuário/sistema. A interface deve ter a capacidade de lidar com diversos estilos de diálogo, talvez passar de um

estilo para o outro, de acordo com a escolha do usuário, bem como capacidade de apresentar dados em diversos formatos e meios.

2.5. Aplicação

O projeto implementado é uma plataforma de auxílio à tomada de decisão para projetos de sistemas de geração de vapor pelo uso de biomassa, ou seja, um SAD específico para este fim.

O aplicativo implementado possui um extenso banco de dados, relacional, em que as tabelas e seus atributos foram dimensionados de modo que sua apresentação na interface seja simples e direta.

A extração dos dados pelo usuário, através do uso da interface, é de forma automática, ou seja, toda a lógica de inter-relacionamento e apresentação dos dados é feita pelo sistema informatizado, não tendo a opção de o usuário ser responsável em definir regras para a mineração de dados.

A interface é bastante amigável, sendo de fácil utilização, trazendo resultados de busca em forma de listas ranqueadas, e textos explicativos referentes a cada seleção, cumprindo a função de um SAD.

3. Quantificação dos Parâmetros

3.1. Pesquisa Operacional

3.1.1. Histórico

A Pesquisa Operacional surgiu durante a Segunda Guerra Mundial quando um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar e decidir sobre a utilização mais eficaz dos recursos militares. (Winston, W.L. Adaptado de *Operations Research: Applications and Algorithms*. 1994.)

Desde então, a pesquisa operacional vem progredindo muito. Isto se deve, em especial, ao aumento da velocidade de processamento e quantidade de memória dos computadores e pela larga utilização de microcomputadores dentro das empresas. (Winston, W.L. Adaptado de *Operations Research: Applications and Algorithms*. 1994.)

3.1.2. Conceito

A Pesquisa Operacional consiste na busca da melhor solução para um determinado problema utilizando um modelo matemático que simplifica um sistema real. Essa simplificação causa algumas perdas, mas que são totalmente aceitáveis em virtude dos benefícios trazidos pela sua utilização.

Esses modelos normalmente envolvem um grande número de cálculos repetitivos, fazendo-se necessário o auxílio de computadores.

Neste projeto o objetivo é identificar o melhor sistema de geração de vapor através do uso de biomassa para cada conjunto de dados fornecido pelo usuário. Para isso queremos encontrar o conjunto que maximiza a satisfação do consumidor definindo, por exemplo, a melhor biomassa, a melhor caldeira, a melhor esteira, de acordo com as disponibilidades e informações do usuário. Para cada uma das hipóteses será utilizado um modelo matemático de programação linear inteira binária para obter uma função objetivo e uma solução ótima.

3.1.3. Modelagem

Utilizando as técnicas de pesquisa operacional, orientadas a programação linear, pode-se saber qual tipo de biomassa é mais indicada ao consumidor.

As variáveis que influenciam nessa escolha assumem valores positivos reais e são:

PCA - Poder Calorífico

TUI - Taxa de Umidade Interna

DIS - Disponibilidade

LOC - Localização

DMF - Desenvolvimento do Mercado Fornecedor

PRA - Produção Anual

Para elaboração do modelo teórico, serão considerados **n** tipos de biomassa e dispondo-se de todos os valores das variáveis anteriormente descritas para cada tipo de biomassa (valores em destaque) pode-se construir a *Tabela 1*:

Tabela 1 – Tabela com o modelo teórico de programação linear em pesquisa operacional

		VARIÁVEIS					
		PCA	TUI	DIS	LOC	DMF	PRA
B I O M A S S A	<i>Tipo 1</i>	PCA₁	TUI₁	DIS₁	LOC₁	DMF₁	PRA₁
	<i>Tipo 2</i>	PCA₂	TUI₂	DIS₂	LOC₂	DMF₂	PRA₂
	<i>Tipo 3</i>	PCA₃	TUI₃	DIS₃	LOC₃	DMF₃	PRA₃
	<i>Tipo 4</i>	PCA₄	TUI₄	DIS₄	LOC₄	DMF₄	PRA₄
	<i>Tipo 5</i>	PCA₅	TUI₅	DIS₅	LOC₅	DMF₅	PRA₅
	<i>Tipo 6</i>	PCA₆	TUI₆	DIS₆	LOC₆	DMF₆	PRA₆

	<i>Tipo n</i>	PCA_n	TUI_n	DIS_n	LOC_n	DMF_n	PRA_n

A biomassa ideal é aquela que possui as variáveis que maximizam a equação (função objetivo):

$$Y = 6.PCA - 4.TUI + 8.DIS + 9.LOC + 7DMF + 5PRA$$

Estes pesos estão sendo admitidos por meio de uma análise de mercado, em que foi assumida uma média dos pesos relativos fornecidos por três empresas que atuam no ramo de geração de vapor por biomassa. Ao serem questionados sobre um peso que classificaria cada um dos critérios, assumindo-se a faixa de 0 a 10 como valores possíveis, foram respondidos valores que culminaram na média atribuída a cada um dos critérios destacados na fórmula.

A técnica da programação linear consiste em localizar valores para determinado tipo de variável a fim de maximizar a função objetivo. Essas variáveis que serão “analisadas” são binárias ($X_n = 0$ ou $X_n = 1$) e são definidas como:

$X_n = 0$ - Ocorre no caso em que a biomassa n não é escolhida

$X_n = 1$ - Ocorre no caso em que a biomassa n é escolhida

Para que o algoritmo funcione corretamente é necessário impor restrições para o problema em questão.

$\sum_{i=1}^n X_i = 1$ - Esta restrição impõe que um, e somente um tipo de biomassa seja escolhida.

Conjunto de restrições para X_1 :

$$X_1 \cdot (PCA_1 - PCA) = 0 ;$$

$$X_1 \cdot (TUI_1 - TUI) = 0 ;$$

$$X_1 \cdot (DIS_1 - DIS) = 0 ;$$

$$X_1 \cdot (LOC_1 - LOC) = 0 ;$$

$$X_1 \cdot (DMF_1 - DMF) = 0 ;$$

$$X_1 \cdot (PRA_1 - PRA) = 0 ;$$

Todas as n variáveis X_n recebem um conjunto de restrições equivalentes, assim as restrições para a t -ésima variável são:

Conjunto de restrições para X_i :

$$X_i \cdot (PCA_i - PCA) = 0 ;$$

$$X_i \cdot (TUI_i - TUI) = 0 ;$$

$$X_i \cdot (DIS_i - DIS) = 0 ;$$

$$X_i \cdot (LOC_i - LOC) = 0 ;$$

$$X_i \cdot (DMF_i - DMF) = 0 ;$$

$$X_i \cdot (PRA_i - PRA) = 0 ;$$

Portanto serão (6.n+1) equações de restrições utilizadas.

3.1.4. Análise do Método

Com a formulação estabelecida é necessário se utilizar de um software específico para encontrar a biomassa que maximiza a função Y. Considerando que ao se analisar atentamente a formulação do problema, percebe-se que as restrições podem ser satisfeitas simplesmente substituindo as variáveis próprias de cada biomassa na função objetivo e adotando aquela que possuir maior Y, observa-se que uma possível implementação matemática é por meio das matrizes de decisão.

Portanto, para as demais matrizes de decisão foi utilizado o mesmo método, pois se trata de uma análise similar, considerando os critérios de análises e seus graus restritivos.

3.2. Lógica Fuzzy

Usamos, no cotidiano, conceitos subjetivos para classificar ou considerar certas situações tais como:

- Siga em frente "alguns metros";
- O dia está "parcialmente" nublado;
- Preciso perder "alguns" quilos para ficar "bem";
- Estamos com uma moeda "estável".

ou ainda:

- A classificação de certos objetos como "largo", "sujo";
- A classificação de pessoas pela idade tal como "velho", "jovem";
- A descrição de características humanas como "saudável", "alto".

Nos exemplos acima, os termos entre aspas são "fuzzy" no sentido que todos eles envolvem imprecisão e são conceitos vagos. O conceito "fuzzy" pode ser entendido como uma situação onde não podemos responder simplesmente "Sim" ou "Não". Mesmo conhecendo as informações necessárias sobre a situação, dizer algo entre "sim" e "não", como por exemplo, "talvez", "quase", se torna mais apropriado. (PUC. O Conceito "Fuzzy". 2009.)

Considere, por exemplo, informações como "homens altos", "dias quentes" ou "vento forte". Nada existe que determine exatamente qual a "altura", "temperatura" ou "velocidade" que podemos considerar como limites para tais informações. Se considerarmos como alto todos os homens com mais de 1,90m, então um homem com 1,88m não seria "alto" e sim "quase alto".

3.2.1. Histórico da Lógica Fuzzy

As primeiras noções da lógica dos conceitos "vagos" foi desenvolvida por um lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956) em 1920 que introduziu conjuntos com graus de pertinência sendo 0 , $\frac{1}{2}$ e 1 e, mais tarde, expandiu para um número infinito de valores entre 0 e 1.

A primeira publicação sobre lógica "fuzzy" data de 1965, quando recebeu este nome. Seu autor foi Lotfi Asker Zadeh (ZAH-da), professor em Berkeley, Universidade da California. Zadeh criou a lógica "fuzzy" combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, definindo graus de pertinência. Devido ao desenvolvimento e as inúmeras possibilidades práticas dos sistemas "fuzzy" e o grande sucesso comercial de suas aplicações, a lógica "fuzzy" é considerada hoje uma técnica "standard" e tem uma ampla aceitação na área de controle de processos industriais. (PUC. O Conceito "Fuzzy". 2009.)

3.2.2. Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica, os conjuntos são denominados "crisp" e um dado elemento do universo em discurso (domínio) *pertence* ou *não pertence* ao referido conjunto.

Na teoria dos conjuntos "fuzzy" existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto.

Podemos verificar que não existe uma fronteira bem definida para decidirmos quando um elemento pertence ou não ao respectivo conjunto nos exemplos acima.

Com os conjuntos "fuzzy" podemos definir critérios e graus de pertinência para tais situações.

A função característica (crisp sets) pode ser generalizada de modo que os valores designados aos elementos do conjunto universo U pertençam ao intervalo de números reais de 0 a 1, inclusive, isto é, $[0,1]$.

$$\mu_A : U \mapsto [0,1].$$

Estes valores indicam o GRAU DE PERTINÊNCIA dos elementos do conjunto U em relação ao conjunto A, isto é, quanto é possível um elemento x de U pertencer ao conjunto A.

Tal função é chamada FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA e o conjunto A é definido como "CONJUNTO FUZZY".

3.2.3. Suporte em Fuzzy

O Suporte de um conjunto fuzzy A no conjunto universo U é o conjunto clássico que contém todos os elementos de U que têm grau de pertinência maior do que zero (>0) e indicamos

$$\text{sup } A = \{ x \in U \mid \mu_A(x) > 0 \}$$

3.2.4. Cardinalidade em Fuzzy

A Cardinalidade de um conjunto "fuzzy" A sobre um conjunto universo finito U é a soma dos graus de pertinência de todos os elementos de U em A e indicamos:

$$|A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x)$$

3.2.5. Operações entre Conjuntos Fuzzy

O conjunto "fuzzy" A é um subconjunto de um conjunto "fuzzy" B se o grau de pertinência de cada elemento do conjunto universo U no conjunto A é menor ou igual ao seu grau de pertinência no conjunto B, ou seja, para todo $x \in U$, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ e indicamos

$$A \subseteq B.$$

O Complemento de um conjunto "fuzzy" A em relação ao conjunto universo U é indicado por \bar{A} . Neste caso, a função de pertinência é definida como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ para todo } x \in U$$

A União de dois conjuntos "fuzzy" A e B é um conjunto "fuzzy" $A \cup B$ tal que

Para todo $x \in U$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

A Intersecção de dois conjuntos "fuzzy" A e B é um conjunto "fuzzy" $A \cap B$ tal que

Para todo $x \in U$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

3.2.6. Aplicabilidade da Lógica Fuzzy

A Teoria Fuzzy permite refazer várias interpretações nas subáreas da Teoria dos Conjuntos, Lógica, Matemática, Análise, Estatística, Sistemas Dinâmicos, Teoria de Controle, etc.

A característica essencial da modelagem matemática de processos variacionais, utilizando sistemas de equações determinísticas, é a precisão obtida nas previsões do fenômeno. Evidentemente, tais previsões ou inferências estão sempre dependentes de informações precisas que são inseridas nos valores médios dos parâmetros utilizados. Por outro lado, nos modelos estocásticos, as soluções médias dos modelos são obtidas posteriormente, quando se tem alguma distribuição estatística de dados referentes ao fenômeno analisado.

4. Composição da Matriz de Decisão

4.1. Tomada de Decisão

Com base na teoria da Lógica Fuzzy foram desenvolvidos vários critérios para os diversos domínios que serão analisados. Foram pré-determinados critérios de análise para todos os domínios de tal forma que relatassem quaisquer preponderâncias à geração de vapor pela queima de biomassa. Conforme descrito anteriormente, o modelo matemático de suporte para o SAD foram as matrizes de decisão. Os dados foram dimensionados com a aplicação do conceito de Lógica Fuzzy, conforme citado no capítulo anterior.

Portanto, as análises foram suportadas por atributos do tipo pesos e valores específicos para cada característica levantada sobre biomassas, caldeiras, esteiras, estados e sazonalidade.

Os valores específicos (que podemos denominar notas para efeito de simplificação) foram estabelecidos segundo os valores das categorias analisadas e, de acordo com cada faixa de valores das características foram estabelecidas notas quantitativas, aplicando-se assim os conjuntos Fuzzy. Através dos pesos foram executados os cálculos necessários para a conversão em valores adequados para serem comparados.

4.2. Biomassa

4.2.1. Análise de Dados

Na *Ilustração 2* segue a relação entre os diversos tipos de biomassa e os respectivos valores de poder calorífico inferior para ilustrar a comparação entre os poderes de queima de cada insumo. Para salientar os valores mais altos, que se referem aos insumos com melhores capacidades de geração de calor, foram destacados:

- Valores acima de 4000 Kcal/Kg,
- Valores acima de 4500 Kcal/Kg e
- Valores acima de 5000 Kcal/Kg.

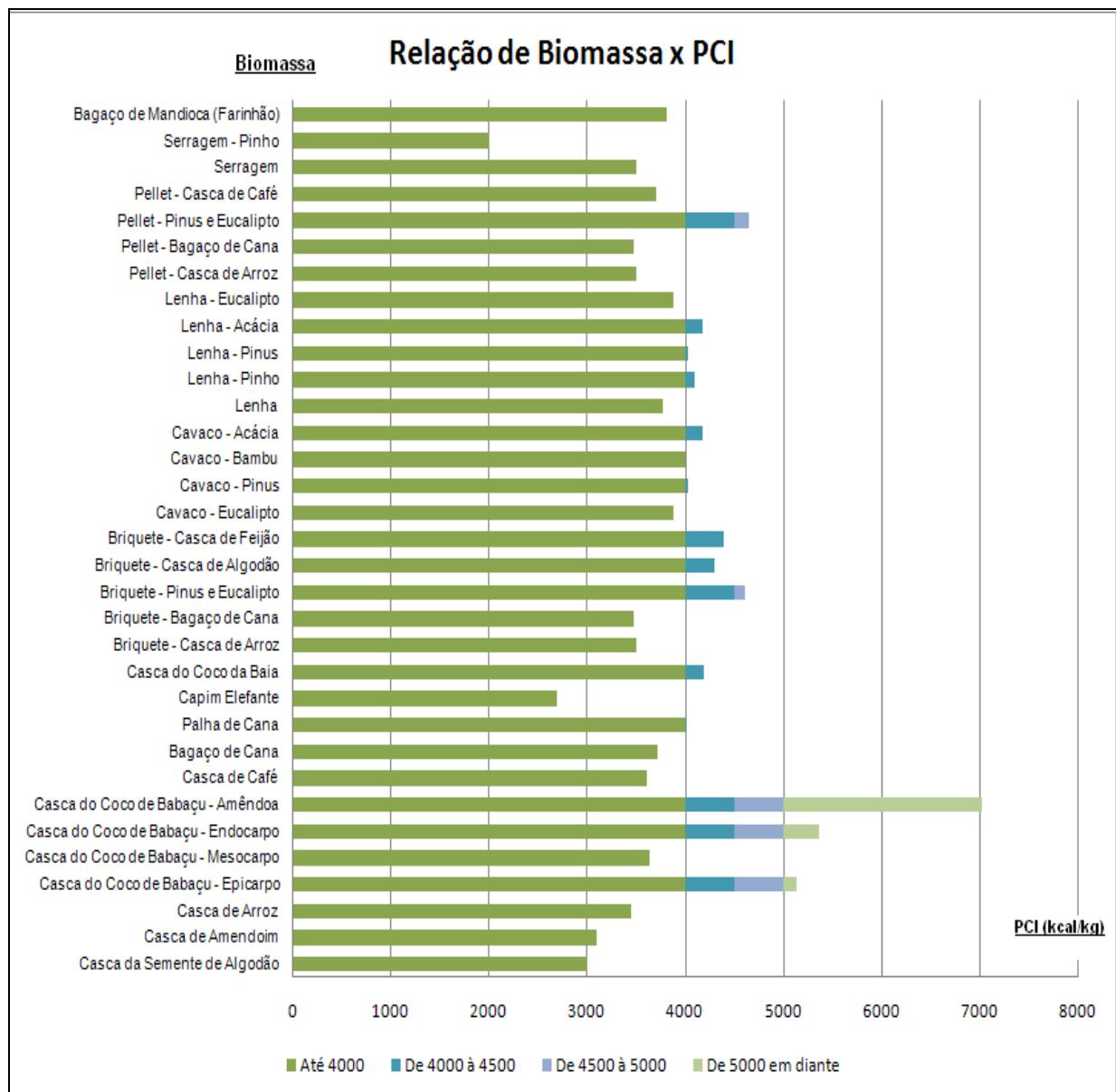


Ilustração 2 – Gráfico do Poder Calorífico Inferior pelo tipo de insumo comparando as diversas biomassas

Pode ser notada uma relação de tais biomassas no que diz respeito a característica de umidade destes insumos. A umidade pode interferir na utilização de alguns tipos de caldeira, pois com uma umidade elevada pode reduzir o rendimento de determinados trocadores de calor. Foi utilizada como base umidades inferiores a 10% para consideração “Boa” e maiores ou iguais a 10% “Regular”. A Tabela 2 traz a síntese dos valores mais significativos resultantes:

Tabela 2 – Relação entre os teores de umidade de algumas biomassas

BIOMASSA	UMIDADE
Casca do Coco de Babaçu – Amêndoas	0,00%
Palha de Cana	6,28%
Casca do Coco da Baia	0,00%
Briquete – Casca de Arroz	8,00%
Briquete – Pinus e Eucalipto	9,00%
Pellet – Casca de Arroz	8,00%
Pellet – Pinus e Eucalipto	7,20%
Bagaço de Mandioca (Farinhão)	0,00%

Para uma análise da capacidade de produção das biomassas, pode-se estabelecer a *Ilustração 3*, que mostra a superioridade da produção de cana no país com relação aos outros tipos de biomassa em potencial.

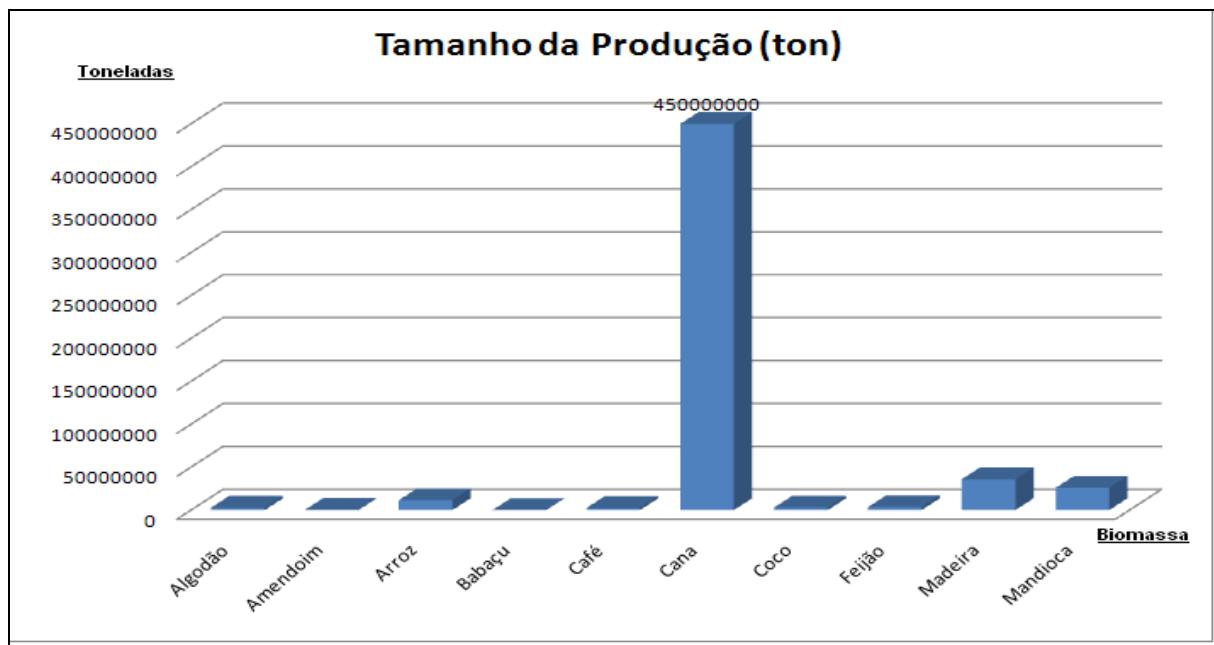


Ilustração 3 – Produção de diversas biomassas

Agora, para uma melhor análise dos outros tipos de insumo, foi alterada a escala do gráfico e retirado o enfoque de cana, assim sendo, houve o destaque de outros três insumos como a madeira, a mandioca e o arroz, respectivamente. A *Ilustração 4* mostra o aspecto comentado acima.

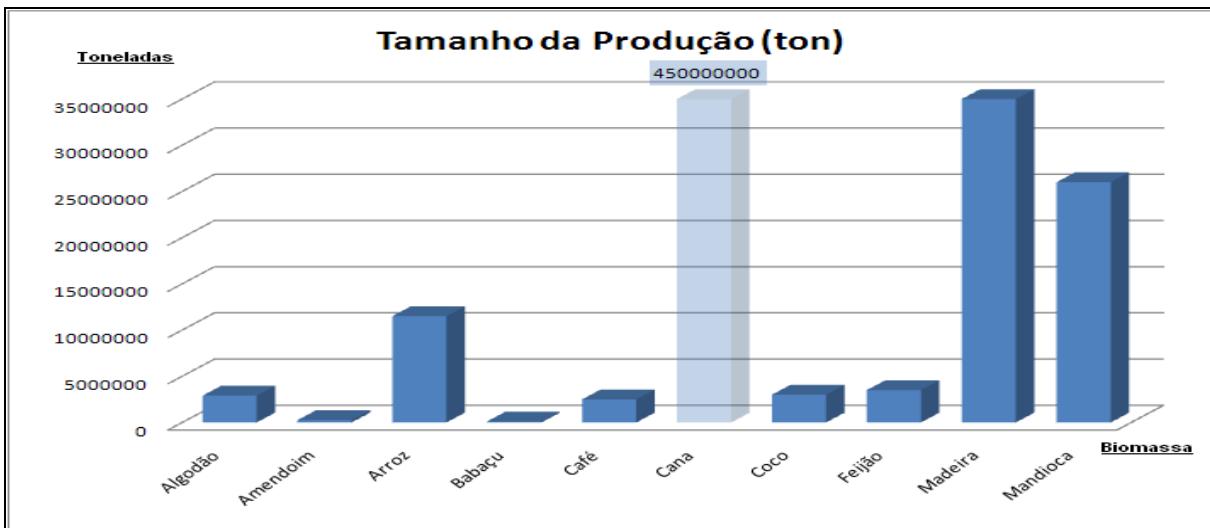


Ilustração 4 – Produção de diversas biomassas salientando a liderança do insumo Cana-de-açúcar

Na Ilustração 5 ocorre a análise do comportamento do mercado fornecedor para com algumas fontes de biomassa. O comportamento é analisado em três frentes:

- a quantidade de fornecedores hábeis para a comercialização dos insumos;
- a disponibilidade das biomassas vista em âmbito nacional; e
- a localização das biomassas analisadas de uma forma a se evitar entraves logísticos para os grandes centros industriais do país.

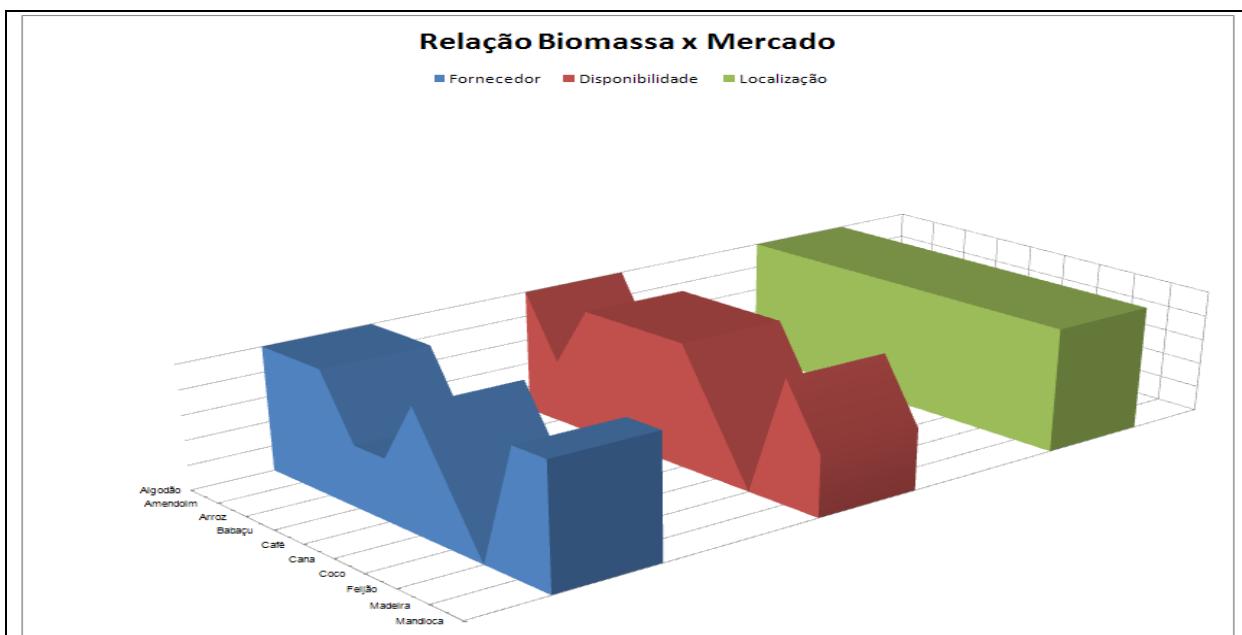


Ilustração 5 – Desenvolvimento do Mercado Fornecedor, Disponibilidade e Facilidade Logística pelos tipos de biomassa

4.2.2. Elaboração das Formulações

No caso das biomassas adotou-se como base as características a seguir:

- Poder Calorífico Inferior.
- Porcentagem de Umidade.
- Produção Anual do Insumo.
- Grau de estrutura dos fornecedores de cada insumo.
- Disponibilidade do Insumo.
- Localização do Insumo em âmbito nacional.

Neste contexto, aplicou-se Lógica Fuzzy para estes parâmetros relativizando assim as biomassas, podendo-se estabelecer critérios de comparação, possíveis pesos (através dos conjuntos Fuzzy) e notas (transformação do qualitativo em quantitativo pelas equivalências e correspondências Fuzzy), resultando assim um determinado ranking entre as biomassas selecionadas para comparação.

$F(PCI, U, PD, F, DSP, LOC)$ é a função que rege a análise das biomassas, em que:

- PCI Flexibilidade ao uso de diversas biomassas
 - Muito alto $[5000, \infty[$
 - Alto $[4500, 5000[$
 - Médio $[4000, 4500[$
 - Baixo $[3500, 4000[$
 - Muito baixo $[0, 3500[$
- U Tolerância à umidade dos insumos
 - Excelente $[0,5\%[$
 - Bom $[5\%, 10\%[$
 - Médio $[10\%, 15\%[$
 - Regular $[15\%, 20\%[$
 - Ruim $[20\%, 100\%]$

- PD Quantidade de produção em toneladas
 - Muito alto [30000000,∞[
 - Alto [10000000,30000000[
 - Médio [5000000,10000000[
 - Baixo [1000000,5000000[
 - Muito baixo [0,1000000[
- F Desenvolvimento do mercado fornecedor
(Alto, médio, pequeno)
- DSP Disponibilidade do insumo
(Alta e baixa)
- LOC Localização do insumo
(Boa: logística de transportes satisfatória, Ruim:
logística de transportes precária)

$C = (\mu_{PCI}, \mu_U, \mu_{PD}, \mu_F, \mu_{DSP}, \mu_{LOC})$: $\mathbf{U} \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os critérios analisados para biomassas

$D = (P_{PCI}, P_U, P_{PD}, P_F, P_{DSP}, P_{LOC})$: $\mathbf{U} \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os pesos dos critérios analisados para biomassas

$$|C| = \sum \mu_C, |D| = \sum P_D \quad \text{e} \quad |N2| = \sum [(10^* \mu_C) * (10^* P_D)]$$

em que $|C|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto C

em que $|D|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto D

Assim, pode-se construir a matriz de decisão com base na fórmula:

$$T2 = |N2| / (10^* |D|)$$

4.2.3. Estabelecimento de Notas

Com a finalidade de se estabelecer notas quantitativas aos valores qualitativos normalizados em cada critério, foi considerada a relação através do conjunto de quadros da Tabela 3..

Tabela 3 – Conjunto de quadros com a relação entre critérios qualitativos e suas referentes notas

PCI			Umidade		
Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS	Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS
[5000, ∞[	Muito Alto	10	[0,5%[	Excelente	0
[4500,5000[	Alto	8	[5%,10%[	Bom	2.5
[4000,4500[	Médio	6	[10%,15%[	Médio	5
[3500,4000[	Baixo	4	[15%,20%[	Regular	7.5
[0,3500[	Muito Baixo	2	[20%,100%]	Ruim	10

Produção			Mercado Fornecedor		
Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS	Qualificação	NOTAS	
[30000000, ∞[	Muito Alto	10	Alto	9
[10000000,30000000[	Alto	8	Médio	5
[5000000,10000000[	Médio	6	Pequeno	1
[1000000,5000000[	Baixo	4		
[0,1000000[	Muito Baixo	2		
No caso de não existência de informações	Inexistente	5			

Disponibilidade			Localização		
Qualificação	NOTAS	Qualificação	NOTAS		
Alta		9	Boa (logística de transportes satisfatória)		9
Baixa		5	Ruim (logística de transportes precária)		1
No caso de não existência de informações	Inexistente	1			

4.2.4. Matriz de Decisão

A Tabela 4 apresenta a tabela das biomassas com os valores e suas conversões. Os valores em verde escuro são os valores finais para cada tipo de biomassa.

Tabela 4 – Matriz de decisão dos insumos com base em seis critérios

Biomassa	PCI	Umidade	Produção	Forn.	Disp.	Local.	Pont.	PCI	Umid.	Prod.	Forn.	Disp.	Local.	
Casca da Semente de Algodão	3.000	12,00%	2900000	10	10	10		2	5	4	9	9	9	
Casca de Amendoim	3.100	12,00%	250000	10	5	10		2	5	2	9	5	9	
Casca de Arroz	3.450	10,00%	11500000	10	10	10		2	5	8	9	9	9	
Casca do Coco de Babaçu - Epicarpo	5.136	11,30%	117000	5	10	10		10	5	2	5	9	9	
Casca do Coco de Babaçu - Mescocarpo	3.631	15,30%	117000	5	10	10		4	2,5	2	5	9	9	
Casca do Coco de Babaçu - Endocarpo	5.362	12,60%	117000	5	10	10		10	5	2	5	9	9	
Casca do Coco de Babaçu - Amêndoas	7.011	0,00%	117000	5	10	10		10	10	2	5	9	9	
Casca de Café	3.608	13,50%	2500000	5	10	10		4	5	4	5	9	9	
Bagaço de Cana	3.717	10,00%	450000000	10	10	10		4	5	10	9	9	9	
Palha de Cana	4.020	6,28%	450000000	10	10	10		6	7,5	10	9	9	9	
Capim Elefante	2.700	30,00%	0	0	5	10		N	2	0	5	1	5	9
Casca do Coco da Baía	4.189	0,00%	3000000	5	5	10		O	6	10	4	5	5	9
Briquete - Casca de Arroz	3.500	8,00%	11500000	10	10	10		T	4	7,5	8	9	9	9
Briquete - Bagaço de Cana	3.480	15,00%	450000000	10	10	10		A	2	2,5	10	9	9	9
Briquete - Madeira	4.600	9,00%	36000000	10	10	10		S	8	7,5	10	9	9	9
Briquete - Casca de Algodão	4.300	12,00%	2900000	10	10	10		6	5	4	9	9	9	
Briquete - Casca de Feijão	4.393	10,00%	3500000	0	0	10		6	5	4	1	1	9	
Cavaco	3.880	10,00%	36000000	10	10	10		4	5	10	9	9	9	
Lenha	3.770	10,00%	36000000	10	10	10		4	5	10	9	9	9	
Pellet - Casca de Arroz	3.500	8,00%	11500000	10	10	10		4	7,5	8	9	9	9	
Pellet - Bagaço de Cana	3.480	15,00%	450000000	10	10	10		2	2,5	10	9	9	9	
Pellet - Madeira	4.648	7,20%	36000000	10	10	10		8	7,5	10	9	9	9	
Pellet - Casca de Café	3.700	12,00%	2500000	5	10	10		4	5	4	5	9	9	
Serragem	3.500	20,00%	36000000	10	10	10		4	0	10	9	9	9	
Bagaço de Mandioca (Farinhão)	3.808	0,00%	26000000	10	5	10		4	10	8	9	5	9	
Pesos							39		6	4	8	9	7	5
Casca da Semente de Algodão	3,08%	5,13%	8,21%	20,77%	16,15%	11,54%	64,87%	12	20	32	81	63	45	
Casca de Amendoim	3,08%	5,13%	4,10%	20,77%	8,97%	11,54%	53,59%	12	20	16	81	35	45	
Casca de Arroz	3,08%	5,13%	16,41%	20,77%	16,15%	11,54%	73,08%	12	20	64	81	63	45	
Casca do Coco de Babaçu - Epicarpo	15,38%	5,13%	4,10%	11,54%	16,15%	11,54%	63,85%	60	20	16	45	63	45	
Casca do Coco de Babaçu - Mescocarpo	6,15%	2,56%	4,10%	11,54%	16,15%	11,54%	52,05%	24	10	16	45	63	45	
Casca do Coco de Babaçu - Endocarpo	15,38%	5,13%	4,10%	11,54%	16,15%	11,54%	63,85%	60	20	16	45	63	45	
Casca do Coco de Babaçu - Amêndoas	15,38%	10,26%	4,10%	11,54%	16,15%	11,54%	68,97%	60	40	16	45	63	45	
Casca de Café	6,15%	5,13%	8,21%	11,54%	16,15%	11,54%	58,72%	24	20	32	45	63	45	
Bagaço de Cana	6,15%	5,13%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	80,26%	24	20	80	81	63	45	
Palha de Cana	9,23%	7,69%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	85,90%	36	30	80	81	63	45	
Capim Elefante	3,08%	0,00%	10,26%	2,31%	8,97%	11,54%	36,15%	12	0	40	9	35	45	
Casca do Coco da Baía	9,23%	10,26%	8,21%	11,54%	8,97%	11,54%	59,74%	36	40	32	45	35	45	
Briquete - Casca de Arroz	6,15%	7,69%	16,41%	20,77%	16,15%	11,54%	78,72%	24	30	64	81	63	45	
Briquete - Bagaço de Cana	3,08%	2,56%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	74,62%	12	10	80	81	63	45	
Briquete - Madeira	12,31%	7,69%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	88,97%	48	30	80	81	63	45	
Briquete - Casca de Algodão	9,23%	5,13%	8,21%	20,77%	16,15%	11,54%	71,03%	36	20	32	81	63	45	
Briquete - Casca de Feijão	9,23%	5,13%	8,21%	2,31%	1,79%	11,54%	38,21%	36	20	32	9	7	45	
Cavaco	6,15%	5,13%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	80,26%	24	20	80	81	63	45	
Lenha	6,15%	5,13%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	80,26%	24	20	80	81	63	45	
Pellet - Casca de Arroz	6,15%	7,69%	16,41%	20,77%	16,15%	11,54%	78,72%	24	30	64	81	63	45	
Pellet - Bagaço de Cana	3,08%	2,56%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	74,62%	12	10	80	81	63	45	
Pellet - Madeira	12,31%	7,69%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	88,97%	48	30	80	81	63	45	
Pellet - Casca de Café	6,15%	5,13%	8,21%	11,54%	16,15%	11,54%	58,72%	24	20	32	45	63	45	
Serragem	6,15%	0,00%	20,51%	20,77%	16,15%	11,54%	75,13%	24	0	80	81	63	45	
Bagaço de Mandioca (Farinhão)	6,15%	10,26%	16,41%	20,77%	8,97%	11,54%	74,10%	24	40	64	81	35	45	

Sendo assim, a partir desta tabela comparativa se pode estabelecer uma classificação entre as biomassas. Este ranking está explicitado na Tabela 5. Os insumos destacados em verde ocupam as nove primeiras colocações:

Tabela 5 – Classificação dos insumos baseado na matriz de decisão

Biomassa	Ranking
Casca da Semente de Algodão	16º
Casca de Amendoim	22º
Casca de Arroz	13º
Casca do Coco de Babaçu – Epicarpo	17º
Casca do Coco de Babaçu - Mesocarpo	23º
Casca do Coco de Babaçu - Endocarpo	17º
Casca do Coco de Babaçu – Amêndoas	15º
Casca de Café	20º
Bagaço de Cana	4º
Palha de Cana	3º
Capim Elefante	25º
Casca do Coco da Baia	19º
Briquete - Casca de Arroz	7º
Briquete - Bagaço de Cana	10º
Briquete – Madeira	1º
Briquete - Casca de Algodão	14º
Briquete - Casca de Feijão	24º
Cavaco	4º
Lenha	4º
Pellet - Casca de Arroz	7º
Pellet - Bagaço de Cana	10º
Pellet – Madeira	1º
Pellet - Casca de Café	20º
Serragem	9º
Bagaço de Mandioca (Farinhão)	12º

4.3. Caldeiras

4.3.1. Análise de Dados

Na *Ilustração 6*, pode-se observar a relação entre os tipos mais destacados de caldeiras perante algumas de suas características, como:

- Possibilidade de utilização de diversos tipos de biomassas com PCIs distintos;
- Tolerância a umidade dos insumos;
- Tolerância ao uso de fontes de biomassa que possuem índices relativamente elevados;
- Nível atual de utilização do tipo de caldeira pelo mercado consumidor;
- Tamanho da área que deverá ser disponibilizada para instalação do sistema com tal tipo de caldeira;
- a capacidade de geração de energia que cada caldeira possui;

- Possibilidade de se trabalhar com pressões de trabalho elevadas;
- Possibilidade de gastos reduzidos ao se promover a manutenção de cada tipo de caldeira.

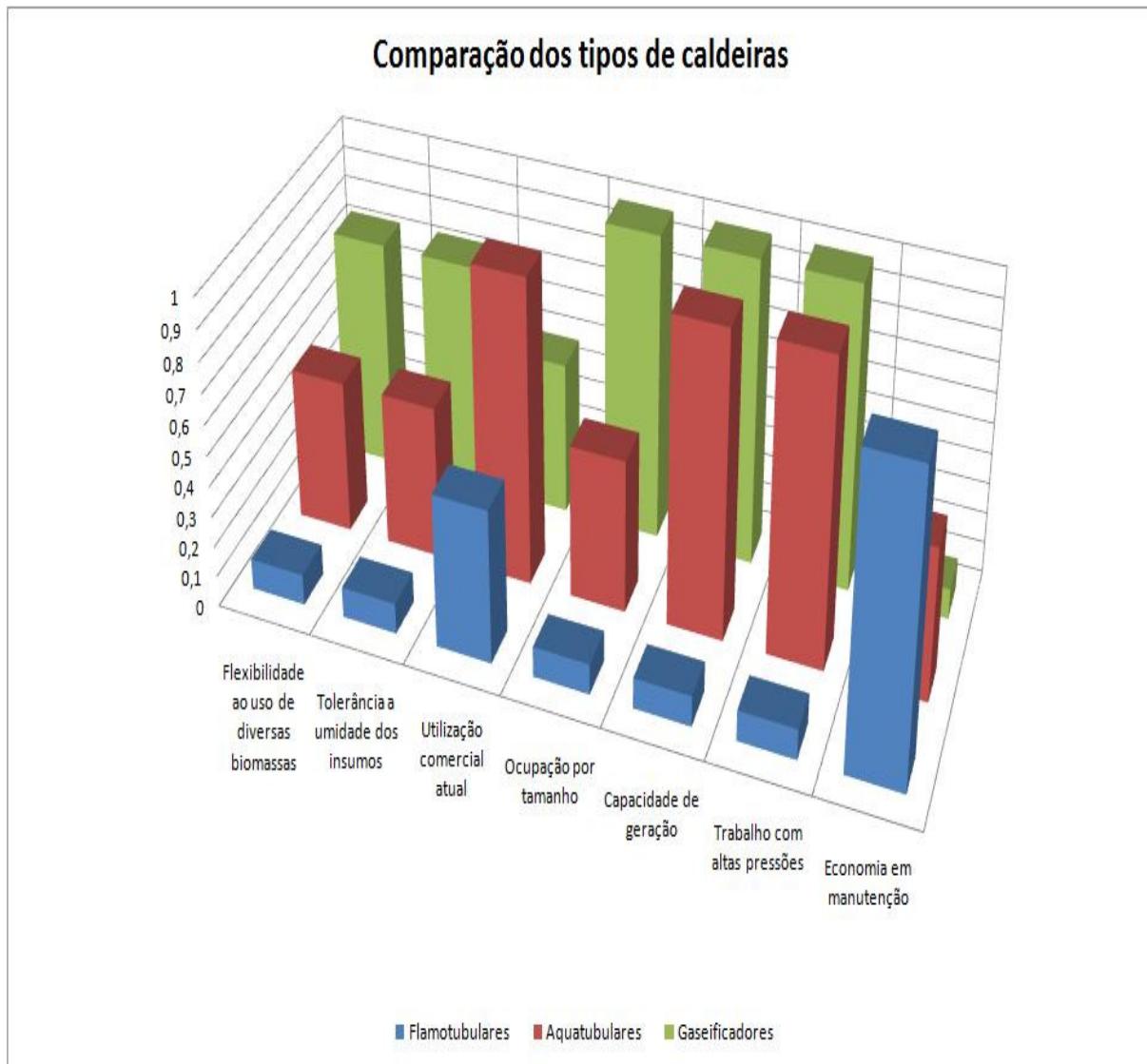


Ilustração 6 – Relação dos tipos de caldeiras com sete critérios comparativos

4.3.2. Elaboração das Formulações

Para a análise das caldeiras pelo método da Lógica Fuzzy, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- Flexibilidade ao uso de diversos tipos de insumos.

- Tolerância a diversas faixas de porcentagem de umidade dos insumos.
- Atual utilização pelo mercado.
- Tamanho ocupado.
- Capacidade de geração de vapor.
- Possibilidade de trabalho a altas pressões.

$F(BIO, U, MC, TAM, W, P, \$)$ é a função que rege a análise das caldeiras, em que:

- BIO Flexibilidade ao uso de diversas biomassas
(Alta, média, baixa e quase nula)
- U Tolerância à umidade dos insumos
(Alta, média, baixa e quase nula)
- MC Utilização comercial
(Alta, média, baixa e quase nula)
- TAM Ocupação por tamanho
(Grande, média, pequena e relativamente ínfima)
- W Capacidade de geração
(Alta, média, baixa e relativamente insignificante)
- P Trabalho com altas pressões
(Possibilidade alta, média, baixa e quase nula)
- \\$ Economia em manutenção
(Alta, média, baixa e relativamente ínfima)

$A = (\mu_{BIO}, \mu_U, \mu_{MC}, \mu_{TAM}, \mu_W, \mu_P, \mu_{\$})$: $U \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os critérios analisados para caldeiras

$B = (P_{BIO}, P_U, P_{MC}, P_{TAM}, P_W, P_P, P_{\$})$: $U \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os pesos dos critérios analisados para caldeiras

$$|A| = \sum \mu_A , \quad |B| = \sum P_B \quad \text{e} \quad |N1| = \sum [\mu_A * (10^* P_B)]$$

em que $|A|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto A

em que $|B|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto B

Assim, pode-se construir a matriz de decisão com base na fórmula:

$$T1 = |N1| / (10^*|B|)$$

4.3.3. Estabelecimento de Notas

Com a finalidade de se estabelecer notas quantitativas aos valores qualitativos normalizados em cada critério, foi considerada a relação de acordo com a *Tabela 6*.

Tabela 6 – Tabela com a relação entre os critérios qualitativos e suas referentes notas

Flexibilidade ao uso de biomassas	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Quase Nula	0.1

Tolerância à umidade	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Quase Nula	0.1

Utilização comercial	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Quase Nula	0.1

Capacidade de Geração	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Relativamente Insignificantes	0.1

Trabalho com altas pressões	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Quase Nula	0.1

Economia em Manutenção	
Qualificação	NOTAS
Alta	1
Média	0.75
Baixa	0.5
Relativamente Ínfima	0.1

4.3.4. Matriz de Decisão

A Tabela 7 apresenta as caldeiras com os valores e suas conversões. Os valores em verde são os valores finais para cada tipo de biomassa. O ranking aparece destacado com a numeração em vermelho:

Tabela 7 – Classificação das caldeiras com relação à matriz de decisão

	Flamotubulares	Aquatubulares	Gaseificadores	Pesos	Flamo.	Aqua.	Gaseif.
Flexibilidade ao uso de diversas biomassas	0,1	0,5	0,75	10	1	5	7,5
Tolerância a umidade dos insumos	0,1	0,5	0,75	6	0,6	3	4,5
Utilização comercial atual	0,5	1	0,5	7	3,5	7	3,5
Ocupação por tamanho	0,1	0,5	1	2	0,2	1	2
Capacidade de geração	0,1	1	1	9	0,9	9	9
Trabalho com altas pressões	0,1	1	1	4	0,4	4	4
Economia em manutenção	1	0,5	0,1	8	8	4	0,8
TIPO DE CALDEIRA	Flamotubulares	Aquatubulares	Gaseificadores	46	14,6	33	31,3
RANKING	3º	1º	2º		31,74%	71,74%	68,04%

Assim, pudemos obter uma ordem classificatória para as caldeiras, porém estas ainda seguem classificadas genericamente. Na tabela 8, é considerada as subdivisões de Aquatubulares, Gaseificadores e Flamotubulares:

Tabela 8 – Classificação das caldeiras considerando as subdivisões

Biomassa	Ranking Geral	Tipos específicos	Ranking Específico
Aquatubulares	1º	Leito Movente Contracorrente	1º
		Leito Fluidizado Circulante	2º
		Leito Fluidizado Borbulhante	3º
		Leito Movente Co-corrente	4º
Gaseificadores	2º	Gaseificadores	5º
Flamotubulares	3º	Horizontais Cornualha	6º
		Horizontais Lancashire	7º
		À vapor	8º
		Multitubulares de fornalha externa Locomotivas	9º
		Verticais	10º
		Multitubulares de fornalha externa Escocesas	11º

4.4. Esteiras Transportadoras

Para o caso das esteiras transportadoras foram analisados os critérios que se aplicam mais adequadamente ao processo de queima de biomassa para geração de vapor. Sendo assim, foram analisados pontos em que se poderia ter alguma relação entre transporte de insumos e seus possíveis formatos, pesos, medidas, entre outras características que provocassem alguma alteração nas espécies disponíveis de esteiras para utilização. Para tanto foi usada a lógica Fuzzy para mensuração e parametrização de dados, como:

- “alta capacidade de carga”,
- “dimensões limitadas”,
- “manutenção complexa”, entre outros.

Estes conceitos subjetivos puderam ser parametrizados para posterior comparação através dos conjuntos Fuzzy.

4.4.1. Elaboração das Formulações

Para a análise das esteiras transportadoras também será utilizada a Lógica Fuzzy, uma vez que seus critérios são difusos, comparativamente.

Então foram colocados pesos e notas relativas aos seguintes parâmetros de conjuntos Fuzzy:

- Flexibilidade das dimensões das esteiras.
- Flexibilidade da possível carga a ser suportada.
- Flexibilidade de extensão do comprimento.
- Flexibilidade ao uso de diversos tipos de biomassa.
- Intervalo de tempo em que é necessária manutenção na esteira.
- Possibilidade de transferência perpendicular na esteira.
- Versatilidade na implantação de layouts.
- Facilidade na montagem da esteira.

$F(FD, FP, FE, FBI, MNT, TP, LAY, MTG)$ é a função que rege a análise das esteiras, em que:

- FD Flexibilidade de dimensões
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- FP Flexibilidade ao peso suportado
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- FE Flexibilidade de extensão
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- FBI Flexibilidade ao uso de diversas biomassas
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- MNT Taxa de manutenção
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- TP Permissão à transferência perpendicular
(Muito simples, simples, média, difícil e muito difícil)
- LAY Versatilidade de layouts
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)
- MTG Facilidade de montagem
(Muito alta, alta, média, baixa e muito baixa)

$E = (\mu_{FD}, \mu_{FP}, \mu_{FE}, \mu_{FBI}, \mu_{MNT}, \mu_{TP}, \mu_{LAY}, \mu_{MTG})$: $\mathbf{U} \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os critérios analisados para esteiras

$F = (P_{FD}, P_{FP}, P_{FE}, P_{FBI}, P_{MNT}, P_{TP}, P_{LAY}, P_{MTG})$: $\mathbf{U} \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os pesos dos critérios analisados para esteiras

$$|E| = \sum \mu_E, |F| = \sum P_F \quad \text{e} \quad |N3| = \sum [(5 * \mu_E) * (5 * P_F)]$$

em que $|E|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto E

em que $|F|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto F

Assim, pode-se construir a matriz de decisão com base na fórmula:

$$T3 = |N3| / (5 * |F|)$$

4.4.2. Estabelecimento de Notas

Com a finalidade de se estabelecer notas quantitativas aos valores qualitativos normalizados em cada critério, foi considerada a relação de acordo com os quadros da tabela 9.

Tabela 9 – Tabela dos quadros comparativos entre os critérios qualitativos e suas referentes notas

Flexibilidade de dimensões	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Flexibilidade ao peso	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Flexibilidade de extensão	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Flexibilidade ao uso de biomassas	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Taxa de manutenção	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Permissão à transferência perpendicular	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Versatilidade de layouts	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

Facilidade de montagem	
Qualificação	NOTAS
Muito Alta	5
Alta	4
Média	3
Baixa	2
Muito Baixa	1

4.4.3. Matriz de Decisão

Então, foi estabelecido o quadro da *Tabela 10* para comparação através da Lógica Fuzzy. Em verde está destacada a pontuação final de cada esteira, enquanto em laranja está destacado o ranking das esteiras:

Tabela 10 – Matriz de decisão e classificação correspondente aos oito critérios comparativos

	Ranking	Flexibilidade de Dimensões	Flexibilidade de Peso	Flexibilidade de extensão	Flexibilidade aos tipos de biomassas	Taxa de Manutenção	Permite transferência perpendicular	Versatilidade de layouts	Facilidade de Montagem		
TRANSPORTADOR DE CORREIA		4	4	4	5	4	3	2	4		
TRANSPORTADORES A AR	1	1	5	1	2	5	5	5	1		
TRANSPORTADOR DE ROLETES	3	5	4	3	5	4	3	4			
TRANSPORTADOR DE CORRENTES	3	3	3	3	2	2	3	3			
TRANSPORTADOR MODULAR FLEXÍVEL	2	2	4	3	2	5	5	2			
Transportador Cadeias Vibratórias	4	5	3	5	5	1	1	5			
Transportador Helicoidal	3	3	4	3	4	1	1	5			
Transportador Palmeiro/Acémulo	1	2	3	2	1	5	4	1			
PESOS	3	5	3	5	4	2	1	3	26	130	
TRANSPORTADOR DE CORREIA	2º	12	20	12	25	16	6	2	12	105	80,77%
TRANSPORTADORES A AR	7º	3	5	15	5	8	10	5	3	54	41,54%
TRANSPORTADOR DE ROLETES	3º	9	25	12	15	20	8	3	12	104	80,00%
TRANSPORTADOR DE CORRENTES	5º	9	15	9	15	8	4	3	9	72	55,38%
TRANSPORTADOR MODULAR FLEXÍVEL	5º	6	10	12	15	8	10	5	6	72	55,38%
Transportador Cadeias Vibratórias	1º	12	25	9	25	20	2	1	15	109	83,85%
Transportador Helicoidal	4º	9	15	12	15	16	2	1	15	85	65,38%
Transportador Palmeiro/Acémulo	8º	3	10	9	10	4	10	4	3	53	40,77%

4.5. Estados Brasileiros

4.5.1. Análises de Dados

Para o estudo sobre cada estado do país com relação às biomassas, foram estabelecidos critérios quantitativos, como número de biomassas por estado. Porém também foi utilizada a Lógica Fuzzy a fim de mensurar quantidades de biomassa em cada região. Uma estimativa caso a caso para biomassas foi estabelecida mediante critérios comparativos entre os estados, fazendo com que cada insumo tivesse uma abordagem diferente em relação às quantidades. Entretanto, na base comparativa, os modelos Fuzzy permitiram uma análise embasada

em fundamentos previamente elaborados. Assim, a *Tabela 11* compara os estados pelas biomassas encontradas:

Tabela 11 – Distribuição das biomassas pelos estados e suas intensidades de disponibilidade

Biomassas	UF - 1	UF - 2	UF - 3	UF - 4	UF - 5	UF - 6	UF - 7	UF - 8	UF - 9	UF - 10	UF - 11	UF - 12	UF - 13	UF - 14	UF - 15	UF - 16	UF - 17	UF - 18	UF - 19	UF - 20	UF - 21	UF - 22	UF - 23	UF - 24	UF - 25	UF - 26	UF - 27	
Algodão	BA	MT	GO	SP																								
Amendoim	SP	PR	MG	GO	MT	PE	BA																					
Arroz	RS	SC	PA	MT	TO	MS	SP	GO	MA																			
Babaçu	MA	PI																										
Café	SP	MG	RJ	ES	BA	PR	RO	AM	PA	MT	MS																	
Cana	SP	MT	MS	GO	PR	MG	RJ	ES	SE	AL	PE	PB	RN	BA	MA													
Capim Elefante																												
	Menos SUL e Amazônia																											
Coco	BA	CE	ES	PA	RN	PB	PE	RJ	AL	SE	SP																	
Feijão	SP	GO	MG	PR	BA	CE	PE	SE	AL	PB	SC	RO	MT	MS	RS	RN	RJ	ES	PI	PA	MA	TO						
Carvão Vegetal	MA	MG	BA	MA	SP	ES	RJ	PR	GO																			
Mandioca	MA	PR	BA	PA	SE	MA	CE	AC	AM	RN	ES	RO	AL	PE	PB	PI	SP	RN	SC	RS	GO	MG	TO	AP	RR	MT	RJ	
Madeira-Lenha	SP	PR	SC	RS	MG	GO	MS	RJ	ES	BA	SE	MT	PA															

4.5.2. Elaboração de Formulações

É importante salientar que foi utilizada a Lógica Fuzzy para determinar que as disponibilidades fossem comparativamente distribuídas em alta (explicitado em verde), média (explicitado em amarelo) e baixa (explicitado em vermelho). Assim sendo, pôde-se encontrar pesos e notas que quantificaram uma análise que anteriormente se mostrava em critérios qualitativos:

$F(NB, AD, MD, BD)$ é a função que rege a análise dos estados, em que:

- NB Número de biomassas por estado
- AD Número de biomassas com alta disponibilidade
(Valores superiores a 30% da produção total do insumo no país)
- MD Número de biomassas com média disponibilidade
(Valores entre 10% e 30% da produção total do insumo no país)
- BD Número de biomassas com baixa disponibilidade
(Valores entre 2% e 10% da produção total do insumo no país)

$G = (NB, AD, MD, BD)$: $U \rightarrow R$ são os números referentes às quantidades de biomassas existentes no estado, tanto em geral, quanto em alta, média e baixa disponibilidade

$H = (P_{NB}, P_{AD}, P_{MD}, P_{BD})$: $U \rightarrow [0,1]$ é o grau de pertinência de todos os pesos dos critérios analisados para esteiras

$$|H| = \sum P_H \quad \text{e} \quad |N4| = \sum [G * (3*P_H)]$$

em que $|H|$ é a cardinalidade Fuzzy do conjunto H

Assim, pode-se construir a matriz de decisão com base na fórmula:

$$T4 = |N4|$$

4.5.3. Estabelecimento de Notas

Com a finalidade de se estabelecer notas quantitativas aos valores qualitativos normalizados em cada critério, foi considerada a relação por meio da *Tabela 12*.

Tabela 12 – Tabela comparativa entre os critérios qualitativos e suas referentes notas

Número de biomassas		
Qualificação	NOTAS	
Próprios valores	Sem notas	

Número de biomassas com alta disponibilidade		
Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS
30%	Valores superiores a % de produção no país	Sem notas

Número de biomassas com média disponibilidade		
Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS
10% e 30%	Valores entre % de produção no país	Sem notas

Número de biomassas com baixa disponibilidade		
Faixa de Valores	Qualificação	NOTAS
2% e 10%	Valores entre % de produção no país	Sem notas

4.5.4. Matriz de Decisão

Como já esclarecido anteriormente, foi feita uma análise sobre os estados que resultou na *Tabela 13*.

Tabela 13 – Matriz de decisão e sua classificação correspondente aos critérios abordados

Estados	Nº de biomassas por estado	Nº de biomassas em alta disponibilidade		Nº de biomassas em média disponibilidade		Nº de biomassas em baixa disponibilidade		FINAL	Ranking
		Nº de biomassas	Nº de biomassas	Nº de biomassas	Nº de biomassas	Avaliação	Avaliação		
Acre	1	1	0	0	3	0	0	5	24º
Alagoas	5	3	2	0	9	4	0	23	14º
Amapá	1	0	0	1	0	0	1	3	25º
Amazonas	2	1	0	1	3	0	1	8	23º
Bahia	10	6	3	1	18	6	1	45	2º
Ceará	4	3	1	0	9	2	0	19	17º
Espírito Santo	8	5	3	0	15	6	0	37	3º
Goiás	8	2	3	3	6	6	3	31	9º
Maranhão	7	3	2	2	9	4	2	29	10º
Mato Grosso	9	2	2	5	6	4	5	33	7º
Mato Grosso do Sul	8	4	2	2	12	4	2	34	6º
Minas Gerais	8	5	3	0	15	6	0	37	3º
Pará	6	2	0	4	6	0	4	22	15º
Paraíba	5	4	1	0	12	2	0	24	13º
Paraná	8	5	2	1	15	4	1	36	5º
Pernambuco	6	4	1	1	12	2	1	27	11º
Piauí	4	0	4	0	0	8	0	16	20º
Rio de Janeiro	8	3	3	2	9	6	2	33	7º
Rio Grande do Norte	5	2	3	0	6	6	0	22	15º
Rio Grande do Sul	4	2	2	0	6	4	0	18	18º
Rondônia	3	2	1	0	6	2	0	14	21º
Roraima	1	0	0	1	0	0	1	3	25º
Santa Catarina	4	2	2	0	6	4	0	18	18º
São Paulo	11	5	3	3	15	6	3	46	1º
Sergipe	6	3	2	1	9	4	1	26	12º
Tocantins	4	0	2	2	0	4	2	14	21º
PESOS	2	3	2	1					

4.6. Sazonalidade dos Insumos

4.6.1. Análise de Dados

Assim como o estudo sobre os estados pôde ser quantitativo, a sazonalidade dos insumos também se reflete como uma variável mensurável, tendo em vista que quanto maior o período de disponibilidade no ano para determinado insumo, maior será sua pontuação na comparação com os outros tipos. Estes dados sofrem algumas alterações dependendo da região. Sendo assim, tomamos por base a sazonalidade mais rústica para que não causasse qualquer detimento nas informações concedidas em âmbito nacional. A *Tabela 14* indica a sazonalidade dos insumos mais importantes. Para aqueles insumos em que a sazonalidade não interfere, foi colocado um traço denotando assim sua ausência ou mesmo um pequeno impacto na análise:

Tabela 14 – Sazonalidade das biomassas em períodos e quantidades de meses ao ano

Biomassa	Meses	Quantidade por ano
Algodão	Mar à Ago	6 meses ao ano
Amendoim	Fev à Set	8 meses ao ano
Arroz	Fev à Jun	5 meses ao ano
Babaçu	Jul à Jan	7 meses ao ano
Café	Mai à Fev	10 meses ao ano
Cana	Abr à Nov	8 meses ao ano
Capim Elefante	-	Não possui sazonalidade
Coco	Nov à Jan	3 meses ao ano
Feijão	-	Não possui sazonalidade
Carvão Vegetal	-	Não possui sazonalidade
Mandioca	Mai à Ago	4 meses ao ano
Madeira	Ago à Dez	5 meses ao ano

4.6.2. Elaboração de Formulações

Novamente, como também demonstrado anteriormente, foi feita uma análise sobre a sazonalidade dos insumos. Como em toda sua extensão a sazonalidade se mostra um critério quantitativo, não foram estabelecidos pesos e notas, mas sim foi executada apenas uma leitura dos períodos em que se dispunha dos diversos tipos de insumos.

$F(M)$ é a função que rege a análise da sazonalidade dos insumos, em que:

- M Quantidade de meses por ano em que a biomassa se encontra significativamente disponível ao mercado consumidor

$J = (M)$: $\mathbf{U} \rightarrow \mathbf{R}$ são os meses em que a biomassa se encontra com significativa disponibilidade

Se $M =$ “Não possui sazonalidade”

$$J(M) = J_{\text{MÁX}}$$

Senão, quanto maior for o M , melhor será a colocação no ranking

Assim, pode-se construir a matriz de decisão com base na fórmula:

$$T5 = J$$

4.6.3. Estabelecimento de Notas

Com a finalidade de se estabelecer notas quantitativas aos valores qualitativos normalizados em cada critério, foi considerada a relação por meio da *Tabela 15*.

Tabela 15 – Tabela comparativa entre critério qualitativo e sua referente nota

Qtde de meses em que há produção significativa	
Qualificação	NOTAS
Própios valores	Sem notas

4.6.4. Matriz de Decisão

Após os cálculos, foi elaborada uma matriz de decisão com base nos critério, pesos e notas estabelecidos, de acordo com a *Tabela 16*.

Tabela 16 – Classificação correspondente à matriz de decisão da sazonalidade

Biomassa	Meses	Quantidade por ano	Ranking
Algodão	Mar à Ago	6 meses ao ano	8º
Amendoim	Fev à Set	8 meses ao ano	5º
Arroz	Fev à Jun	5 meses ao ano	9º
Babaçu	Jul à Jan	7 meses ao ano	7º
Café	Mai à Fev	10 meses ao ano	4º
Cana	Abr à Nov	8 meses ao ano	5º
Capim Elefante	-	Não possui sazonalidade	1º
Coco	Nov à Jan	3 meses ao ano	12º
Feijão	-	Não possui sazonalidade	1º
Carvão Vegetal	-	Não possui sazonalidade	1º
Mandioca	Mai à Ago	4 meses ao ano	11º
Madeira	Ago à Dez	5 meses ao ano	9º

5. Ferramenta Computacional

5.1. Aplicativo

Para a seleção de uma ferramenta de software para desenvolver o SAD em questão utilizou-se como critérios:

- Facilidade de acesso a banco de dados relacional a partir de queries.
- Acessibilidade a partir de qualquer terminal com servidor de internet.
- Facilidade de comunicação entre arquivos e segurança de acesso aos dados.

Considerando estes requisitos, comparando os atuais softwares disponíveis no mercado, optamos pelo Visual Studio 2008, plataforma que é de fácil manuseio e que realiza a comunicação entre diferentes arquivos de forma fácil e segura.

5.2. Desenvolvimento do banco de dados

Primeiramente organizou-se os dados levantados durante a pesquisa em um banco de dados relacional. No presente caso utilizou-se o próprio Access. A *Ilustração 7* foi desenvolvida para que mostrasse o inter-relacionamento entre as tabelas do banco de dados.

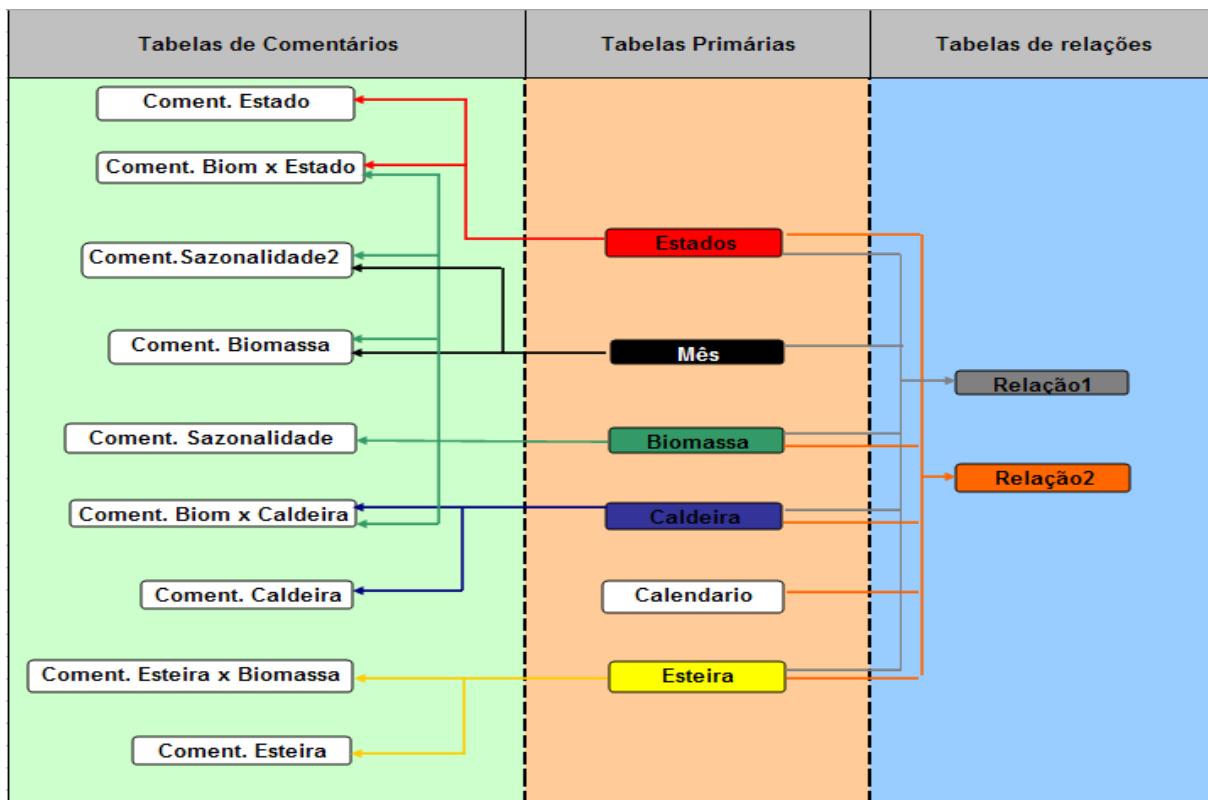


Ilustração 7 – Inter-relação entre as tabelas que compõem o banco de dados

As tabelas primárias formam a base de preenchimento dos Drop Lists presente na plataforma. Já as tabelas comentário são utilizadas para o preenchimento dos Box Lists com informações importantes sobre o item selecionado em cada Drop List.

A Ilustração 8, exemplifica um exemplo de Caso de Uso do aplicativo.

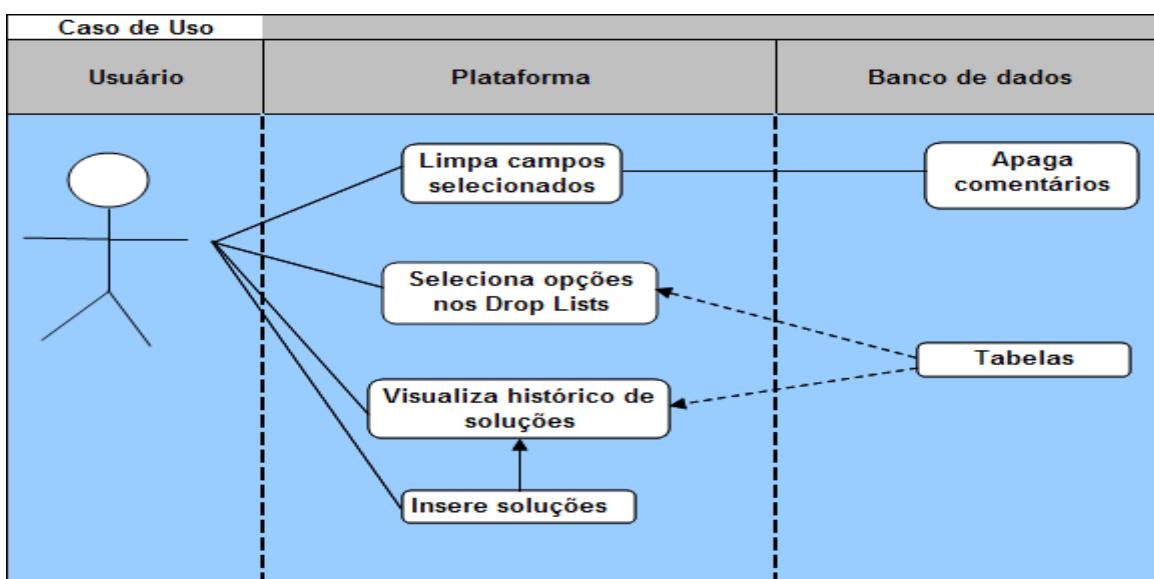


Ilustração 8 – Diagrama de Casos de Uso

5.3. Plataforma

Conforme citado anteriormente, o aplicativo implementado, foi desenvolvido em linguagem VB.NET, através do programa Visual Studio 2008.

Esse aplicativo desenvolvido auxilia o usuário na sua tomada de decisão, de duas formas:

- Uma primeira pesquisa é realizada tomando-se por base a região que o usuário deseja realizar sua pesquisa, selecionando-se um Estado como base. Assim que o Estado é selecionado, comentários pertinentes são carregados ao lado, e uma lista com todas as biomassas em potencial naquele Estado, aparecerá para que o usuário escolha uma. Após sua seleção, comentários aparecerão ao lado, da mesma forma que no Estado. A partir disso, listas serão disponibilizadas contendo informações sobre tipos de Esteira e Caldeira. Da mesma forma que com Estados e Biomassas, comentários surgirão depois de selecionada uma esteira e uma caldeira.
- A segunda pesquisa é feita selecionando-se o mês de interesse. A partir dessa seleção, carrega-se uma lista contendo todas as biomassas em potencial referentes àquele mês selecionado. Selecionando-se uma biomassa, uma lista contendo todos os Estados nos quais essa biomassa é produzida aparecerá. Como dito anteriormente, uma lista de esteiras e caldeiras que podem ser utilizadas para aquela biomassa aparecerão também. Por fim, comentários aparecerão ao lado de cada seleção.

Existem três botões no rodapé de cada caso. Um botão de Limpar Campos, que limpa toda a seleção feita pelo usuário, limpando também, os comentários que apareceram durante a seleção. Outro botão que exibe o histórico das soluções já escolhidas pelo usuário, o “histórico de soluções”, e um último que insere a solução escolhida, o “Insere Solução”. Solução essa inserida apenas depois de todos os campos terem sido selecionados.

6. Observações Finais

6.1. Conclusão

O presente trabalho apresenta uma ferramenta inédita para auxiliar no processo de geração de vapor.

A utilização de um modelo formal baseado em Lógica Fuzzy permitiu uma análise quantitativa objetiva fundamental para nortear um processo de decisão.

Por exemplo, com a nossa ferramenta é possível diagnosticar equivalências entre diferentes soluções, o que permite maior flexibilidade para o usuário escolher a que melhor lhe convier.

Em relação à atualidade, têm surgido novas vertentes para a geração de energia que buscam a utilização de recursos renováveis e que tenham a possibilidade de reduzir o impacto ambiental.

A abordagem feita neste trabalho mostra uma gama de opções para a geração de vapor através da queima de biomassas. Foram analisados diversos tipos de insumos com inúmeras características diferentes. Entretanto, através de um estabelecimento de critérios, pesos, classificações e notas, gerando-se modelos baseados em Lógica Fuzzy, foi possível mensurar classificações a cada biomassa para uma posterior análise comparativa.

Também foram estabelecidos tais méritos às caldeiras, esteiras, estados e sazonalidade com a finalidade de se obter uma gama de soluções baseada em rankings que mostrassem escolhas que poderiam ser estabelecidas e implantadas em cada caso.

A análise mostra que as diferenças encontradas entre as caldeiras variaram minimamente entre os tipos aquatubulares (71,74%) e gaseificadores (68,04%). Já as flamotubulares (31,74%) tiveram uma média significativamente inferior aos outros dois tipos. É importante salientar que os gaseificadores ainda estão em pleno avanço tecnológico e que as caldeiras flamotubulares são os métodos mais antigos com avanço tecnológico relativamente reduzido.

Para o caso da comparação entre as biomassas, o destaque se deu por conta de insumos que possuem como matéria-prima a Madeira, a Cana-de-açúcar e o Arroz, que ocuparam as dez primeiras posições do ranking.

Entre as esteiras transportadoras, os tipos de transportadores por roletes ocuparam a terceira colocação com 80,00% de aproveitamento nos quesitos comparados pelos critérios estabelecidos aplicando-se Lógica Fuzzy. Os transportadores por correias se classificaram em segundo lugar com 80,77% de aproveitamento, sendo que o primeiro lugar ficou com o sistema que se utiliza de calhas vibratórias para o transporte, tendo 83,85% de aproveitamento.

Nos estados brasileiros, para os quesitos de disponibilidade, tanto em quantidades quanto em variedades, os melhores colocados foram São Paulo (46 pontos), com a primeira colocação, Bahia (45 pontos) com a segunda colocação e Espírito Santo (37 pontos) e Minas Gerais (37 pontos) empatados na terceira colocação.

É de extrema importância salientar que a lógica Fuzzy permitiu modelar tanto a quantidade representativa de biomassa, quanto a variedade da mesma em uma determinada região, fazendo assim com que sejam levados em consideração critérios preponderantes às análises de geração de vapor.

Para a sazonalidade dos insumos, as biomassas que mais se destacaram foram as que não possuem sazonalidade, ou ainda não representam significativa queda de produção no ano. Capim Elefante, Feijão e Carvão Vegetal mostraram certo equilíbrio ao longo do período analisado. Dentre as biomassas que possuem sazonalidade, o Café, a Cana e o Amendoim se destacaram, pois estavam presentes em mais de oito meses no ano com produção significativa.

As análises se mostraram dentro do esperado, pois as melhores soluções estão dentro das melhores práticas utilizadas nos dias de hoje, tanto no âmbito das biomassas quanto no das caldeiras, das esteiras e dos equipamentos auxiliares utilizados.

Para se elaborar as soluções foram interligados os diversos rankings de todas as variáveis, fazendo com que todas as combinações possíveis e aceitáveis fisicamente fossem contempladas, tendo assim um robusto banco de dados, versátil para auxiliar o usuário.

Porém, todos os resultados mostram que ocorre uma gama de soluções possíveis para a análise em cada caso, precisando-se assim especificar exatamente as condições regionais, econômicas e a pré-existência de alguma utilização de qualquer tecnologia de queima de biomassa para geração de energia.

6.2. Trabalhos Futuros

Para que o aplicativo tornar-se mais flexível e capaz de englobar um maior número de variáveis, deixamos aqui alguns tópicos à serem desenvolvidos para trabalhos futuros:

- Desenvolver, com alunos da Matemática, uma nova plataforma de Software integrada a diversos servidores de dados para manter a base de dados atualizada;
- Criar uma estrutura de SAD aberta que permita propor novos modelos matemáticos para dar suporte ao processo de tomada à decisão;
- Geração de um Datawarehouse para futura mineração de dados que possa orientar as necessidades regionais por fontes alternativas de energia;

Este é um caminho para que esta seja uma ferramenta capaz de contribuir para o aprimoramento da matriz energética nacional.

Referências

CEPA. Energia da Biomassa. Disponível em:

<<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1B/ebiomassa.html>>. Acesso em 20 mar. 2009.

MACEDO, ISAIAS C.. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos: <www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf>. Acesso em: 20 de mar. 2009.

TEIXEIRA, MARCOS ALEXANDRE. Biomassa de Babaçu no Brasil. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0081.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2009.

VALE, AILTON TEIXEIRA DO. Departamento de ciências Florestais – UFLA. Disponível em:

<<http://www.dcf.ufla.br/cerne/Revistav13n4-2007/010%20Artigo%20471.pdf>>.

Acesso em 25 mar. 2009.

MAZZARELLA, VICENTE N. G.. Revista Opiniões. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=245>>. Acesso em 25 mar. 2009.

SBRT. Produção de carvão vegetal utilizando-se fibra de coco. Disponível em:<<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt3942.pdf?PHPSESSID=d097bdcc43119ebb52e4788418008c>>. Acesso em 15 abr. 2009.

EMBRAPA. Semente de algodão: Fonte de riqueza industrial. Disponível em: <<http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/cba6/palestras/1504.pdf>>. Acesso em 15 abr. 2009.

GONÇALES, JOAQUIM C.. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café. Disponível em:

<<http://www.dcf.ufla.br/cerne/Revistav13n4-2007/010%20Artigo%20471.pdf>>.

Acesso em 20 abr. 2009.

RIPOLI, MARCO L. C.. Palha de cana de açúcar: ensaio padronizado de recolhimento por enfardamento cilíndrico. Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/CD_REVISTA_ENERGIA.vol9/vol22n12007/artigos/Marco%20Lorenzzo%20Cunali%20Ripoli.pdf>. Acesso em 20 abr. 2009.

SBRT. Geradores de vapor e caldeiras à vapor. Disponível em: <<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt6890.pdf?PHPSESSID=88b1b4d2cd3443f5ba7c6b29362aed16>>. Acesso em 10 mai. 2009.

LAMEGO, ALBERTO R.. Comparação de tecnologias existentes no Brasil e no Exterior. Disponível em: <http://web0.cefetcampos.br/observatorioambiental/publicacoes-cientificas/artigos-sobre-biocombustiveis-energia-renovaveis-e-indicadores-ambientais/estado%20da%20arte_gaseificacao.zip/view>. Acesso em 10 mai. 2009.

LORA, ELECTO E. S.. Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/position_paper_painel3_electo.pdf>. Acesso em 13 mai. 2009.

KINTO, OSCAR T.. Energia de Gaseificação de Biomassa como opção Energética de Desenvolvimento Limpo. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0097.pdf>>. Acesso em 17 mai. 2009.

STEAMMASTER. Steammaster: Indústria de caldeiras. Disponível em: <<http://www.steammaster.com.br/index.php?pagina=downloads&idioma=port>>. Acesso em 1 jun. 2009.

PEREZ, JUAN M. M.. Tecnologia de Leito Fluidizado para Pirólise Rápida de Biomassa Vegetal. Disponível em: <<http://146.164.33.61/termo/Orientacao/Gaseificacao/0058.pdf>>. Acesso em 10 jun. 2009.

PUC. O Conceito “Fuzzy”. Disponível em: <<http://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm>>. Acesso em 27 nov. 2009.

IME, USP. Introdução à Lógica Fuzzy. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~tonelli/verao-fuzzy/notasdeaula.php>>. Acesso em 27 nov. 2009.

SYSTEMBELT. Informações sobre transportadores industriais. Disponível em: <<http://www.systembelt.com.br/>>. Acesso em 11 nov. 2009.

SEE, Sistemas. Informações sobre produtos de transportes. Disponível em: <<http://www.seesistemas.com.br/?gclid=COiUseeVzp4CFYce7godk3EgrA>>. Acesso em 12 nov. 2009.

AGROCONSULT. Acompanhamentos das Produções da Agricultura. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/images/MAPA/arquivos_portal/ACOMPANHAMENTO_OUTUBRO_2009.pdf>. Acesso em 10 nov. 2009.

SERMANTEC. LTDA, Sermatec Indústrias e Montagens. Equipamentos - Caldeiras de Leito Fluidizado. Disponível em: <<http://www.sermatec.com.br/por/equipamentos.php?pag=ZXF1aXBhbWVudG9z>>. Acesso em 7 jun. 2009.

UNIMEP. Sistema de apoio à Decisão. Disponível em: <http://www.unimep.br/~aeasilva/topicos7_SI.pdf>. Acesso em 2 dez. 2009.

PIURCOSKY, FABRICIO P.. Sistemas de apoio à Decisão. Disponível em: <http://fabricio.unis.edu.br/SI/Sistemas_Apoio_Decis%C3%A3o.ppt#256,1,Sistemas_de_Apoio_%C3%A0_Decis%C3%A3o>. Acesso em 2 dez. 2009.

Winston, W.L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. International Thomson Publishing, Belmont, California, 1994

Anexo A - Levantamento dos dados

Para a realização desse trabalho, foram buscadas as formas existentes de biomassas nas diferentes regiões do Brasil. Para tanto, um leque bastante amplo de biomassas foram avaliadas levando-se em conta o poder calorífico, quantidade de produção, capacidade de produção atual, e projeção de produção futura, bem como a viabilidade de se comprar de forma sustentável tal biomassa, chegando-se a um cenário por região geográfica no Brasil.

Avaliação das Biomassas existentes no Brasil

Primeiramente, fizemos um levantamento das possíveis biomassas existentes, um *longlist*, passíveis de análise, e posteriormente um *shortlist*, onde foram analisadas de fato as biomassas, para que finalmente fossem avaliadas uma a uma e chegar a uma decisão de qual biomassa é a mais vantajosa.

Tabela 17 - Levantamento das possíveis biomassas existentes no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Biomassa		
Bagaço da Azeitona	Casca de Amendoim	Estilha e Resíduos Florestais
Bagaço da Laranja	Casca de Arroz	Lenha
Bagaço da mandioca	Casca de Café	Licor Negro
Bagaço de Abacaxi	Casca de Castanha do Pará	Lixo Urbano
Bagaço de Cajú	Casca de Coco de Babaçu	Nó de Pinho
Bagaço de Cana de Açúcar	Casca de Girassol	Óleo de Mamona
Biogás	Casca de palma (Dendê)	Palha de Cana de Açúcar
Borra de Café	Casca de Pinha	Palha de milho
Briquete	Casca de Soja	Pellets
Capim Elefante	Casca de Coco da Bahia	Pó de Cortiça
Caroço de Açaí	Casca do Cacau	Postes de Madeira
Carvão de Babaçu	Casca do Feijão	Resíduos de Cerveja
Carvão Vegetal	Cavaco	Sabugo de Milho
Casca da Semente de Algodão	Compensado de Madeira	Serragem

Detalhamento das biomassas

Devido à falta de informações, nem todas as biomassas listadas anteriormente puderam ser analisadas, conforme será mostrado a seguir. Porém, os dados coletados já são de extrema importância para uma avaliação do atual cenário brasileiro em relação à produção de biomassas.

Arroz

A matéria-prima arroz tem como sua possível biomassa a sua casca. Sua produção é concentrada na região sul do país, se destacando o estado do Rio Grande do Sul com 60% da produção brasileira. O restante é distribuído por todas as regiões, destacando-se a região centro-oeste.

Sua produção é de 11,5 milhões de toneladas ao ano, sendo seu Poder Calorífico Inferior (PCI) de 3.450 kcal/kg.

O mercado fornecedor para esse tipo de biomassa já se encontra bem desenvolvido, com fornecedores que já vendem ou utilizam a casca de arroz para utilização em caldeiras. Já existem alguns (poucos) fornecedores que comercializam briquetes de casca de arroz.

A *Figura 1* mostra a distribuição da produção de arroz pelo Brasil, indicando uma forte concentração na região sul, no estado do Rio Grande do Sul.



Figura 1 - Distribuição da produção de arroz no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Açaí

A matéria-prima açaí tem como uma possível biomassa o seu caroço. Com uma produção concentrada no nordeste do estado do Pará, a viabilização dessa biomassa seria restrita a essa região, uma vez que o transporte para o mercado consumidor, com um potencial de demanda energética maior, como o caso da região sudeste, acarretaria num aumento de preço.

Sua produção é de 100 mil toneladas ao ano, distribuídas junto às áreas produtoras como junto aos fabricantes de polpa, sendo seu PCI de 4.500 kcal/kg.

Alguns fornecedores já vendem o insumo para ração animal e adubos, porém, de maneira não estruturada, especialmente no caso dos produtores originais.

A *Figura 2* mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 2 - Distribuição da produção de açaí no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Algodão arbóreo

A matéria-prima algodão tem como uma possível biomassa a casca de sua semente. Sua produção é concentrada na região Nordeste, sendo 72% da mesma, localizada no estado da Paraíba.

Sua produção anual é de 675 toneladas, sendo seu PCI de 3.000 kcal/kg, porém, a sua produção é decrescente e vem perdendo espaço para o herbáceo, sendo esta uma tendência de mercado. Os volumes de algodão arbóreo tendem a ser cada vez menores.

O problema encontrado para a viabilização da produção dessa biomassa em escala industrial é que o acesso aos seus fornecedores é muito difícil,

e suas informações são restritas.

A *Figura 3* mostra a região de concentração da sua produção.

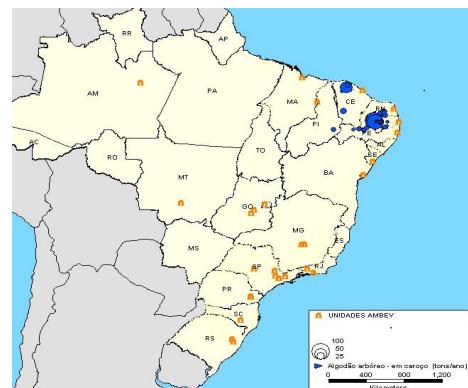


Figura 3 - Distribuição da produção de algodão arbóreo no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de

Algodão herbáceo

A matéria-prima algodão herbáceo tem como uma possível biomassa a casca de sua semente. Sua produção é altamente concentrada nas regiões centro-oeste e nordeste e pulverizada na região sudeste. Os estados que merecem destaque são o Mato Grosso, com 50% da produção, e a Bahia, com 28%.

Atualmente, algumas algodoeiras já estão utilizando nas suas próprias caldeiras, mas há excedente que é comercializado, sendo sua produção de 2,9 milhões de toneladas ao ano e seu PCI de 3.000 kcal/kg.

A logística seria meio difícil de ser implantada, uma vez que sua produção se encontra muito localizada no estado da Bahia e espalhada nas outras regiões, com exceção do estado de Mato Grosso, devido à elevada produção encontrada e sua distribuição dentro do estado.

A Figura 4 mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 4 - Distribuição da produção de algodão herbáceo no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa,

Amendoim

A matéria-prima amendoim tem como uma possível biomassa a sua casca. Sua produção é altamente concentrada na região sudeste, com grande predomínio no estado de São Paulo, com uma produção de 82% no oeste do estado.

Sua disponibilidade está junto às cooperativas que beneficiam o amendoim para fornecer às fábricas de alimentos da região.

Alguns fornecedores já utilizam a casca do amendoim para mercados consumidores como granjas ou em caldeiras próprias, contudo ainda há sobra de material na região. Sua produção é de 250 mil toneladas ao ano e seu PCI é de 3.100 kcal/kg. A Figura 5 mostra a região de concentração da sua produção.

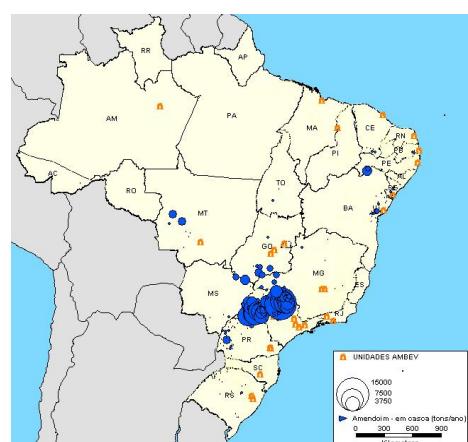


Figura 5 - Distribuição da produção de amendoim no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Abacaxi

A matéria-prima abacaxi tem como uma possível biomassa seu bagaço. Sua produção é bem dispersa, com um total de 1,7 bilhões de frutos – 2,38 milhões de toneladas ao ano, com predomínios no estado de Tocantins e Paraíba, com 20% da produção nacional cada e um PCI de 3.300 kcal/kg.

Parte do mercado, principalmente através das indústrias de polpa, já comercializa o bagaço de abacaxi como insumo para produção de ração animal. Porém, os fornecedores de uma forma geral não fazem o processo de secagem, o que pode ser um entrave para a produção em larga escala, uma vez que é necessária sua secagem para o uso como biomassa, o que aumentaria o custo de sua produção.

A *Figura 6* mostra a região de concentração da sua produção.

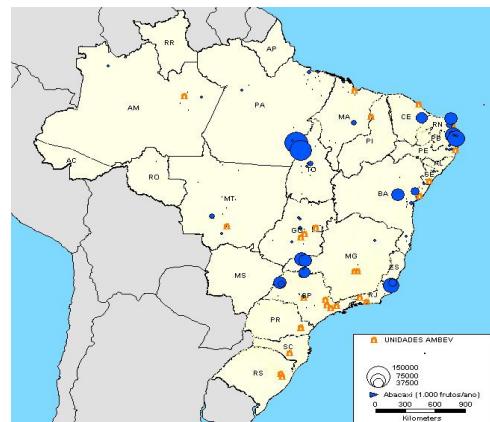


Figura 6 - Distribuição da produção de abacaxi no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Babaçu

A matéria-prima babaçu tem como possíveis biomassas o seu carvão e a casca do coco do babaçu. Sua produção é extremamente concentrada no estado do Maranhão, com uma produção de 117 mil toneladas ao ano, com um PCI de 5136 kcal/kg. Apresenta elevada disponibilidade, uma vez que o foco dos produtores é na amêndoia, sendo que a casca é considerada um “resíduo” da produção. No caso do carvão de babaçu, sua produção está legalmente proibida no Brasil.

O problema desse tipo de produção se encontra na sua forma, que é de produção familiar, o que dificultaria a logística de obtenção desses insumos.

A *Figura 7* mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 7 - Distribuição da produção de babaçu no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Cacau

A matéria-prima cacau tem como uma possível biomassa a sua casca. Sua produção é concentrada na região nordeste. Porém, regiões como a norte e a sudeste também apresentam produção. Os principais destaques são o estado da Bahia, com 70% da produção, e o estado do Pará com 18%. Há grande disponibilidade devido ao grande descarte desse insumo, porém sua produção é pequena para utilização como biomassa. Sua produção é de 212 mil toneladas ao ano, possuindo um PCI de 3.900 kcal/kg. Sua produção se restringe a áreas de baixa demanda de energia, sendo um produto de baixa densidade e que necessita de secagem.

A Figura 8 mostra a região de concentração da sua produção.

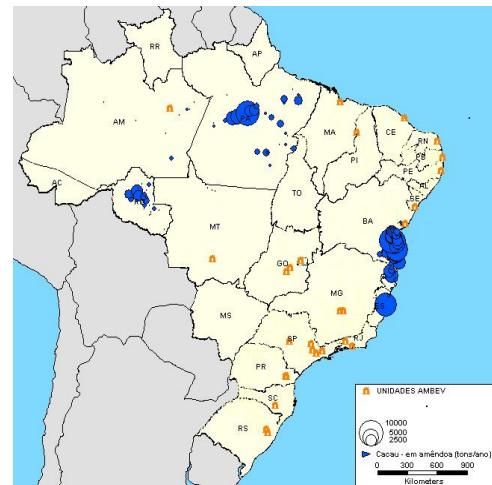


Figura 8 - Distribuição da produção de cacau no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Café

A matéria-prima café possui como uma possível biomassa sua borra e sua casca. Possui uma distribuição de produção concentrada na região sudeste, com predomínio no estado de Minas Gerais, com 50% da produção total, e alguma pequena porcentagem no estado da Bahia e na região Norte. Sua produção é de 2,5 milhões de toneladas ao ano, possuindo um PCI de 3.600 kcal/kg para a casca e de 1.570 kcal/kg para a borra.

O problema do uso da borra do café se encontra na estrutura de captação da mesma, que é inexistente, e sua produção é baixa para uso como biomassa. Já para a captação da casca, é encontrada em grande escala nas fazendas de café.

A Figura 9 mostra a região de concentração da sua produção.

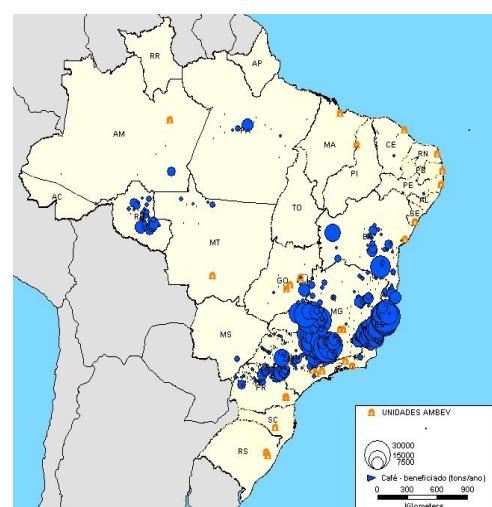


Figura 9 - Distribuição da produção de café no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Cana – de – açúcar

A matéria-prima cana-de-açúcar possui como uma possível biomassa sua palha e seu bagaço. Sua produção se concentra na região sudeste, principalmente no estado de São Paulo, com 60% da produção nacional, e no nordeste, com 15%. Sua produção anual é de 450 milhões de toneladas, com um PCI de 3.717 kcal/kg para o bagaço, e 4.020 kcal/kg para a palha.

Sua disponibilidade é elevada, com ampla oferta de bagaço, e seu mercado fornecedor já é bem desenvolvido, no estado de São Paulo e arredores.

A Figura 10 mostra a região de concentração da sua produção.

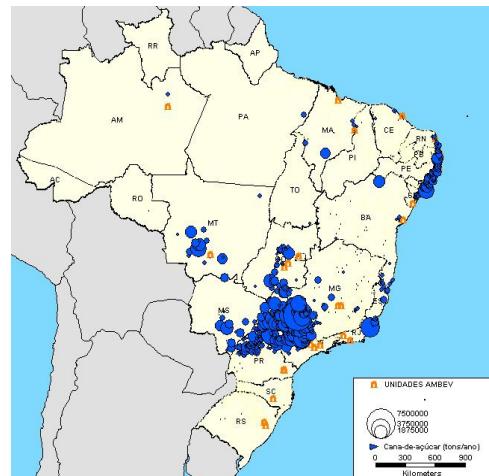


Figura 10 - Distribuição da produção de cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Madeira – Carvão Vegetal

A matéria-prima madeira possui como uma possível biomassa o carvão vegetal. Sua produção é concentrada quase que exclusivamente no estado de Minas Gerais, com 76% da produção do país. Sua disponibilidade não é muito elevada, uma vez que sua produção é quase que exclusivamente das siderurgias, que utilizam sua total produção para consumo próprio. Logo, o mercado fornecedor se restringe aos pequenos produtores. Tal matéria-prima tem uma produção anual de 2,6 toneladas de carvão vegetal, possuindo um PCI de 6.174 kcal/kg.

A Figura 11 mostra a região de concentração da sua produção.

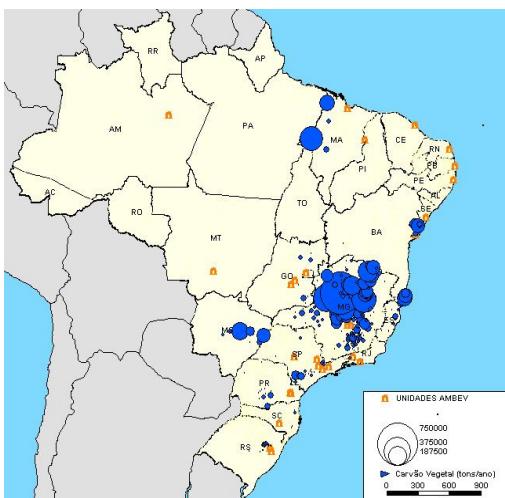


Figura 11 - Distribuição da produção de madeira-carvão vegetal no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Caju

A matéria-prima caju tem como uma possível biomassa seu bagaço. Sua produção anual de 250 mil toneladas, com um PCI de 4.700 kcal/kg, se restringe à região Nordeste, com predomínio na produção do Ceará com 53% da produção total. Hoje em dia, tal insumo é utilizado principalmente para ração animal. Tal insumo se concentra nas indústrias de polpa, porém, como precisa fazer uma secagem para uso como biomassa, seu preço final pode ser muito elevado, inviabilizando seu uso.

A Figura 12 mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 12 - Distribuição da produção de caju no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Castanha do Pará

A matéria-prima é a castanha do Pará, apresenta como biomassa em potencial a sua casca. Sua produção concentrada no Norte do país, com destaque para o estado do Acre e o Amazonas, apresenta disponibilidade difusa, e seu mercado fornecedor é nada profissionalizado e pouco desenvolvido. Sua produção anual é de 28 mil toneladas, com um elevado PCI de 5.500 kcal/kg.

A Figura 13 mostra a região de concentração da sua produção.

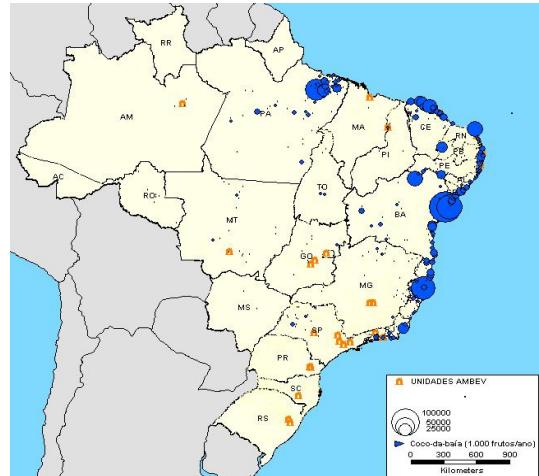


Figura 13 - Distribuição da produção de castanha do pará no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Côco da Bahia

A matéria-prima coco da Bahia tem como biomassa em potencial a sua casca. Sua produção é pulverizada, tendo um predomínio na região nordeste, com destaque para a Bahia, com 32% da produção nacional. Sua produção é de 2 bilhões de frutos anual, numa estimativa de 4 milhões de toneladas, com um PCI de 4.200 kcal/kg. Há pouca disponibilidade, uma vez que as indústrias já utilizam em caldeira própria ou utilizam para a fabricação de fibras, porém ainda existem empresas que possuem o insumo e eventualmente podem comercializá-lo.

A Figura 14 mostra a região de concentração da sua produção.



Feijão

A matéria-prima feijão tem como uma possível biomassa a sua casca. Sua produção é totalmente dispersa, tendo um destaque para o estado da Bahia e de Minas Gerais, com 10 e 13% respectivamente. Sua produção é de 3,5 milhões de toneladas anualmente, com um PCI de 2.800 kcal/kg. O mercado fornecedor está disperso nas fazendas onde são produzidos os feijões. Na colheita com maquinário, a casca é jogada no chão como adubo. Portanto, o mercado não está acostumado a negociar este produto como biomassa.

A Figura 16 mostra a região de concentração da sua produção.

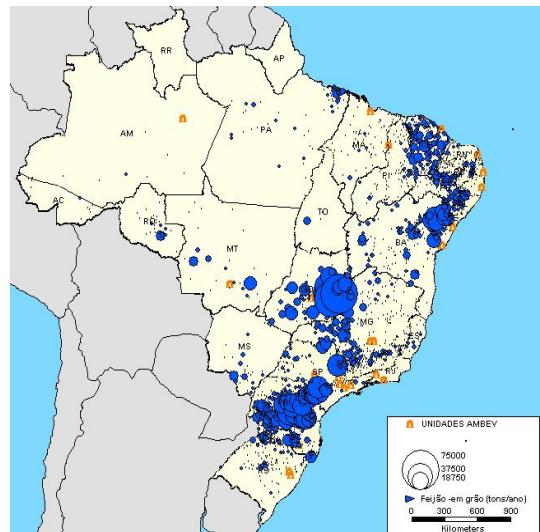


Figura 16 - Distribuição da produção de feijão no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de

Girassol

A matéria-prima girassol tem como uma possível biomassa sua casca. Sua produção é de 87 mil toneladas anualmente. Há grande produção nos estados do centro-oeste e sul do país, com destaque para o estado do Rio Grande do Sul com 34%, 33% no Mato Grosso e 33% em Mato Grosso do Sul, Paraná e Goiás. Possui um PCI de 4.300 kcal/kg. Seu mercado consumidor é bem desenvolvido, principalmente para ração animal, mas não há produção em larga escala para uso como biomassa.

A Figura 17 mostra a região de concentração da sua produção.

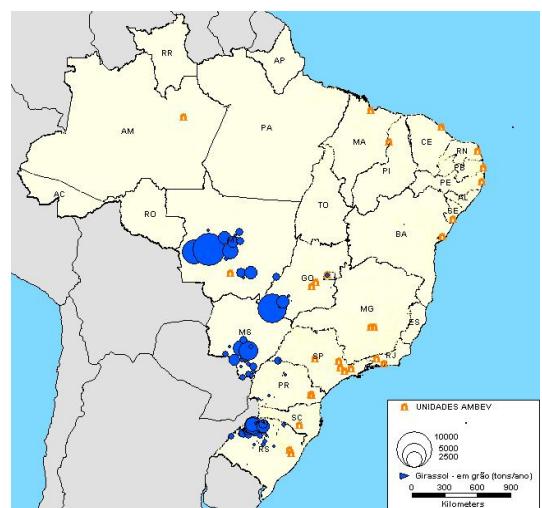


Figura 17 - Distribuição da produção de girassol no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Laranja

A matéria-prima laranja tem como biomassa em potencial o seu bagaço. Com uma produção de 18 milhões de toneladas, concentrada principalmente na região oeste do estado de São Paulo, com 80% da produção, não possui entraves logísticos por estar perto das principais rodovias do estado. Seu PCI é desconhecido e seu mercado fornecedor prefere vender bagaço para servir como ração animal, pois seus preços estão muito atrativos para a indústria (R\$500/ton).

A Figura 18 mostra a região de concentração da sua produção.

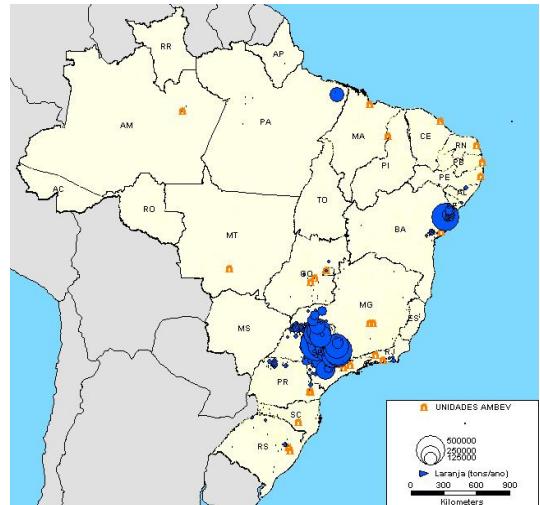


Figura 18 - Distribuição da produção de laranja no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Madeira

A matéria-prima madeira tem como biomassa em potencial a lenha. Sua produção é concentrada na região sul e sudeste do país, com 85% da produção compreendida entre Rio Grande do Sul e São Paulo. Possui uma produção de 36 milhões de toneladas de lenha, anualmente, com um PCI entre 3.700 e 4.200 kcal/kg, dependendo do tipo de lenha.

Existe grande disponibilidade de lenha no sul do país e sudeste. A legislação para utilização de lenha está cada vez mais restringindo o mercado, sendo esta uma forte barreira ao uso de lenha. Possui grande mercado fornecedor.

A Figura 19 mostra a região de concentração da sua produção.

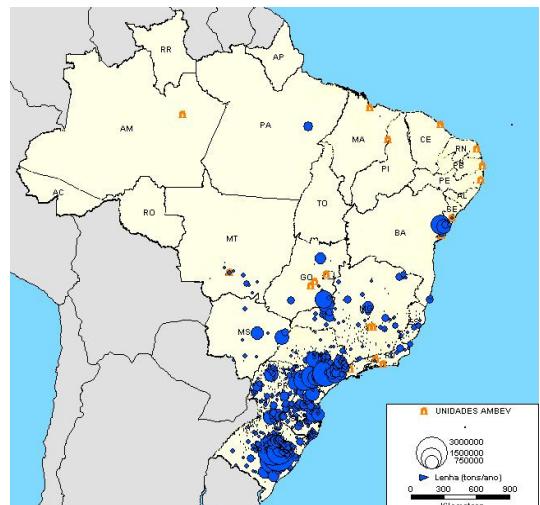


Figura 19 - Distribuição da produção de madeira no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Mamona

A matéria-prima mamona tem como biomassa em potencial seu óleo. Com uma produção de 95 mil toneladas ao ano, concentrada principalmente no estado da Bahia, com 72% da produção nacional, sua disponibilidade encontra-se nas indústrias de óleo de mamona, possuindo um mercado fornecedor em desenvolvimento, utilizando o óleo como biodiesel. Possui PCI elevado de 8.946 kcal/kg.

A Figura 20 mostra a região de concentração da sua produção.

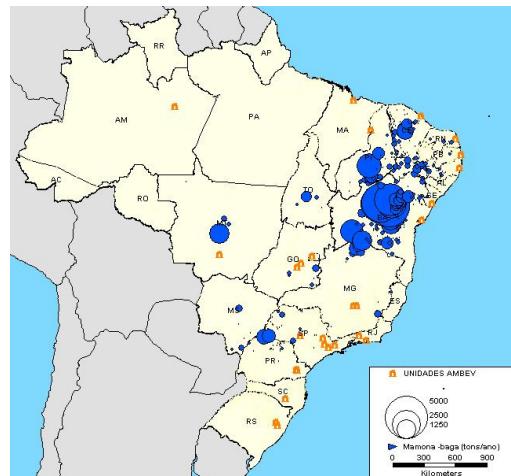


Figura 20 - Distribuição da produção de mamona no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Mandioca

A matéria-prima mandioca tem como possível biomassa seu bagaço. Sua produção é pulverizada, sendo 20% no Pará e 17% na BA, com 26 milhões de toneladas ao ano, com um PCI de 3.800 kcal/kg. O mercado trata do bagaço como um subproduto. Portanto, há disponibilidade em quantidade suficientes em certas regiões do país e, também, prefere-se vender o bagaço da mandioca para servir como ração.

A Figura 21 mostra a região de concentração da sua produção.

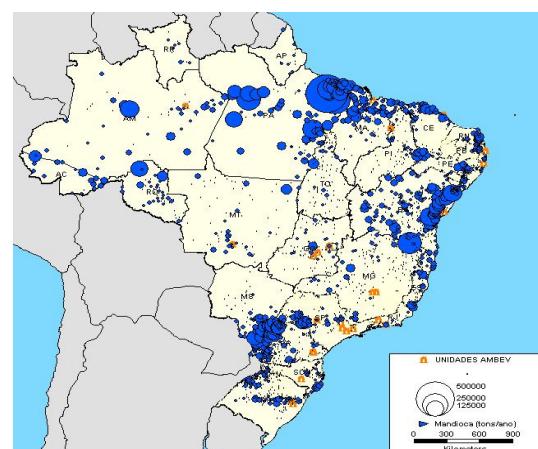


Figura 21 - Distribuição da produção de mandioca no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Milho

A matéria-prima milho tem como biomassa em potencial a palha e o sabugo. Sua produção é pulverizada no país, tendo uma concentração de 66% de Minas Gerais ao Rio Grande do Sul. Possui uma produção anual de 43 milhões de toneladas, com um PCI de 3.400 kcal/kg para a palha e de 1.250 kcal/kg para o sabugo. Não há uma característica homogênea no mercado para a sua disponibilidade, nem possui uma concentração regional. No mercado fornecedor, há empresas que não comercializam, outras vendem para ração animal, outras usam como biomassa para utilização própria, mas há também quem venda.

A Figura 22 mostra a região de concentração da sua produção.

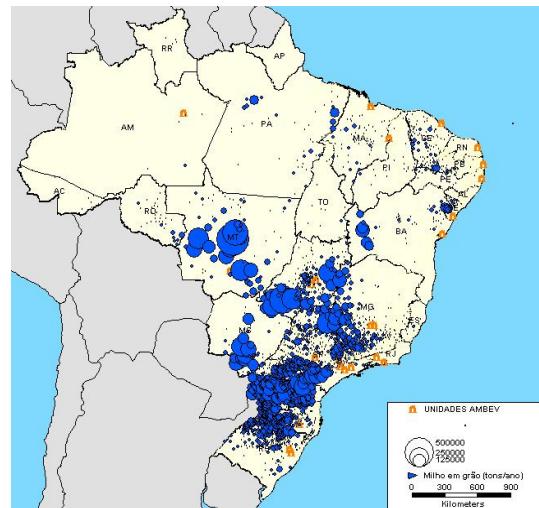


Figura 22 - Distribuição da produção de milho no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Pinhão

A matéria-prima pinhão tem como uma possível biomassa a sua casca. Com uma produção de 5 mil toneladas ao ano, distribuída no sul do país, com 83% em Santa Catarina e no Paraná, a produção de pinhão, além de ser muito pequena, é vendida praticamente na sua totalidade com a casca, e seu mercado fornecedor não é conhecido para casca de pinhão. Sua casca possui um PCI desconhecido.

A Figura 23 mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 23 - Distribuição da produção de pinhão no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Soja

A matéria-prima soja possui como biomassa possível a sua casca. Sua produção de 53 milhões de toneladas, distribuída por grande parte do Brasil, têm destaque para Mato Grosso, com 30% da produção nacional, e 34% no Sul. Seu PCI é de 3.300 kcal/kg. Sua disponibilidade é alta, uma vez que a casca de soja vem sendo tratada como um subproduto do beneficiamento de soja. O mercado fornecedor a utiliza principalmente para ração animal. Seu preço médio elevado (R\$ 400/ton) inviabiliza a utilização em caldeiras.

A Figura 24 mostra a região de concentração da sua produção.

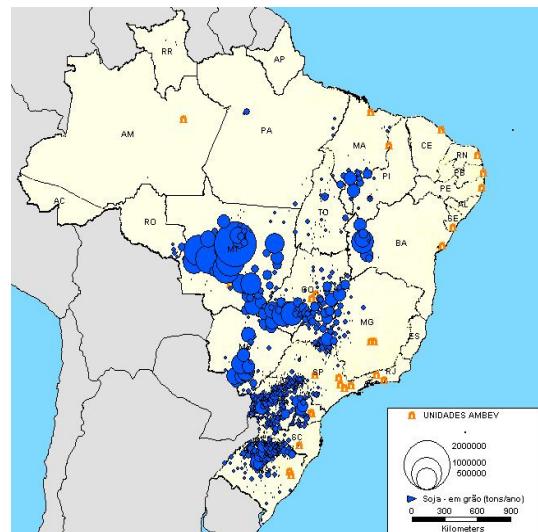


Figura 24 - Distribuição da produção de soja no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de

Azeitona

A matéria-prima azeitona tem como possível biomassa o seu bagaço. No Brasil praticamente não há produção de azeitona, sendo seu consumo quase que totalmente importado. Disponibilidade para seu aproveitamento como biomassa não há. A EMBRAPA está desenvolvendo um tipo de azeitona para ser plantada inicialmente em Minas Gerais. Em Portugal, o bagaço de azeitona vem sendo utilizado com fonte de biomassa com certo sucesso, porém, no Brasil, não há essa possibilidade. Seu PCI é de 3.900 kcal/kg.

A Figura 25 mostra a região de concentração da sua produção.



Figura 25 - Distribuição da produção de azeitona no Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Anexo B - Avaliação dos tipos de caldeiras

Caldeira é um recipiente metálico cuja função é, entre muitas, a produção de vapor através do aquecimento da água. As caldeiras em geral são empregadas para alimentar máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos através do vapor, ou calefação ambiental.

Hoje em dia, as caldeiras de uso industrial chegam a produzir dezenas de toneladas de vapor por hora, sendo o fator limitante da capacidade de produção a dimensão da unidade fabril e as propriedades metalúrgicas dos materiais utilizados.

1. Formas Construtivas

Existem diversos tipos de caldeiras, as quais podem ser classificadas segundo diversos critérios. Uma classificação genérica, agrupa essas caldeiras em flamotubulares e aquatubulares, também podendo ser analisada sua forma estrutural como caldeiras horizontais e verticais.

1.1. Caldeiras flamotubulares

As caldeiras de tubos de fogo ou tubos de fumaça, flamotubulares ou ainda gás-tubulares são aquelas em que os gases provenientes da combustão "fumos" (gases quentes e/ou gases de exaustão) atravessam a caldeira no interior de tubos que se encontram circundados por água, cedendo calor à mesma.

Pela sua própria concepção, caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis flamotubulares líquidos ou gasosos, devido à dificuldade de se instalarem grelhas para combustíveis sólidos. Normalmente são utilizadas caldeiras flamotubulares de pequeno porte quando se utiliza combustíveis sólidos, através de adaptação de grelhas.

1.1.1. Caldeiras horizontais

Esse tipo de caldeira abrange várias modalidades, desde as caldeiras cornuália e lancashire, de grande volume de água, até as modernas unidades compactas. As principais caldeiras horizontais apresentam tubulações internas, por onde passam os gases quentes. Podem ter de um a quatro tubos de fornalha. As de três e quatro são usadas na marinha.

1.1.1.1. Caldeira cornuália

Fundamentalmente, consiste em dois cilindros horizontais unidos por placas planas. Seu funcionamento é bastante simples apresentando, porém, baixo rendimento. Para uma superfície de aquecimento de 100 m² já apresenta grandes dimensões, o que provoca limitação quanto à pressão: impreterivelmente, a pressão não deve ir além de 10 kg/cm².

1.1.1.2. Caldeiras lancashire

É constituída por duas (às vezes três ou quatro) tubulações internas, alcançando superfície de aquecimento de 120 a 140 metros quadrados. Atingem até 18 kg de vapor por metro quadrado de superfície de aquecimento. Este tipo de caldeira está sendo substituída gradativamente por outros tipos.

1.1.2. Caldeiras verticais

Os tubos são colocados verticalmente num corpo cilíndrico, fechado nas extremidades por placas chamadas espelhos. A fornalha interna fica no corpo cilíndrico, logo abaixo do espelho inferior. Os gases de combustão sobem através de tubos, aquecendo e vaporizando a água que se encontra externamente aos mesmos. As fornalhas externas são utilizadas, principalmente, para combustíveis de baixo teor calorífico. Podem ser de fornalha interna ou externa.

1.1.3. Caldeiras a vapor

A água passa por um recipiente (caldeira) que é aquecido, transformando-se em vapor. Foi projetada em 1708 (séc. XVIII), por Thomas Newcomen, a fim de retirar a água depositada no interior das minas de carvão, permitindo a mineração do carvão. Foi projetada no período da Revolução Industrial.

1.1.4. Caldeiras multitubulares de fornalha externa

Em algumas caldeiras deste tipo a fornalha é constituída pela própria alvenaria, situada abaixo do corpo cilíndrico. Os gases quentes provindos da combustão entram inicialmente em contato com a base inferior do cilindro, retornando pelos tubos de fogo.

1.1.4.1. Caldeiras escocesas

Esse tipo de caldeira foi concebido para uso marítimo, por ser bastante compacta. São concepções que utilizam tubulação e tubos de menor diâmetro. Os gases quentes, oriundos da combustão verificada na fornalha interna, podem circular em 2, 3 e até 4 passes. Todos os equipamentos indispensáveis ao seu funcionamento são incorporados a uma única peça, constituindo-se assim, num todo transportável e pronto para operar de imediato. Essas caldeiras operam exclusivamente com óleo ou gás e a circulação dos gases é feita por ventiladores. Conseguem rendimentos de até 83%.

1.1.4.2. Caldeiras locomotivas e locomóveis

Como o nome sugere, caldeiras locomotivas geram vapor para movimentar a própria máquina e o restante das composições, estando praticamente fora de uso atualmente. A caldeira locomóvel é do tipo multitubular, apresentando uma dupla parede metálica, por onde circula a água do próprio corpo. São de largo emprego pela facilidade de transferência de local e por proporcionarem acionamento mecânico em lugares desprovidos de energia elétrica. São construídas para pressões de até 21kg/cm² e vapor superaquecido.

1.2. Caldeiras aquatubulares

Caldeiras aquatubulares são também chamadas caldeiras de paredes de água ou de tubos de água. São as mais comuns em se tratando de plantas termelétricas ou geração de energia elétrica em geral, exceto em unidades de pequeno porte. A pressão de trabalho de caldeiras deste tipo pode chegar a 26 MPa, ou seja, superior à pressão do ponto crítico. Neste caso, o período de ebulação (transição de líquido para vapor) passa a não existir.

Devido ao fato de uma maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de produção do outro tipo de caldeira começa a aumentar desproporcionalmente. Podem ser verticais ou horizontais.

1.2.1. Diversas tecnologias em desenvolvimento

As tecnologias apresentadas a seguir, são tecnologias que existem no mercado. Porém, estão sendo desenvolvidos projetos para melhorias e otimização das mesmas.

Antes de começarmos a mostrar os tipos em desenvolvimento, vamos primeiramente esclarecer alguns termos usados adiante.

Tais caldeiras são exemplos de caldeiras aquatubulares.

- Gás de síntese:

Mistura de gases de composição química variada (basicamente H₂ e CO), obtidos a partir da gaseificação da biomassa (natural ou previamente pirolisada), com potencial aplicação para síntese de diversos compostos químicos.

- Gaseificação:

Conversão termoquímica da biomassa, com fornecimento de oxigênio em quantidades subestequiométricas, num gás com altos teores de CO, H₂, e CH₄. A composição do gás e seu poder calorífico dependem do gás como agente de gaseificação e da pressão no reator.

- Pirólise:

Conversão termoquímica da biomassa em ausência de oxigênio. Existem três produtos: gases, líquidos e sólidos (carvão). A fração resultante de cada produto depende da temperatura e pressão no reator e do tempo de residência dos sólidos no mesmo. Desta maneira, existem diferentes tipos de processos: pirólise rápida, carvoejamento, pirólise a vácuo, etc.

1.2.2. Caldeiras de leito fixo

A gaseificação em leito fixo é uma técnica adequada para a conversão de quantidades relativamente pequenas de biomassa, a qual só se move por ação da gravidade.

Estes gaseificadores representam a maioria dos gaseificadores em operação ou em construção no mundo, em torno de 77% do total.

A *Figura 26* representa uma caldeira típica de leito fluidizado.

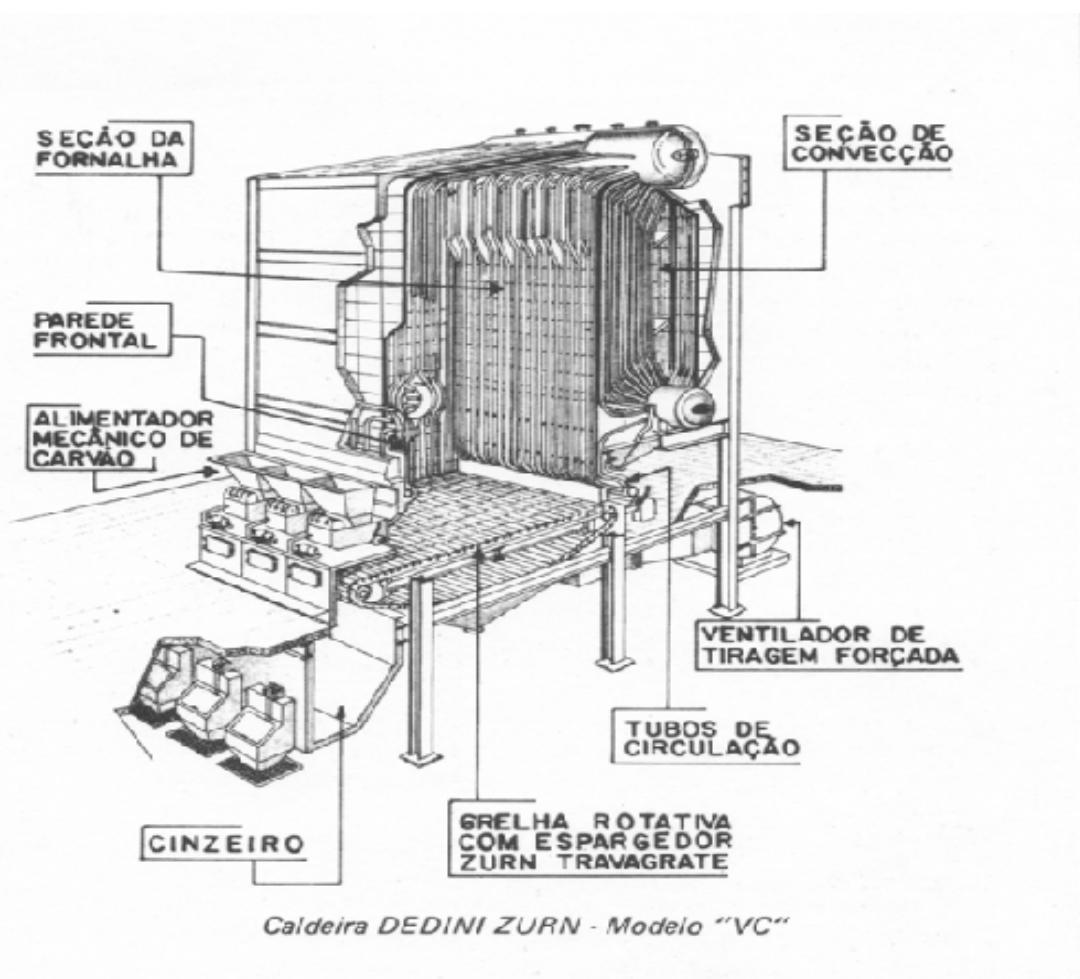


Figura 26: Caldeira típica de leito fixo Brasil (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007)

Ou esquematicamente:

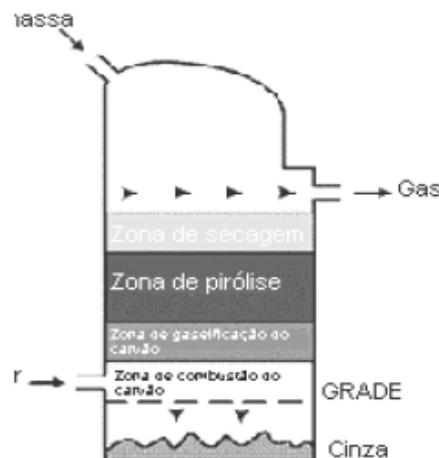


Figura 27: As diferentes zonas de uma caldeira de leito fixo. (Fonte: Energia da Gaseificação de Biomassa como opção Energética de Desenvolvimento Limpo, 2002)

Esse tipo de gaseificador apresenta duas subdivisões: os de circulação de gases contracorrente (updraft) e os de co-corrente (downdraft), conforme apresentados na seqüência.

1.2.3. Caldeiras de leito movente contracorrente

Esse tipo de caldeira é bastante utilizado, sendo um dos projetos mais antigos que utilizam carvão mineral para a geração de vapor. Hoje em dia vêm sendo utilizado para a gaseificação de Biomassas.

O nome contracorrente é devido ao seu funcionamento interno. O combustível é alimentado pelo topo da caldeira, normalmente por uma válvula rotativa ou porta de alimentação, e desce em contracorrente ao ar ou oxigênio, introduzido pela grelha, localizada na base do gaseificador, como mostra a *Figura 28*.

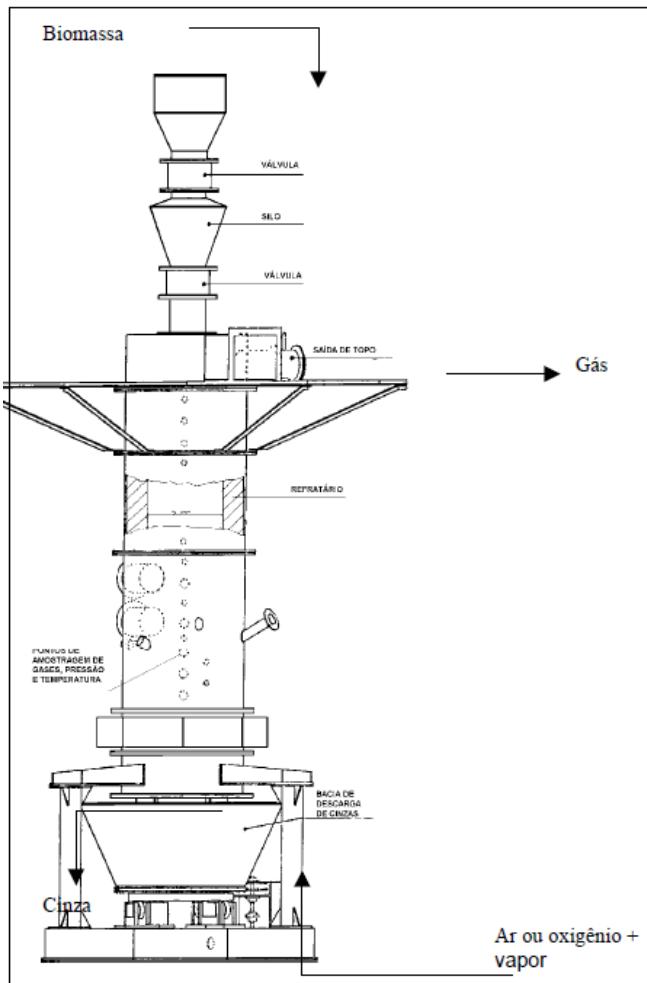


Figura 28: Caldeiras de leito movente contracorrente. (Fonte: USHIMA, 1996)

Primeiramente, o carvão vegetal, apoiado sobre a grelha, entra em combustão e produz CO_2 e H_2O a temperaturas elevadas. Conforme os gases de combustão passam pela camada descendente de coque ou carvão, são resfriados a temperaturas da ordem de 750 °C. Abaixo dessa temperatura as reações praticamente se cessam. Os gases que continuam subindo, trocam calor com a corrente de sólidos, promovendo sua pirólise, com liberação e incorporação da matéria volátil e umidade do combustível e, na seqüência, aquecimento e secagem. Os gases frios e com material incorporado, saem pelo topo do gaseificador. As cinzas do combustível saem pela base do gaseificador.

A Figura 29 representa outro modelo de caldeira desse tipo, que, por ser pressurizado, com capacidade cinco vezes

maior que um equivalente atmosférico, não é competitivo para pequenas capacidades.

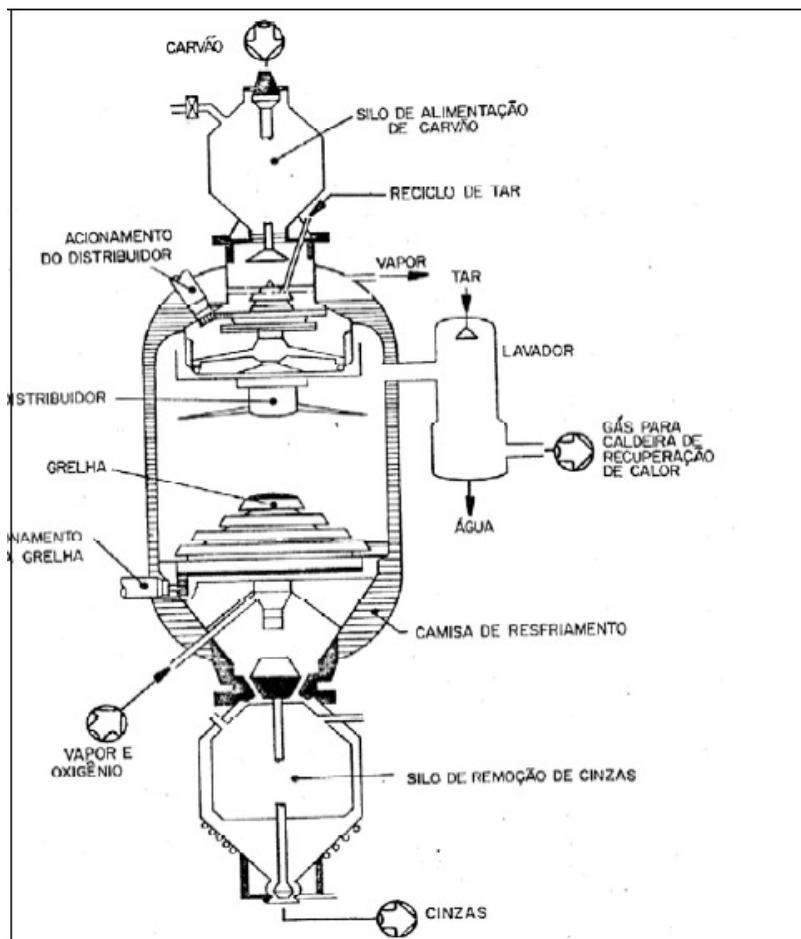


Figura 29: Caldeiras de leito movente contracorrente. (Fonte: CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Estudo da Arte, 2002)

Esse tipo de gaseificador possui como principais vantagens a sua simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico, como lodo residual do tratamento de esgoto, e, potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha, capaz de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida).

O gaseificador de contracorrente apresenta uma porcentagem muito grande de alcatrão gerado na pirólise, da ordem de 10 a 20%, que devem ser removidos no caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás. A granulometria do combustível alimentado

deve ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito, ou formação de canais preferenciais, no caso do gaseificador atmosférico, sendo estas, portanto, suas principais desvantagens.

1.2.4. Caldeiras de leito co-corrente

As caldeiras co-correntes (queima de alcatrão) são construtivamente semelhantes às caldeiras contracorrente, exceto no fato de que o ar e o gás fluem para baixo, na mesma direção que o combustível.

Esse tipo construtivo de caldeira faz com que o ar injetado no gaseificador queime até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível, daí a denominação queima de alcatrão.

A temperatura máxima, nesse tipo de caldeira, ocorre durante a fase de pirólise. Conforme a biomassa atinge uma determinada temperatura, ela começa a liberar voláteis combustíveis que, ao entrar em ignição com o ar descendente, forma uma chama em volta das partículas, que passam a queimar mais intensamente, devido às trocas de calor com a própria chama, até o esgotamento de toda a matéria volátil.

A região onde isso ocorre é denominada de região de pirólise flamejante. O material sólido, localizado logo acima desta região, sofre um pré-aquecimento e secagem, principalmente por troca de calor por radiação de pirólise flamejante. Materiais com umidade elevada, acima de 20%, apresentam dificuldade de aquecimento e secagem, devido à evaporação da água contida no interior das partículas, que retarda ou até impede a formação da região de pirólise flamejante, levando à formação de gases com alto teor de alcatrão.

Cinzas com algum carbono ainda não reagido passam através da grelha para disposição.

Nas *Figuras 30(a) e 30(b)* são mostrados gaseificadores co-correntes tipo Imbert. Apresentam uma região de

estrangulamento onde também ocorre a injeção de ar, através de bocais localizados nas paredes.

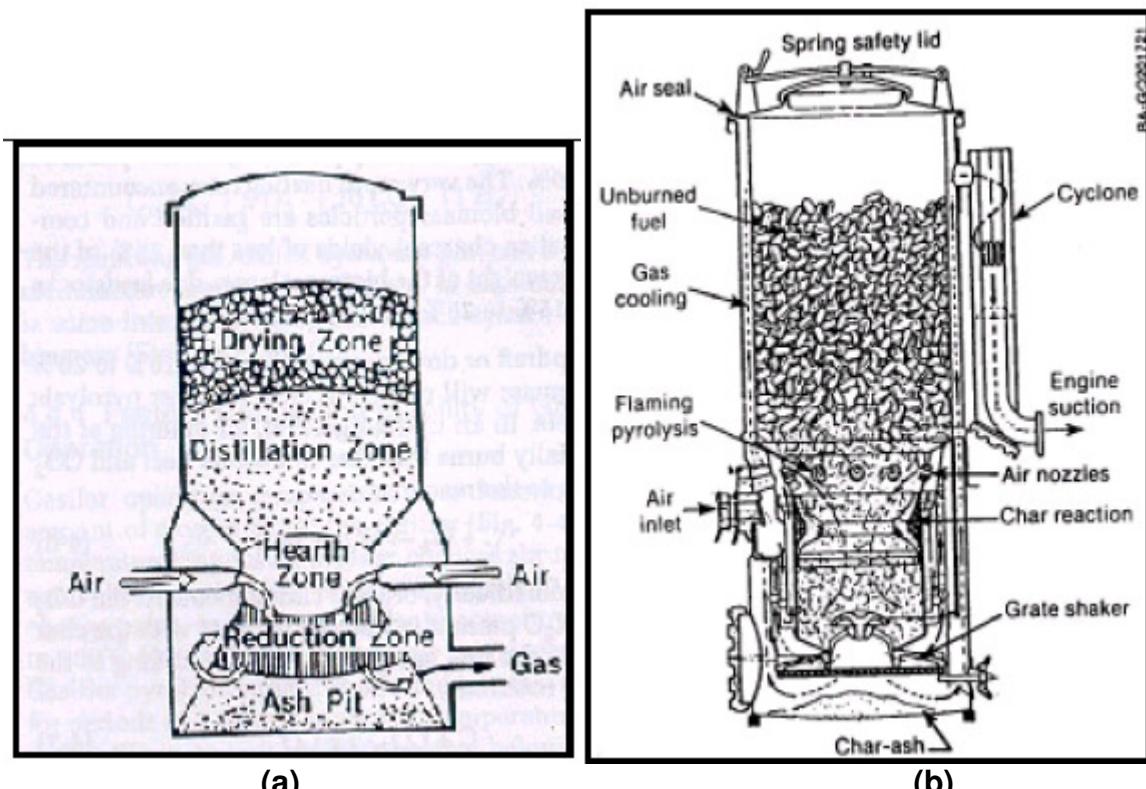


Figura 30: (a) Diagrama de gaseificador tipo Imbert, (b) Desenho esquemático de gaseificador tipo Imbert. (Fonte: REED et all, 1994)

Esta região de estrangulamento tem a função de forçar a passagem dos voláteis liberados na região de destilação pela região de combustão (“hearth zone”) para a sua destruição. No entanto, entre os bocais de injeção de ar e no centro da região de combustão, como mostrado na *Figura 31*, formam-se regiões sem acesso de ar, consequentemente com temperaturas mais baixas, por onde os alcatrões podem passar livremente sem sofrer decomposição.

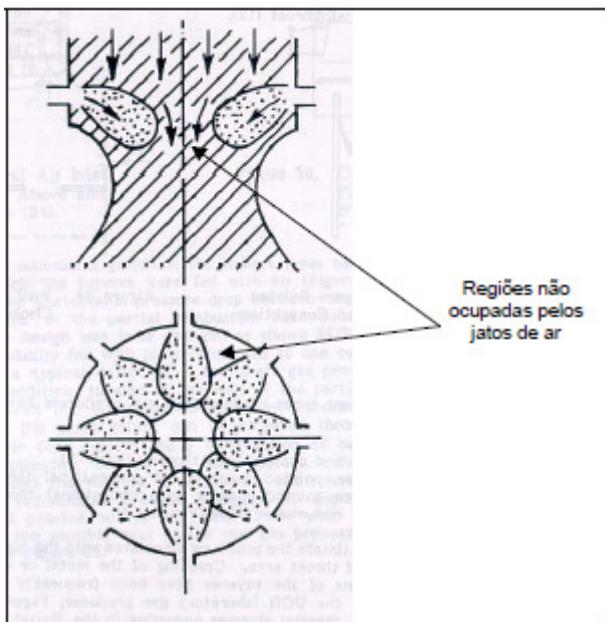


Figura 31: Regiões não ocupadas pelos jatos de ar. (Fonte: KAUPP)

Para esses tipos de caldeiras, existem algumas variantes. O modelo desenvolvido por MUKUNDA ET AL, do Instituto de Ciência Indiano, IIS, vem apresentando bons resultados em testes de avaliação em laboratórios e em campo, na Índia, razão pela qual duas unidades estão sendo trazidas ao Brasil para testes de avaliação de desempenho com biomassas locais.

Esse modelo apresenta abertura no topo, por onde 2/3 do ar de combustão entra, enquanto o 1/3 restante é injetado numa região localizada pouco acima da grelha, servindo para complementar a queima ou craqueamento térmico dos alcatrões, eventualmente não reagidos na região de pirólise flamejante.

Na região de pirólise flamejante, as partes do gaseificador foram construídas de material refratário para uma maior resistência do equipamento.

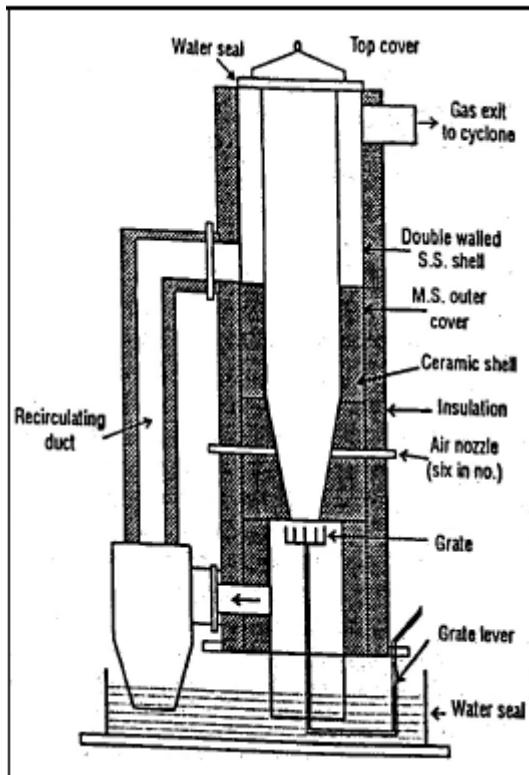


Figura 32: Esquema do gaseificador de topo aberto do IIS. (Fonte: MUKUNDA et all, 2006)

Outro variante é o modelo desenvolvido especificamente para gaseificar lenha que é praticamente isenta de alcatrão. Sua grelha foi fabricada em liga especial de aço inoxidável e remove, automaticamente, a cinza e carvão residual proporcionando a produção de gás de forma continua e estável.

Suas principais vantagens são:

- Consumo de 99 a 99,9% do alcatrão; desta forma o gás gerado poder ser transportado em tubulações e utilizados em motores com um mínimo de limpeza;
- Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz de carvão e a cinza é retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente;
- O gás (quando limpo) pode ser utilizado em motores de linha, sem maiores modificações;
- Os gaseificadores de topo aberto apresentam poucos problemas em casos de explosão.

Suas principais desvantagens:

- Combustível tem de apresentar baixa umidade, menor que 20%, e granulometria uniforme;
- O gás sai do gaseificador a temperatura elevada, desta forma esta energia é perdida a menos que haja algum aproveitamento;
- Normalmente de 4 a 7% do carbono do combustível não é convertido, saindo com as cinzas pelo fundo do gaseificador;
- A potência de pico de motores com ignição a vela é reduzida em 30 a 40%, a menos que ele seja turbinado.

1.2.5. Caldeiras de leito fluidizado

Esse tipo de caldeira tem como característica poder operar com combustíveis com umidade elevada, até 65%. A base de suporte de um leito fluidizado é a areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade por períodos relativamente longos, isto é, ao contrário das grelhas.

Nos equipamentos desse tipo, emprega-se um material como meio fluidizante, que se arrasta junto à biomassa, aumentando o contato desta com o elemento oxidante e, consequentemente, aumentando as taxas de reação.

Estes são mais adequados à conversão de uma maior quantidade de biomassa, isto é, sistemas com capacidade entre 10 e 20 toneladas de biomassas por hora. São também mais flexíveis quanto às características do insumo, podendo ser empregados na conversão de biomassa com mínimas necessidades de processamento anterior à alimentação. Porém, não atuam com qualquer tipo de biomassa. Biomassas com granulometria muito fina apresentam problemas de arraste excessivo do leito.

Combustíveis com cinzas de ponto de fusão baixo podem apresentar problemas de sintetização e colapso do leito.

A Figura 33 ilustra esse tipo de caldeira.

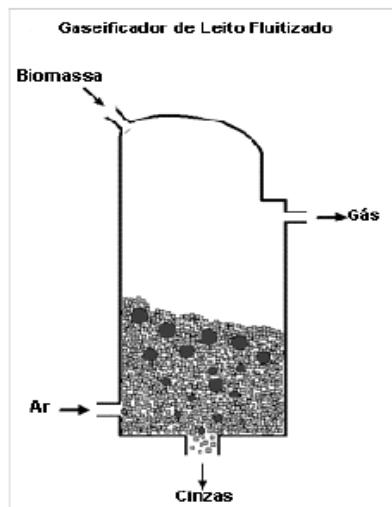


Figura 33: Gaseificador de Leito Fluidizado. (Fonte: Energia da Gaseificação de Biomassa como opção Energética de Desenvolvimento Limpo, 2000)

A Figura 34 representa um esquema mais detalhado desse tipo de gaseificador.

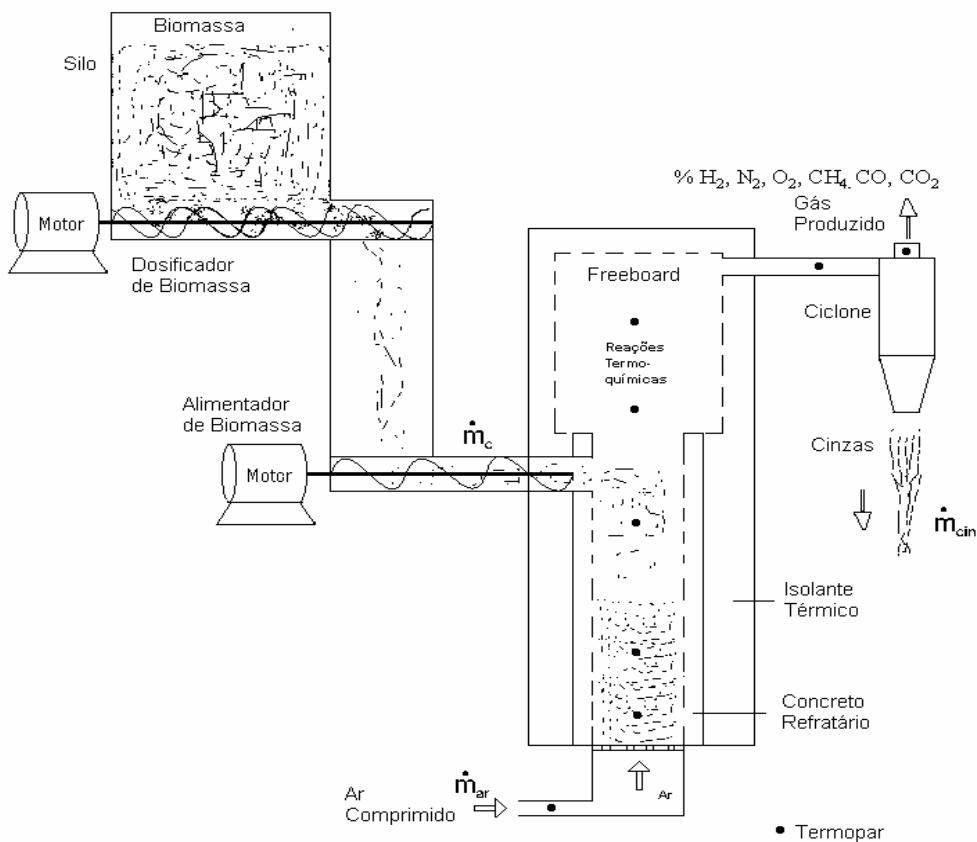


Figura 34: Detalhamento de gaseificador de leito fluidizado. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007)

O princípio de funcionamento de um gaseificador de leito fluidizado é como descrito a seguir:

- Passando-se um gás através de um leito de material particulado, como na *Figura 35*, observa-se a elevação na pressão da grelha.
- Aumentando-se a vazão do gás, obteremos também uma elevação na pressão até atingirmos uma velocidade denominada de velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) na qual a força peso das partículas se iguala à força de arraste do gás.
- Neste ponto as partículas começam a se descolar uma das outras e ficam suspensas, passando a se comportar como líquido.
- Aumentando-se a velocidade do gás, provoca-se o surgimento de bolhas de gás no interior da suspensão, criando-se duas fases, uma somente de gás, e outra denominada emulsão, composta de gás e material particulado fluidizado.

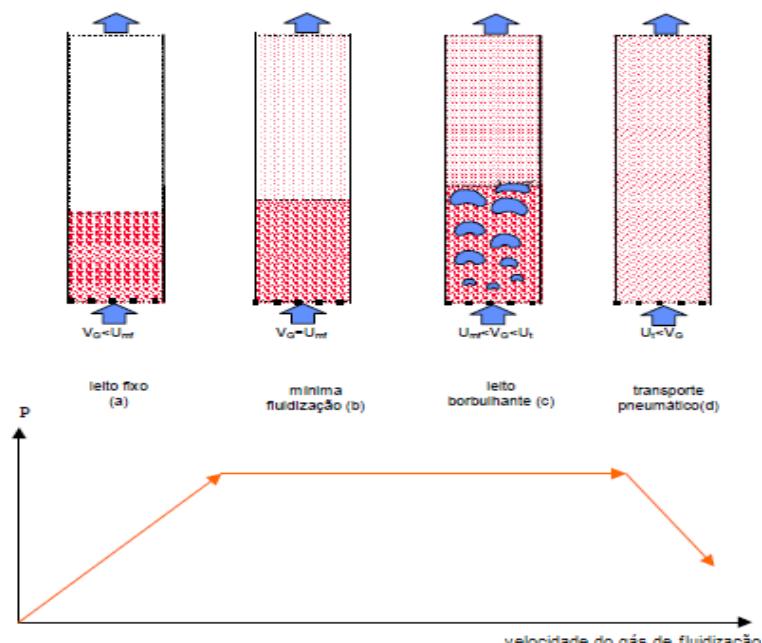


Figura 35: Evolução da pressão na base de um leito de material particulado com o aumento da vazão de ar. (Fonte: CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. Estudo da Arte, 2002)

As bolhas, ao subirem, arrastam grande quantidade de material particulado, o que as fazem responsável pela circulação de sólidos no leito. Quando a velocidade do gás atinge a velocidade terminal das partículas (U_t), começa a haver um arraste do material mais fino, diminuindo a altura do leito e a pressão na sua base. No caso destas partículas arrastadas serem coletadas em um ciclone e serem retornadas ao leito, têm-se um leito fluidizado circulante.

Existem dois tipos de gaseificadores de leito fluidizado: os de leito borbulhante, e o de leito circulante. A diferença básica entre os dois é a velocidade com que o material atravessa o leito. Enquanto o gaseificador de leito borbulhante apresenta velocidades de 1m/s, os de leito circulante apresentam velocidades de 7 a 10m/s.

A Figura 36 mostra um exemplo desse tipo de caldeira:



Figura 36: Caldeira de Leito Fluidizado. (Fonte: SERMATEC, Caldeiras de Leito Fluidizado, 2003)

1.2.6. Caldeiras de leito fluidizado borbulhante

Especialmente aplicadas para combustíveis de alto teor de umidade, as caldeira de Leito Fluidizado Borbulhante (BFB), são caracterizadas pelo projeto de fundo totalmente aberto, permitindo a queima de combustíveis com alto teor de contaminantes inertes tais como pedras, ferro, etc.

A combustão realizada em caldeira do tipo BFB, é caracterizada pela injeção do combustível em um leito de areia, permanecendo retido até a sua queima total, o que representa uma eficiência de combustão superior a 99%. Com a temperatura controlada na faixa de 850 °C (através do controle da relação entre o ar primário e o ar secundário), assim como pela recirculação de gases inertes, as caldeira BFB apresentam reduzidas emissões de particulados, óxidos de nitrogênio (NOx), assim como de CO.

Fabricadas suspensas por estruturas metálicas ou auto suportadas, as caldeira BFB são totalmente construídas de painéis aletados, com uso restrito a um mínimo de material refratário.

Apesar de ainda ser uma tecnologia em desenvolvimento, algumas empresas já disponibilizam esse tipo de caldeira ao mercado na faixa de produção de 15 t/h a 300 t/h, sem limites de pressão e temperatura de vapor para aplicação em todos os tipos de biomassa, inclusive para combustíveis complementares como tiras de pneus, carvão, petcoke e outros.

A Figura 37 mostra um exemplo desse tipo de caldeira:



Figura 37: Caldeira de leito fluidizado borbulhante. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007)

1.2.7. Caldeiras de leito fluidizado circulante

As caldeiras de Leito Fluidizado Circulante (CFB) são caracterizadas pelas seguintes aplicações principais:

- Larga faixa de aplicação de combustíveis;
- Matéria volátil: 4 a 40%;
- Cinzas: 0 a 60%;
- Poder Calorífico: Superiores a 1.500 Kcal/Kg;
- Umidade: Menores que 65%;
- Utilização de rejeitos de processo;
- Flexibilidade de combustíveis: minimizando incertezas de fornecimento;
- Capacidade de queima de combustível de baixo custo devido a pouca aplicação em caldeiras convencionais.

A tecnologia para caldeiras CFB é caracterizada pelo uso patenteado da solução de recirculação interna de material inerte (IR-CFB), proporcionando acurado controle da temperatura de fornalha e, permitindo que a variação desta temperatura, ao longo de toda altura da fornalha, seja no máximo de 15 °C. Desta forma, as caldeiras IR-CFB proporcionam CO e reduzidas emissões de óxidos de enxofre (SO_x), associado ao exclusivo sistema de injeção de calcáreo, não requerendo, na maioria dos casos, os altíssimos investimentos em sistemas de dessulfurização de gases. Com capacidades de geração de vapor à partir de 30 t/h, as caldeiras IR-CFB não possuem limites de produção de vapor, assim como de pressão de operação, sendo de grande utilização em unidades de geração térmica onde pressões superiores a 120 bar são recomendadas.

A *Figura 38* mostra os processos internos desse tipo de caldeira:

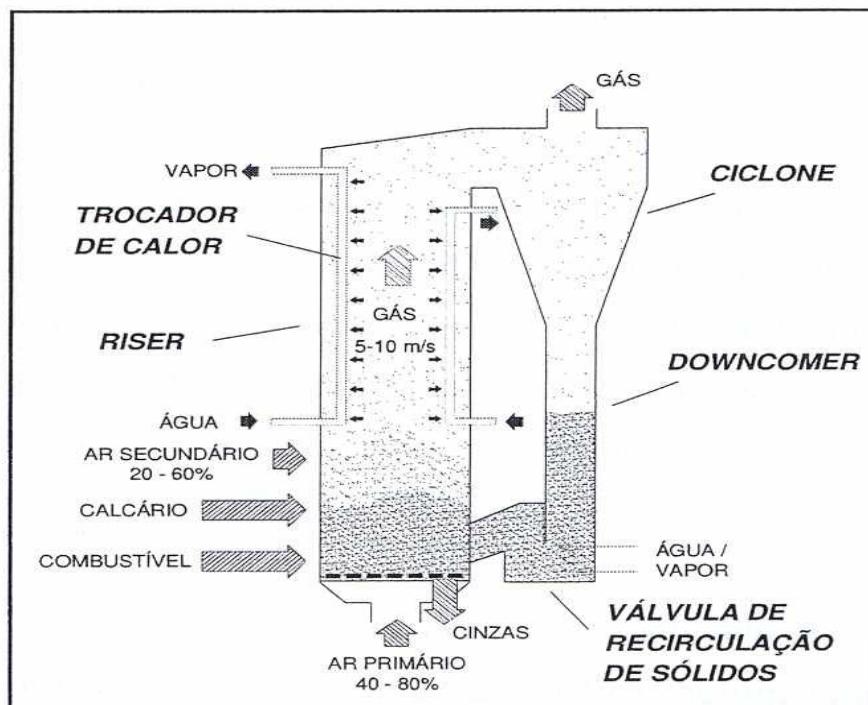


Figura 38: Caldeira de leito fluidizado circulante. (Fonte: Bizzo_(UNICAMP)_Energia_Biomassa.pdf, UNICAMP. Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia, 2007)

1.3. Caldeiras de gaseificador ciclônico

Tipo de caldeira ainda em desenvolvimento tecnológico e com informações restritas e variadas.

Anexo C - Equipamentos Auxiliares

Alguns equipamentos auxiliares às caldeiras são as briquetadeiras e as moedoras. Tais equipamentos são descritos como se segue.

Briquetadeiras

Briquetadeiras são equipamentos que “moldam” os insumos a serem inseridos nas caldeiras.

Como se pode verificar, a produção de briquetes nada mais é que a compressão de matéria por um pistão movido por um volante. O material é depositado sobre um tubo, através de um funil, e o pistão comprime esse material, o qual sai na forma do tubo, que é usado como molde

A *Figura 39* mostra um esquema mais completo sobre a produção de briquetes, mostrando desde a entrada do material, inteiro, sua Trituração, sua elevação até um silo dosador e, posteriormente, sua compressão e saída do briquete.

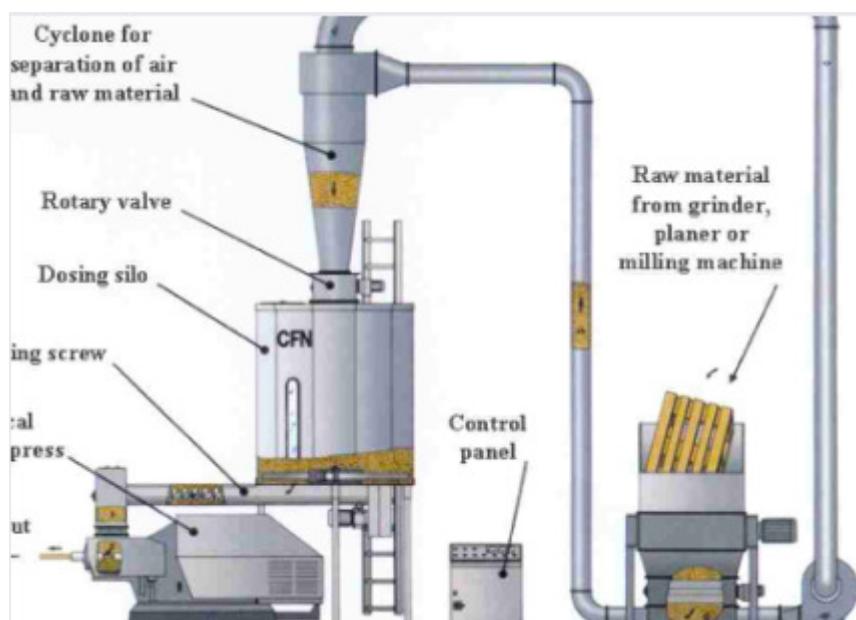


Figura 39: Esquema completo da produção de briquetes (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Briquete é uma fonte concentrada e comprimida de material energético, podendo este ser qualquer biomassa vegetal, ou finos de carvão misturado a algum tipo de adesivo. Os briquetes de biomassa dispensam qualquer tipo de adesivo, devido ao poder plástico da lignina que, como pressão e calor, se molda em nova forma.

Briquetes de finos de carvão são feitos usando também adesivos, porque carvão é constituído de arranjos cristalinos de carbono e não possuem mais a lignina. Podem ser usados quaisquer tipos de adesivos, como os de origem animal, vegetal e também os minerais. O briquete é uma lenha ecológica (reciclada) que é resultado do processo de secagem e prensagem de serragem ou pó dos mais diversos tipos de madeira substituindo com inúmeras vantagens a lenha convencional na sua totalidade, sem a necessidade de qualquer modificação no equipamento (fornos, caldeiras, entre outros).

Na *Figura 40* são mostrados dois tipos de briquetes, o tipo “bolacha” e o briquete tipo comprido.

Briquete “Bolacha”

Diametro: 8,5 cm



Espessura: 1 a 3 cm



Briquete “Comprido”

Diametro: 8,5 cm



Comprimento: 15 a 40 cm



Figura 40: Diferentes tipos de briquetes (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

As figuras acima retraram as estruturas de possíveis insumos em forma de briquete, podendo estes terem diversas dimensões e padronizações.

A Tabela 18 que se segue é uma comparação entre os dois tipos de briquetes. Um feito com casca e outro com serragem. Podem ser notadas divergências mais agudas entre as porcentagens de cinzas e os poderes caloríficos.

BRIQUETES	CASCA	SERRAGEM
Umidade Total %	8,48	8,38
Umidade Higroscópica %	5,55	6,56
Cinza %	23,46	5,71
Carbono %	38,57	48,13
Hidrogênio %	4,82	5,51
Nitrogênio %	0,44	0,44
Poder Calorífico Superior % Kcal/kg	3400	4650
Poder Calorífico Superior % J/g	14235	19470
Poder Calorífico Inferior % Kcal/kg	3150	4365
Poder Calorífico Inferior % J/g	13190	18275

Tabela 18: Comparação entre briquetes feitos com casca e com serragem Brasil (Fonte: NEGÓCIOS S/A, WEBB. Avaliação do Mercado de Biomassa, 2008)

Tipos de máquinas briquetadeiras

Existem 5 tipos de equipamentos de compactação de resíduos lignocelulósicos:

- Prensa extrusora de pistão mecânico:
Um pistão ligado excentricamente a um grande volante força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone.
- Prensa extrusora de rosca sem fim:

Apresentam excelentes resultados. Seu princípio mecânico é semelhante às marombas da indústria cerâmica.

- Marombas:

A matéria-prima é introduzida em um misturador de grande eficiência, iniciando a compressão entre as pás até os caracóis de pré-compressão comprimindo o material e forçando-o a passar através das aberturas frontais cônicas. A matéria prima fragmentada entra na câmara de vácuo onde há uma aspiração de ar na parte superior que assegura um perfeito desareamento da massa, e calçadores sincronizados com o caracol de extrusão inferior alimentam de forma eficiente para que haja a extrusão da matéria prima através da boquilha, responsável pela conformação do produto cerâmico

- Prensa hidráulica:

Equipamento que usa um pistão acionado hidraulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete, quando se aplica a pressão desejada. Não é um processo extrusivo e a pressão aplicada é geralmente menor que em outros métodos, produzindo briquetes de menor densidade.

- Peletizadora:

É um equipamento que opera pelo processo extrusivo. Estes equipamentos vêm sendo experimentados para compactação de resíduos com resultados razoáveis.

- Enfardadeira:

O equipamento comprime e amassa o resíduo, elevando a densidade do bagaço de cana com 20% de umidade a 500kg/m³. Não exige pré-secagem do material, o que

permite a secagem posterior. No entanto, é aconselhável o enfardamento após a secagem.

Anexo D - Esteiras Transportadoras

Transportador de Correias

Seu projeto simples e seu sistema modular permitem diversas configurações de altura, largura e comprimento, além de peso e extensão de produtos a ser transportado, bem como os diversos modelos de guias laterais que se associam a ele.

Sua forma construtiva é rígida, apesar de simples, e apresenta baixa taxa de manutenção. Pode ser confeccionado em alumínio, aço carbono ou aço inox, sua correia pode ser simples, anti-estática, com taliscas, entre outros. Sua forma construtiva permite transferência linear ou perpendicular (90 °), não só entre si, mas também com outros transportadores de nossa linha, possibilitando inúmeras configurações de lay-outs.

A *Figura 41* mostra um exemplo desse tipo de esteira:

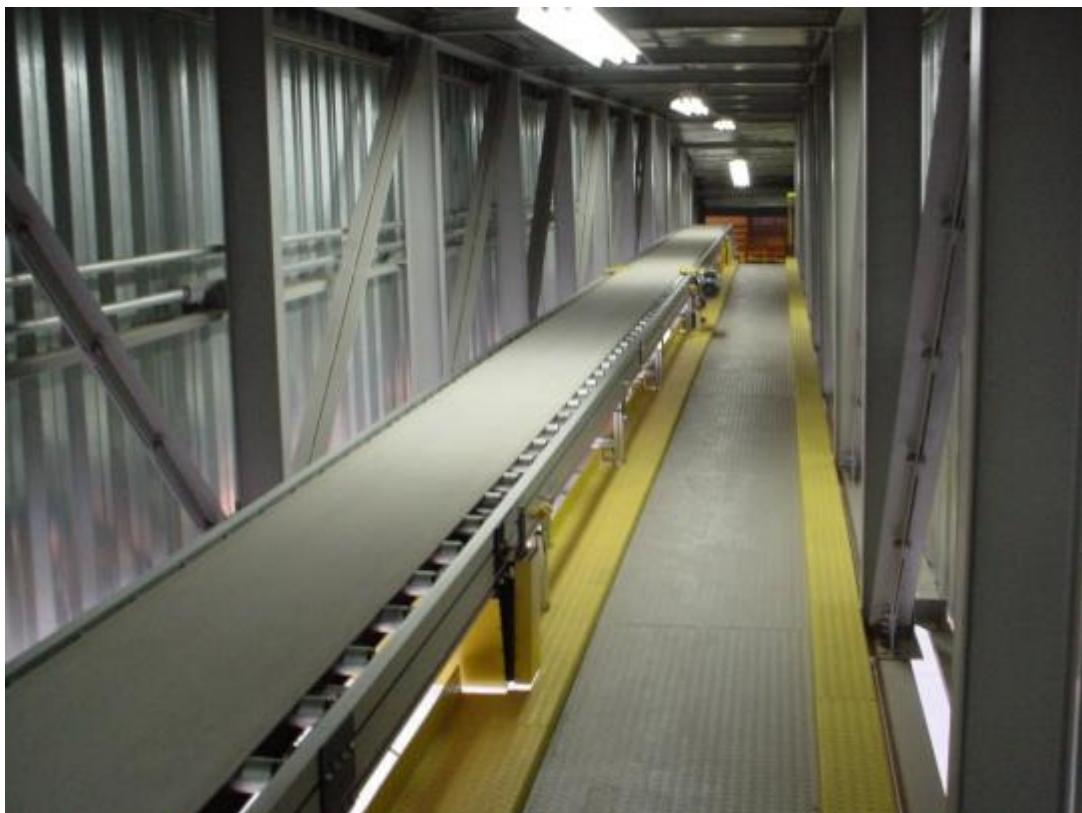


Figura 41 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por correia (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores a Ar

A construção destes transportadores adota elementos modulados que permitem versatilidade nos layouts bem como qualidade de execução no projeto e fabricação dos mesmos, permitindo fácil montagem e baixa manutenção.

O Transportador a ar tem acionamento próprio através de ventiladores com direcionadores do fluxo de ar em toda a sua extensão. Possui guias para transporte do produto e estabilizador lateral, podendo trabalhar em linha única ou composta, com velocidade de até 80metros por minuto, garantindo assim boa performance em linhas de alta produção. Equalizando a movimentação com variações sincronizadas, a movimentação define pontos de bloqueios para desvios em separadores ou unificadores, definindo assim o fluxo das embalagens. Todo o controle e automatização de velocidades, paradas e eficiência dos demais equipamentos são comandados através de sistema PLC.

A *Figura 42* mostra um exemplo desse tipo de esteira:



Figura 42 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por ar (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores de Rolletes

Sua forma construtiva simples permite inúmeras configurações como curvas em diversos ângulos e transferência com outros transportadores da linha. Apresenta baixa taxa de manutenção e fácil montagem, conseguindo transportar produtos com pesos elevados, como paletes cheios. Pode ser confeccionado em alumínio, aço carbono ou aço inox. Seus rolos podem ter diâmetros e passos variados e ainda podem ser acionados ou livres. Aceita vários tipos de acessórios como bloqueadores, viradores, etc., tornando-o um transportador de grande flexibilidade.

A *Figura 43* mostra um exemplo desse tipo de esteira:

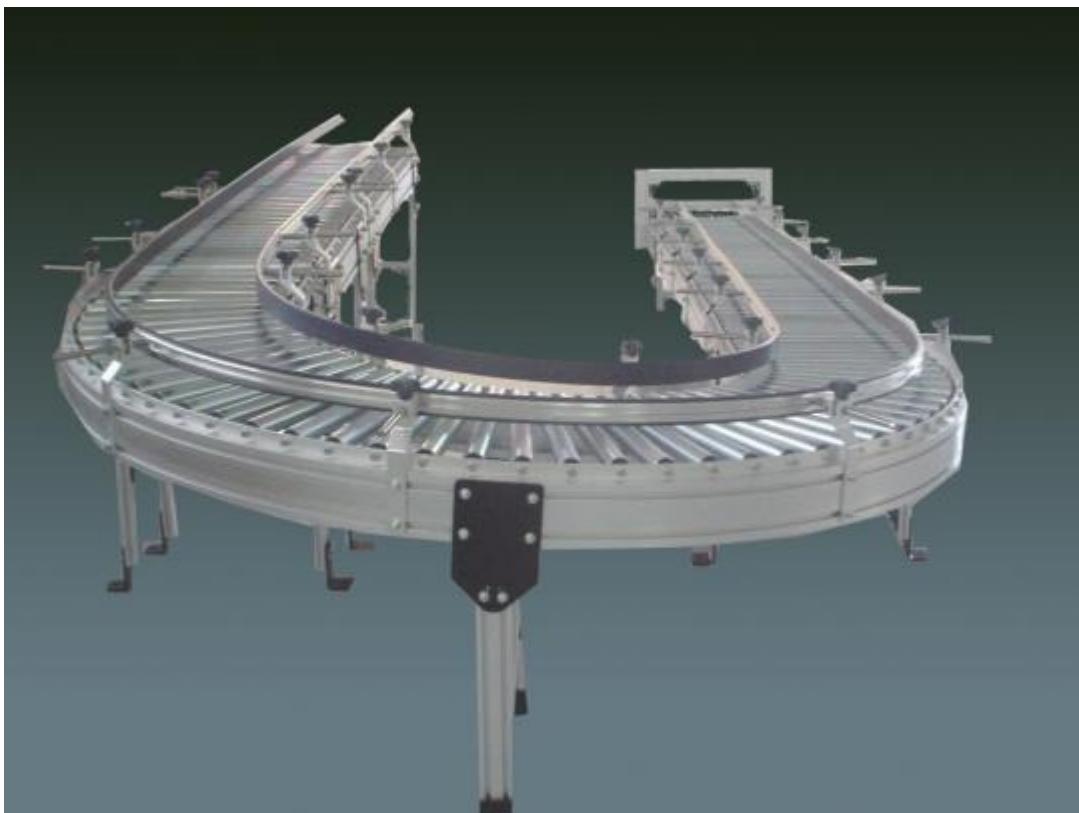


Figura 43 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por roletes (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores de Correntes

A construção destes transportadores adota elementos modulados que permitem versatilidade nos layouts bem como grande qualidade de execução no projeto e fabricação dos mesmos, permitindo fácil montagem e baixa manutenção. Equipamento confeccionado em aço inox, aço carbono ou alumínio. As especificações dos componentes e a definição técnica dos limites de velocidade, de resistência mecânica dos materiais e do sistema de apoio e lubrificação são testados por rígidas normas técnicas.

Os transportadores podem ser retos, curvos, mesas acumuladoras ou equipamentos com pistas em paralelos. A motorização é definida conforme necessidade do projeto.

A *Figura 44* mostra um exemplo desse tipo de esteira:

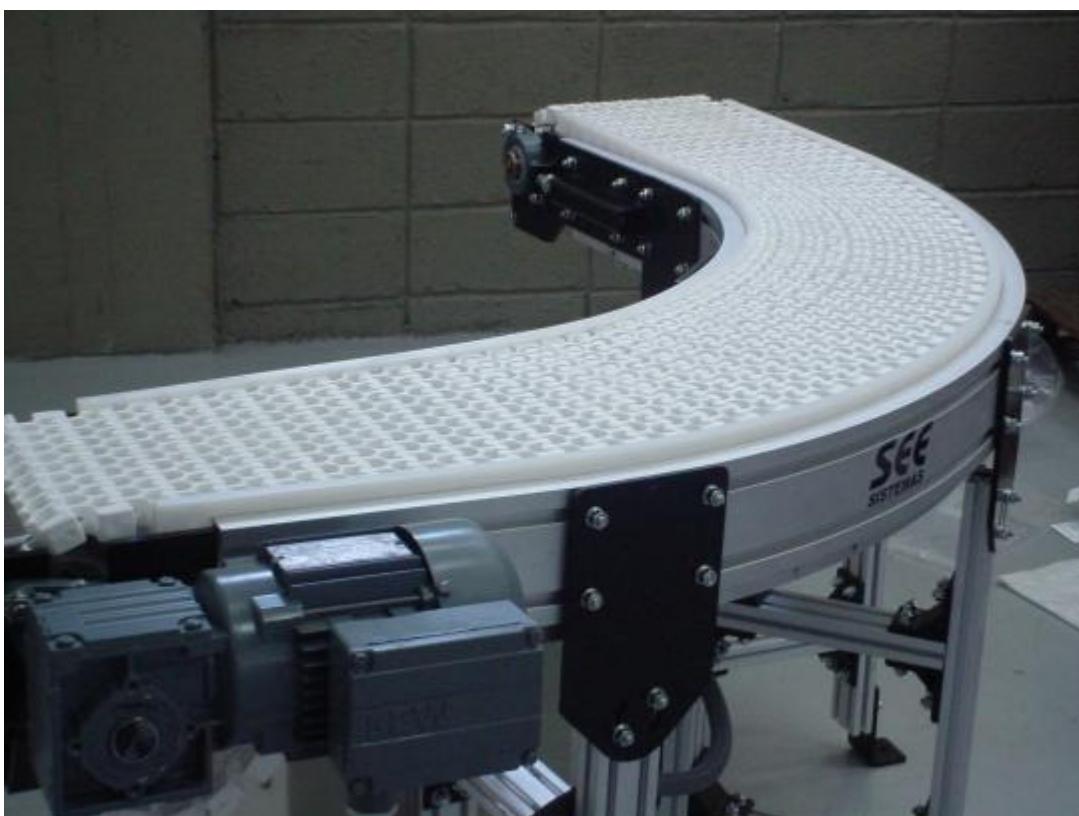


Figura 44 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por correntes (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores Modulares Flexíveis

Flex-Line, flexibilidade, resistência e visual apropriado. Podendo ser em alumínio ou aço inoxidável, formando soluções e layout rapidamente, permitindo muita criatividade e qualidade nas aplicações.

A *Figura 45* mostra um exemplo desse tipo de esteira:



Figura 45 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por mecanismos flexíveis
(Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores de Calhas Vibratórias

Seu projeto é simples e possui uma das maiores utilizações atualmente. Sua robustez e flexibilidade de aceite a qualquer insumo impulsionam sua utilização. A vibração em sua estrutura provoca movimentos nos itens a serem transportados, fazendo com que as oscilações se transformem em translações dos insumos.

A *Figura 46* mostra um exemplo desse tipo de esteira:



Figura 46 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por calhas vibratórias (Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores Helicoidais

Seu projeto não é tão simples, mas já é utilizado há um considerável tempo no mercado. Necessita de alguma flexibilidade dos insumos que entrarão em seu sistema de transporte por causa de sua forma estrutural que se trata de locomoção dentro de uma rosca semi-infinita em que seu diâmetro é relativamente pequeno comparado ao seu comprimento.

A *Figura 47* mostra um exemplo desse tipo de esteira:



Figura 47 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por sistemas helicoidais
(Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)

Transportadores Pulmão-Acúmulo

Seu projeto é complexo, pois se trata de um transportador que possui um princípio de funcionamento que necessita da impulsão de objetos subseqüentes. Então, sendo assim, seu uso não é integralmente adequado para a utilização de todos os tipos de biomassa, pois seria necessário algo que tivesse dimensões fixas, proporcionais e bem definidas.

A *Figura 48* mostra um exemplo desse tipo de esteira:



Figura 48 – Tipo de Esteira Transportadora com funcionamento por sistemas acumuladores
(Fonte: SEE Sistemas, Produtos, 2009)