



PROJETO DE GRADUAÇÃO

GESTÃO DE ENERGIA DE RESÍDUOS DE BIOMASSA: OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS UNIDADES INDUSTRIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Por,
Quéssia de Noronha Rocha

Brasília, 30 de novembro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

GESTÃO DE ENERGIA DE RESÍDUOS DE BIOMASSA: OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS UNIDADES INDUSTRIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

POR,

Quéssia de Noronha Rocha

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, UnB/
ENM (Orientador)

Prof. Mário Olavo M. Carvalho, UnB/ ENM

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, UnB/ ENM

Brasília, 30 de novembro de 2011

RESUMO

Este trabalho busca, através da otimização linear e da utilização do programa GAMS, identificar localizações ótimas para o estabelecimento de usinas termelétricas que possam utilizar os resíduos de madeira oriundos de serrarias no Estado do Pará. O processo tecnológico a ser otimizado envolve a densificação energética dos resíduos de biomassa, através da peletização, o transporte da biomassa até as termelétricas, a utilização dessa energia através de gaseificação ou combustão direta para a geração de eletricidade. A função a ser otimizada foi o custo ambiental e do uso de combustível para o transporte da biomassa. Também foram calculados custos de transporte entre unidades de densificação e usinas, custos de densificação e custos ambientais de emissão de carbono para ambos os processos; foram calculadas as receitas geradas pela venda de energia elétrica e pelo carbono evitado. Do total de R\$17.683.510,00 anuais gastos com a peletização, 0,7% corresponderam a custos ambientais; de R\$14.690.896,00 gastos com transporte, 1,2% foram custos ambientais.

Palavras-chave: geração de eletricidade, biomassa, otimização linear, GAMS

Do total de R\$17.683.510,00 anuais gastos com a peletização, 0,7% corresponderam a custos ambientais; de 14.690.896,00 gastos com transporte, 1,2% foram custos ambientais.

ABSTRACT

This work seeks, through the linear optimization and the use of the GAMS program, to identify optimal locations for the establishment of thermoelectric plants that can utilize the wood residues originated from sawmills in the state of Pará. The technological process to be optimized involves the energetic densification of the biomass residues, through the pelletization, the biomass transportation to the thermoelectric plants, the energy utilization through the gasification or the direct combustion for the energy generation. The function to be optimized was the environmental cost and the fuel use for the biomass transport cost. Transportation costs between the densification and plants, costs of densification and environmental costs of carbon emission from both processes were calculated; they were also calculated the revenue generated by the electric energy sales and by the avoided carbon emissions. From the total of annual R\$17.683.510,00 spent with the pelletization, 0,7% correspond to environmental costs; from R\$14.690.896,00 spent with transportation, 1,2% were environmental costs.

Keywords: electricity generation, biomass, linear optimization, GAMS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	1
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	BIOMASSA	3
2.2	ROTAS TECNOLÓGICAS	4
2.2.1	TECNOLOGIAS DE DENSIFICAÇÃO	5
	- Peletização	6
	- Briquetagem	7
	- Torrefação	9
2.2.2	PIRÓLISE	10
	- Carbonização	14
	- Pirólise Rápida	14
2.2.3	GASEIFICAÇÃO	15
	- Leito Fluidizado	16
	- Gaseificação contracorrente	17
	- Gaseificação concorrente	18
	- Gaseificação fluxo cruzado	19
2.2.4	COMBUSTÃO DIRETA	21
	- Fornalhas	23
2.3	GERAÇÃO DE ENERGIA	24
2.3.1	TURBINAS A VAPOR	24
2.3.2	TURBINAS A GÁS	25
2.4	MERCADO DE CARBONO	26
2.4.1	Crédito de carbono	27
2.4.2	Carbono equivalente	28
2.5	OTIMIZAÇÃO LINEAR	30
2.5.1	Representação de problemas	30
2.5.2	Solução gráfica e Teorema fundamental da programação linear	31
2.5.3	Dualidade	34
	- Modelo primal e dual	34
	- Teorema dual	35
	- relação entre o primal e o dual	36
	- Significado econômico dos valores ótimos das variáveis do Modelo Dual	36
	- Taxa de Pigou	36
2.5.4	Exemplo básico de otimização linear: o problema do transporte	37
2.6	O PROGRAMA GAMS	39

2	OTIMIZAÇÃO	40
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	40
3.2	DADOS DE PRODUÇÃO DO PARÁ	42
3.3	POSSÍVEIS ALVOS PARA LOCALIZAÇÃO DE USINAS	45
3.4	DISTÂNCIAS	46
3.5	CUSTOS DE TRANSPORTE.....	48
3.5.1	Transporte – Custo Ambiental.....	50
3.6	CUSTO DE PELETIZAÇÃO.....	51
3.6.1	Custo Ambiental de Peletização	51
3.7	CUSTOS TOTAIS.....	52
3.8	POTÊNCIA INSTALADA	53
3.9	RECEITA GERADA	54
3.10	VERIFICAÇÃO DE NECESSIDADE DE OTIMIZAÇÃO	55
3.11	PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO	58
3.12	RESULTADOS	60
3.12.1	Custos e Receita Gerada.....	64
3.12.2	Taxa de Pigou	68
3.12.3	Tecnologias utilizadas	69
3.12.4	Custos Marginais	70
4	CONCLUSÃO.....	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Rotas Tecnológicas	5
Figura 2 – Pellets	6
Figura 3- Esquema da prensa com matriz anular	7
Figura 4- Esquema de briquetagem	8
Figura 5 - Esboço de extrusora termoplástica para biomassas	8
Figura 6 - Planta de torrefação industrial em Laval de Cere	10
Figura 7 - Produtos da pirólise em função do tempo de residência e temperatura	12
Figura 8 - Tipos de processos de gaseificação.....	16
Figura 9 - Leito de partículas percolado por uma corrente gasosa ascendente.....	17
Figura 10 - Gaseificador contracorrente.....	18
Figura 11- Gaseificador concorrente.....	19
Figura 12- Gaseificador de fluxo cruzado	20
Figura 13– Gaseificador de leito fluidizado	21
Figura 14 - Exemplo de uma caldeira	22
Figura 15- Fornalha para queima de biomassa com alimentador automático.....	24
Figura 16 – Máquina térmica a vapor	25
Figura 17 - Máquina térmica a gás.....	26
Figura 18 - Contribuição dos gases ao efeito estufa	29
Figura 19 – Modelo matemático do problema das rações.....	32
Figura 20 – Solução gráfica do problema das rações.....	33
Figura 21 – Rendimento do processamento da madeira.....	40
Figura 22 – Fluxograma de transformação da madeira.....	41
Figura 23 - Processos de transformação da biomassa	42
Figura 24 - Visão geral de produções madeireiras do Pará	47
Figura 25 - Produções madeireiras do Pará – parte ao norte	47
Figura 26 - Produções madeireiras no Pará – parte ao sul.....	48
Figura 27 - Maquinário da serraria	56
Figura 28 - Custos totais.....	61
Figura 29 - Localização das usinas	64
Figura 30 - Localização das usinas 2	64
Figura 31 - Segmentação dos custos de transporte	65
Figura 32- Segmentação dos custos de Peletização	66
Figura 33 - Segmentação dos custos totais.....	67
Figura 34 – Receita e Custos	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Caracterização de briquetes de resíduos de madeira torreficados	9
Tabela 2 – Rendimento de madeira torrefeita.....	10
Tabela 3 - Rendimentos de Carvão e Voláteis para os diferentes componentes da biomassa, em % em peso.....	13
Tabela 4– Resultados de pirólise modificando os parâmetros de operação	13
Tabela 5 - Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores para biomassa	21
Tabela 6- Classificação das caldeiras para a queima de bagaço de cana.....	22
Tabela 7 - Dados e parâmetros mais importantes para diferentes tipos de caldeiras de bagaço	23
Tabela 8– Gases cujas emissões devem ser reduzidas	28
Tabela 9 – Representação de problemas	30
Tabela 10 – Dados do problema de mistura (ração).....	31
Tabela 11 – Modelos Primal e Dual.....	34
Tabela 12 – Relação entre o primal e o dual	36
Tabela 13 - Dados do problema do transporte	37
Tabela 14 - Dados e variáveis do problema	38
Tabela 15 - Quantidades transportadas ótimas (em nº de caixas)	38
Tabela 16 – Custos marginais.....	39
Tabela 17 - Polos madeireiros do estado do Pará em 2009	43
Tabela 18 - Continuação de Polos madeireiros do estado do Pará em 2009	44
Tabela 19 - Principais Municípios atendidos pela Celpa	46
Tabela 20 - Tabela base para frete	48
Tabela 21 – Cálculo de frete.....	49
Tabela 22 - Fator de emissão de CO2 do óleo diesel	50
Tabela 23 – Fator Médio Anual de Emissão de Carbono para Geração de Energia	52
Tabela 24 – Termos das equações	52
Tabela 25 – Preço médio ponderado de energia comprada pela Celpa em 2008.....	54
Tabela 26 - Relação de equipamentos.....	56
Tabela 27 – Demanda de energia.....	57
Tabela 28 - Definições e Símbolos	58
Tabela 29 - Mais definições e símbolos	59
Tabela 30 - Cidades-alvo.....	60
Tabela 31 - Comparação de Parâmetros	61

Tabela 32 - Otimização 2	62
Tabela 33 - Otimizações 3 e 4	63
Tabela 34 - Custos de transporte.....	65
Tabela 35 – Receita gerada.....	67
Tabela 36 - Potência Instalada (Gaseificação).....	69
Tabela 37 - Receita gerada (Gaseificação)	69
Tabela 38 - Custos Marginais (frete)	70
Tabela 39 - Custos Marginais (frete - continuação).....	71
Tabela 40 - Custos marginais ambientais	72
Tabela 41 - Custos Marginais ambientais (continuação)	73
Tabela 44 - Tipos de variáveis.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a_i	-	Capacidade das plantas i	[caixas]
a_{i1}	-	Oferta de biomassa	[t]
b_j	-	Demanda do mercado j	[caixas]
cap	-	Capacidade dos caminhões	[t]
$CapCam$	-	Capacidade de carga do caminhão	[kg]
$Cdens_i$	-	Custo de densificação	[R\$]
CE_c	-	Conteúdo de energia	[TJ/unidade]
c_{ij}	-	Custo de transporte por caixa	[\$]
C_{ij}	-	Custo total	[R\$]
cp_i	-	Custo energético de peletização	[R\$]
$cp2_i$	-	Custo ambiental de peletização	[R\$]
ct_{ij}	-	Custo total	[R\$]
ctp_i	-	Custo total de peletização	[R\$]
$Ctransp_{ij}$	-	Custo de transporte	[R\$]
ctr_{ij}	-	Custo total de transporte	[R\$]
$CustAmb$	-	Custo Ambiental de peletização	[R\$/kg]
$CustDies$	-	Consumo de combustível diesel	[R\$/km]
$CustEmis$	-	Custo das emissões de CO2	[R\$/km]
$CustEnerg$	-	Custo Energético	[R\$/kg]
$c1_{ij}$	-	Custo calculado de transporte (frete)	[R\$]
$c2_{ij}$	-	Custo ambiental de transporte	[R\$]
d_{ij}	-	Distâncias	[km]
D_{ij}	-	Distâncias entre os municípios	[km]
$demanda(i)$	-	Demanda	[caixas]
$Dtot$	-	Distância total percorrida	[km]
f	-	Frete	[\$/caixa] [R\$/km]
FC_c	-	Fator de emissão de carbono por tipo de combustível	[tC/unidade]
FE_c	-	Fator de emissão de carbono por quantidade de combustível	[tC/TJ]
$f1$	-	Frete	[R\$/km]
$f2$	-	Custo ambiental de transporte por quilômetro	
$Oferta$	-	Quantidade de madeira processada	[m ³]
$oferta(i)$	-	Oferta	[caixas]
O_i	-	Oferta de biomassa já densificada	[kg]
OX_c	-	Fator de oxidação do combustível	
$PotInst$	-	Potência Instalada	[kW]
Pr	-	Preço de venda da energia elétrica	[R\$/kWh]
$p1$	-	Custo da energia para peletização por tonelada	[R\$/t]
$p2$	-	Custo ambiental de peletização por tonelada	[R\$/t]

x_{ij}	-	Quantidade de remessas	[caixas]
x_{ij1}	-	Quantidade de pellets transportada	[t]
z	-	Custo total de transporte	[\$]

Subscritos

i	-	Plantas de enlatamento
j	-	Mercados

Siglas

Celpa	-	Centrais Elétricas do Pará S.A.
CO	-	Monóxido de Carbono
EUA	-	Permissão de Emissão da União Europeia
NOx	-	Óxidos de Nitrogênio
GAMS	-	Generalized Algebraic Modeling System
GCA	-	Grupo Combustíveis Alternativos
GDS	-	The German Solar Energy Society
GEE	-	Gases do Efeito Estufa
GLP	-	Gás de Petróleo Liquefeito
GWP	-	Global Warming Potential
HC	-	Hidrocarbonetos
Imazon	-	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCT	-	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	-	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MME	-	Ministério de Minas e Energia
RCE	-	Redução Certificada de Emissões
UNFCCC Climáticas	-	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças

1 INTRODUÇÃO

O estado do Pará é o maior produtor madeireiro do Brasil, contando com 72% de seu território como florestas, o que representa 898,3km² de área. O processamento da produção de madeira, produto da silvicultura ou extrativismo vegetal, paraense, em 2009, contou com apenas 38,6% de rendimento, representando 2.550.000m³ de 6.599.000m³. (Imazon, 2010).

Portanto, o Pará apresenta recursos de matéria-prima para a instalação de uma planta termelétrica para geração de energia a partir de resíduos de madeira e a localização ótima dessa planta diminuiria custos de transporte de madeira.

Além da disponibilidade de recursos, há benefícios ambientais e sociais resultantes da implantação de uma termelétrica a biomassa.

Sem dúvida, o maior impacto global de uma usina termelétrica à biomassa é a substituição de um combustível fóssil (diesel) por um combustível renovável (biomassa). Tal substituição afeta, sobretudo, as emissões dos gases de efeito estufa. Dentre os principais gases de efeito estufa, os mais conhecidos são o CO₂, CH₄ e NO_x. Portanto, a substituição de combustíveis fósseis por biomassa em usinas termelétricas resulta em um impacto ambiental global positivo, conhecido como Emissões Evitadas de Carbono. Ou seja, ao utilizar biomassa em termelétricas, as emissões dos gases de efeito estufa são mínimas (levando em conta todo o ciclo de vida da biomassa). Comparativamente às emissões de uma termelétrica a diesel, um kWh gerado por uma usina termelétrica a biomassa deixa de contabilizar cerca de 1,02 kg de CO₂, para efeito do Protocolo de Quioto. Isso significa que 3000 kg de biomassa úmida utilizada para geração de energia elétrica correspondem a 1000 kg de emissões evitadas de CO₂. Dentro desse cenário, um impacto ambiental positivo que se pode destacar é a destinação final adequada com o reaproveitamento energético de resíduos, os quais, sem a termelétrica, seriam resíduos sólidos compondo aterros. (Rendeiro & Nogueira, 2008)

Como benefício social causado pela implantação de uma planta de geração de energia a partir de biomassa pode-se citar a geração de empregos e renda, requerendo a formação de pessoal na área de operadores de caldeiras, além de evitar problemas de saúde de comunidades que têm contato com resíduos não aproveitados da madeira.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo encontrar, dentre algumas opções viáveis predeterminadas, uma solução ótima para a localização e quantidade de biomassa processada por plantas

termelétricas de gaseificação e combustão direta, que utilizarão resíduos de madeira resultantes do processamento de toras de madeira do Pará.

Antes da otimização, foram determinadas quantidades de unidades de densificação, a partir do número de oferta de resíduos, assim como o número de usinas a serem instaladas para cada uma das tecnologias já citadas.

Inserido no contexto do trabalho, foram calculados custos de transporte dos resíduos devidos ao gasto de combustível pelos caminhões, assim como o custo ambiental agregado ao transporte, pela emissão de gases estufa, e custo energético para os processos de densificação. Além dos custos, foi encontrado um valor financeiro ganho com a produção final de energia. Não são estudados os custos iniciais da criação da infraestrutura necessária para geração de energia, nem custos de pessoal por estarem fora do escopo do trabalho.

Deve ser mencionado que os investimentos iniciais e seu tempo de retorno não serão calculados, porém é importante que, caso alguma implantação deste tipo seja realizada, eles devam ser analisados para determinar a viabilidade do investimento.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 1 - Introdução;
- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: apresenta os aspectos teóricos relacionados com o projeto;
- Capítulo 3 - Otimização: apresenta a definição do problema, dados necessários e resultados;
- Capítulo 4 - Conclusão;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOMASSA

Para entender melhor a motivação da utilização da biomassa para energia, é interessante, primeiro, entender o que é biomassa, sua utilização e composição.

Biomassa é a massa total de substâncias orgânicas que ocorrem em um habitat. As formas de biomassa em nosso planeta são muitas e variadas.

De um ponto de vista geral, a biomassa pode ser dividida em quatro categorias de acordo com a sua origem:

- Safras para energia: São cultivadas principalmente para a geração de energia. Sua função, análoga a de células solares, é capturar radiação solar e armazená-la na biomassa para uso posterior. Exemplos de safras para energia são a colza e o girassol.
- Resíduos pós-colheita: Os resíduos que ocorrem na colheita de cereais e da derrubada de árvores como a palha e resíduos de madeira florestal e lixo natural. Esse grupo de “subprodutos da natureza” é especialmente adequado para reciclagem de energia porque resulta em custos de produção diminuídos para a produção principal, ou pode aumentar a produção da cadeia de cultivo.
- Subprodutos orgânicos: O processamento da biomassa pelo homem para criar produtos forma um grupo maior de subprodutos. Esses subprodutos incluem estrume de animais da pecuária e resíduos de processamento industrial de madeira e fibras vegetais. Aqui, também, reciclagem de energia pode levar ao aumento de lucratividade e assegurar que partes do processo de produção sejam permanentemente ambientalmente sustentáveis.
- Lixo orgânico: Lixo orgânico engloba os produtos que são usados por consumidores e produtores e seus resíduos. Isto inclui resíduos biológicos domésticos, efluentes dos esgotos e resíduos da produção de comida, por exemplo, de matadouros. Lixo orgânico é geralmente sujeito à legislação de lixo. Consequentemente, uma grande gama de requisitos legais tem de ser atendida, de legislação de origem a controle de epidemias. (DGS, 2005)

O uso de biomassa é o método mais antigo de fornecer energia à humanidade. Porém biomassa como uma fonte renovável e universal e energia está passando por um renascimento com relação ao desenvolvimento de tecnologia e reputação. Assim como os efeitos ambientais positivos do fornecimento de energia baseadas na biomassa, há vários aspectos econômicos e sociais, já que a colheita, tratamento e transporte da biomassa utiliza muita mão-de-obra. Em

geral, áreas regionais lucram diretamente com o efeito positivo do uso de bioenergia. Em contraste com o valor adicionado de 20% no setor de energia baseada em combustíveis fósseis, projetos de bioenergia fornecem um valor adicionado de 60% para a região. (DGS, 2005)

A gama de aplicações e a disponibilidade são somente duas vantagens importantes da biomassa. Outro grande argumento para o uso dessa energia se origina do seu poder com relação ao clima e proteção ambiental. Quando é feito uso da energia armazenada na biomassa, gases estufa como o dióxido de carbono são emitidos, mas a quantidade é a mesma que a produzida por processos de decomposição natural. Assim portadores de bioenergia podem ser considerados neutros no que se refere ao feito estufa. (DGS, 2005)

Os resíduos florestais são constituídos por todo aquele material que é deixado para trás na coleta da madeira, tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento, e pela serragem e aparas produzidas no processamento da madeira. Estes resíduos deixados no local de coleta são as folhas, os galhos e o material resultante da destoca. Para todos estes casos, incluindo os resíduos de serragem, que pode ser superior à produção de madeira trabalhada, deve ser assumido o poder calorífico da madeira de 13,8 MJ/kg de resíduo produzido. (Cortez et al., 2006)

A biomassa tratada nesse trabalho compõe-se de resíduos da produção madeireira, mais especificamente a serragem e as aparas produzidas no processamento da madeira.

De acordo com Luengo et al (2006) os principais componentes da biomassa [madeira] são a hemicelulose, celulose e lignina.

A hemicelulose, juntamente com a celulose, é um dos componentes que forma a parede celular das células vegetais. A lignina, um dos principais constituintes da madeira, é responsável pela sua resistência. (Fengel&Wegener, 1984, Bonfá et al., 2003).

2.2 ROTAS TECNOLÓGICAS

A biomassa passa por alguns processos de transformações até se conseguir energia elétrica a partir da sua composição, tais processos são variados. É importante, para entender como acontece a geração da energia, conhecer os possíveis processos e tecnologias envolvidas na transformação da biomassa, ou seja, conhecer as rotas tecnológicas utilizadas.

As tecnologias de conversão da biomassa podem ser classificadas em três tipos: termoquímica, físico-química e biológica. A conversão do tipo termoquímica compreende a combustão direta, carvoejamento, torrefação, pirólise, gaseificação. A conversão físico-química compreende a prensagem, extração, esterificação. Já a conversão biológica consiste da digestão anaeróbica, fermentação e hidrólise.

A biomassa pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Os combustíveis sólidos são utilizados em ciclos a vapor para geração de calor, os combustíveis líquidos podem ser utilizados em processos de combustão interna, externa ou em turbinas a gás; os gasosos são utilizados em turbinas a gás para geração de eletricidade.

As rotas tecnológicas de conversão da biomassa são bem representadas na Fig. (1) abaixo. Deve ser, porém, lembrado que existem ainda as tecnologias de densificação que não estão citadas na figura.

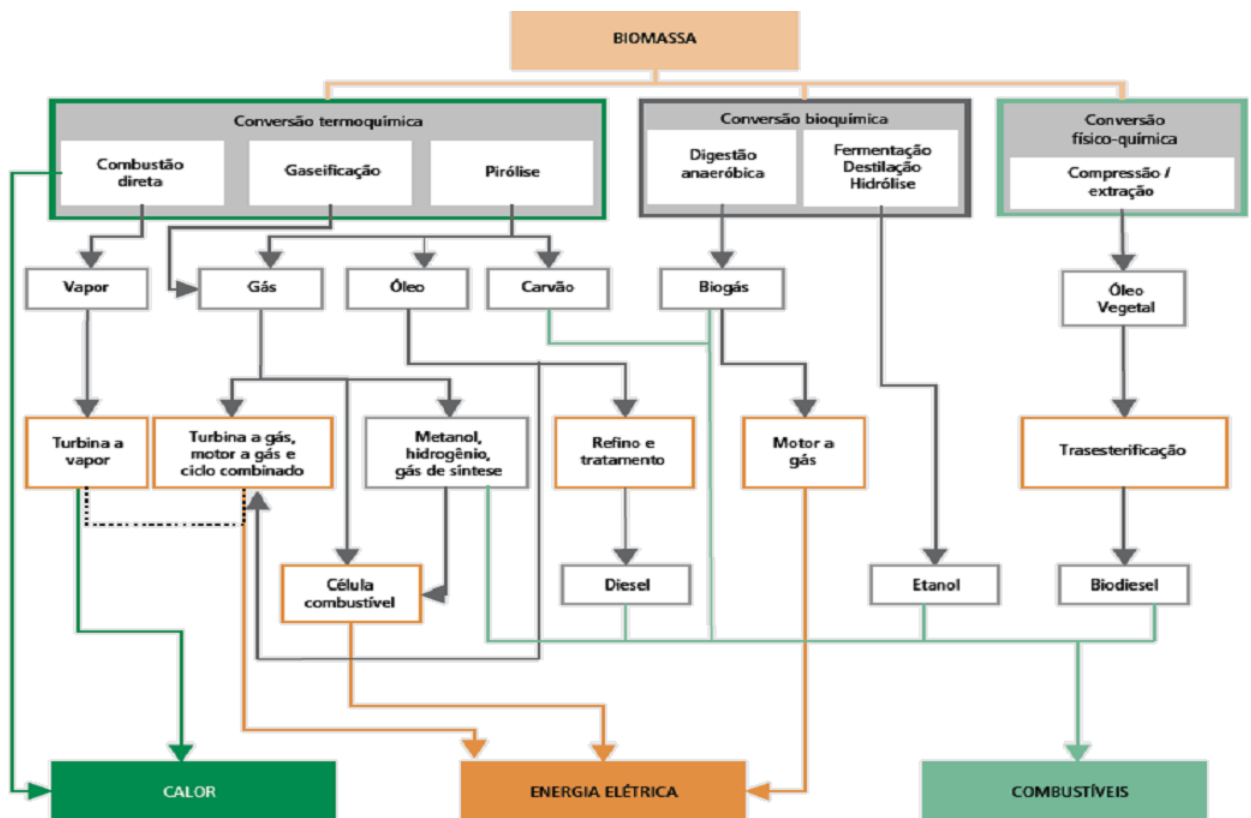


Figura 1- Rotas Tecnológicas
 Fonte: adaptado de Larkin et al (2004)

2.2.1 TECNOLOGIAS DE DENSIFICAÇÃO

Antes de a biomassa ser realmente transformada, é comum ser feito um processo de densificação para diminuir custos de transporte ou mesmo tornar mais eficiente a sua queima.

A densificação da biomassa pode ser realizada mecanicamente apenas ou aliada a um aquecimento e tem por objetivo aumentar a densidade da biomassa para facilidade de manuseio e menores custos de transporte, aumentar a eficiência energética da biomassa para combustível e/ou diminuir a umidade melhorando o seu poder calorífico.

Os métodos de densificação mais utilizados para fins posteriores de geração de energia são a peletização, briquetagem e torrefação.

- Peletização

A peletização consiste numa compactação da biomassa a altas pressões com o intuito de obter os chamados “pellets”.



Figura 2 – Pellets
Fonte: Site PolishPellets

Os "pellets" são cilíndricos, de pequenas dimensões (diâmetro de 5 a 18 mm e comprimento até 40 mm). (Bezzon, 2006)

Para a peletização é necessária uma secagem da biomassa, exigindo-se umidade entre 15 e 20% b.u.¹ Após a secagem, o processo ocorre em uma prensa. Há três tipos de prensa que podem ser utilizadas: prensa de pistão com acionamento mecânico ou hidráulico, prensa de matriz com matriz anular ou em forma de disco e prensa de extrusão. A prensa mais utilizada é a prensa de matriz anular. Nela, a biomassa é comprimida, na prensa com matriz anular, entre um cilindro e um anel com furos radiais. (Bezzon, 2006)

¹ Base úmida (b.u.)

b.u. = água / (água + matéria seca)

em transações comerciais são normalmente expressas em porcentagem:

%b.u. = (água / (água + matéria seca))*100

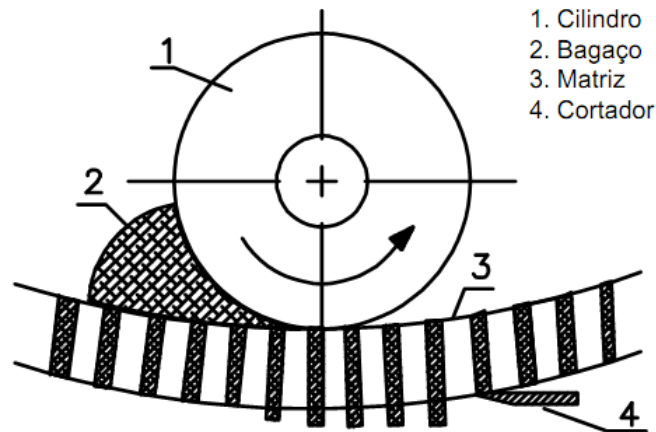


Figura 3- Esquema da prensa com matriz anular
Fonte: Copersucar, 1983

- Briquetagem

A briquetagem é o processo mais usado para densificação de biomassa para obtenção de combustíveis sólidos. A biomassa, nesse processo, é comprimida resultando o chamado “briquete”, que geralmente é cilíndrico com diâmetro de 4 a 10 cm e comprimento de 10 a 40 cm. (Bezzon, 2006)

Com o objetivo da redução no consumo de energia na prensagem, frequentemente é realizado o pré-aquecimento do resíduo, reduzindo a umidade e o esforço na prensagem. Os produtos obtidos são briquetes torrefados (pré-pirolisados) com teores de voláteis e carbono fixo próximos aos do insumo original e com poder calorífico ligeiramente superior (Zhanbin, 2003).

Os briquetes a quente podem substituir a lenha em suas diversas aplicações. Através de pirólise, pode-se transformá-los num coque vegetal consistente, de formas e dimensões variadas, com a possibilidade de substituir em parte o carvão vegetal e coque metalúrgico importado em siderurgias e em outras aplicações energéticas. (Bezzon, 2006)

A briquetagem pode ser realizada com ou sem aglutinante. Os aglutinantes são utilizados quando o material não possui resistência à compressão e ao impacto, após a compactação. Os aglutinantes resultam em maior adesão das partículas.

Na aplicação da pressão externa ao material a ser briquetado, podem ser utilizados três processos:

- Briquetagem em prensas de rolos (Fig. 4), onde o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície, de tamanho e forma adequados, rigidamente ligados entre si, girando com a mesma velocidade de rotação, todavia em sentidos contrários;

- Briquetagem por extrusão contínua;
- Briquetagem em prensas hidráulicas, em que os moldes são preenchidos de forma intermitente. (Carvalho & Brinck, 2004)

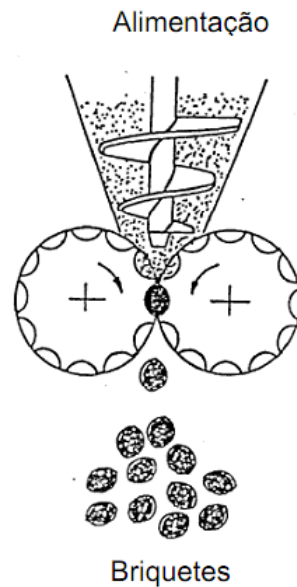


Figura 4- Esquema de briquetagem
Fonte: Bezzon (2006)

A briquetagem pode ser feita a quente, a temperaturas de pré-pirólise – 200 a 270°C – para que a pressão exercida para conseguir uma consistência satisfatória seja menor, além de diminuir a umidade do material.

A briquetagem também pode ser feita a frio, de modo a obter aglomerados que devem apresentar resistência adequada para manuseio/movimentação e estocagem.

Um exemplo de extrusora a quente, um sistema que exerce pressão pela rotação de rosca sem fim, é utilizado no sudeste asiático, principalmente na Tailândia, para compactar casca de arroz e serragem. Um esquema desse processo é mostrado abaixo na Fig. (5).

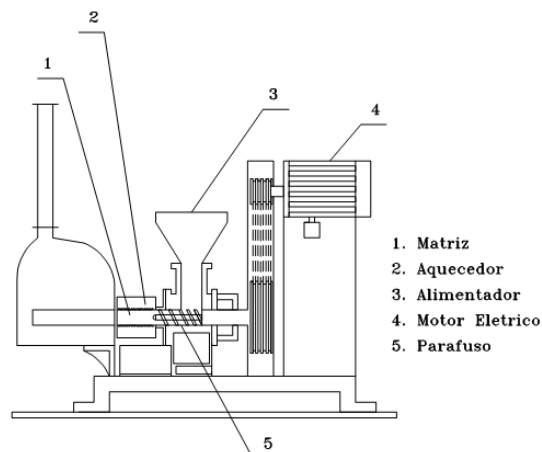


Figura 5 - Esboço de extrusora termoplástica para biomassa
Fonte: Bezzon (2006)

- Torrefação

A torrefação da biomassa consiste no seu aquecimento em temperaturas entre 220 a 330°C, removendo umidade e degradando a hemicelulose com a liberação de compostos de baixo poder calorífico.

O objetivo da torrefação é produzir um material de alta densidade energética (o sólido retém voláteis de maior poder calorífico), hidrofóbico (transformações físico-químicas fazem que o material torrefado não mais absorva água, tendo umidade de aproximadamente 3%) e com bom balanço de durabilidade versus friabilidade (apesar de friável, o material torrefado é menos friável que o carvão mineral, sofrendo, assim, menos perdas na forma de finos) em curto tempo, com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas. Portanto, o material torrefado tem características intermediárias entre a biomassa original e o carvão vegetal. (Bezzon et al., 2006)

O rendimento da torrefação se situa ente 60 a 80%, variando com a temperatura do processo. Felfli (1999) verificou em experimentos que o tempo de residência pouco influencia no poder calorífico resultante, porém o aumento da temperatura gera significativo aumento no poder calorífico, como mostrado na Tab. (1), porém estudos do Grupo Combustíveis Alternativos (GCA) da Unicamp demonstraram que quando a temperatura é aumentada em 22,7% (de 220 a 270°C) o poder calorífico aumenta em média 10%.

Tabela 1– Caracterização de briquetes de resíduos de madeira torreficados
Fonte: Felfli (1999)

Temperatura (°C)	Tempo (hr)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)	PCS (kJ/kg)
220	0,5	75,2	18,2	6,6	20426
	1	74,6	19,0	6,4	20989
	1,5	73,6	19,8	6,6	21065
250	0,5	65,2	27,0	7,8	21209
	1	65,0	27,2	7,8	22061
	1,5	60,0	32,1	7,9	22674
270	0,5	55,7	34,6	9,7	22772
	1	52,1	38,2	9,7	22981
	1,5	41,0	49,2	9,8	23066

É recomendável que a torrefação seja realizada em atmosfera inerte ou redutora para evitar oxidação ou ignição do material.

Os produtos da torrefação podem ser utilizados como combustível industrial – queimado em caldeiras para produzir vapor ou na co-combustão de carvão mineral - combustível doméstico

(apropriado por não produzir muita fumaça), como redutor na indústria metalúrgica ou utilizado para gaseificação.

Na Tab. (2) a seguir são mostrados resultados obtidos por Bourgeois (1985) com a torrefação.

Tabela 2 – Rendimento de madeira torrefeita
Fonte: Bourgeois (1985)

Madeira torrefeita	
Rendimento de conversão	74 a 77%
Poder calorífico	Entre 23 e 24MJ/kg
Teor de carbono fixo	De 28 a 31%

Várias tecnologias de torrefação são citadas na literatura, uma delas é a planta implementada entre 1985 e 1988 na França pela companhia *Le Bois Torréfié du Lot*, com produção anual de 12.000t é esboçada na Fig. (6).

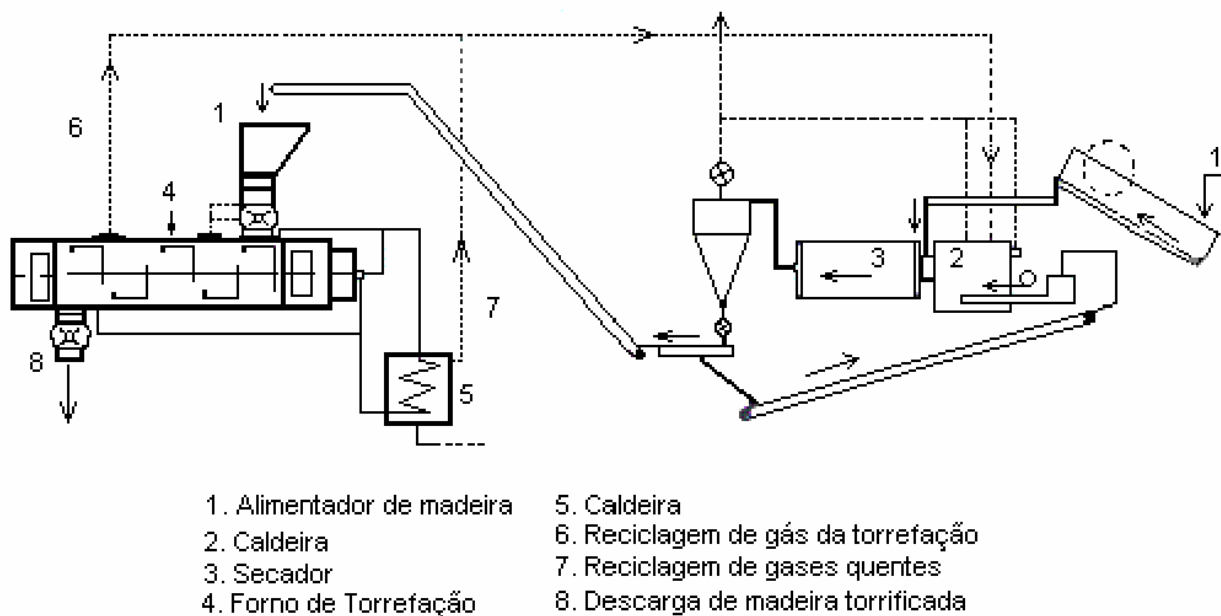


Figura 6 - Planta de torrefação industrial em Laval de Cere
Fonte: Girard & N. Shah (1991)

2.2.2 PIRÓLISE

A pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500⁰C-800⁰C) em atmosfera não oxidante, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções destes compostos dependem do

método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado. (Beenackers & Bridgwater).

Estritamente falando, a pirólise é um processo de termo-conversão de biomassa que antecede à gaseificação.

De acordo com o estudo de Luengo et al. (2006), pode-se dividir o processo de pirólise em três etapas, exemplificadas a seguir por um processo com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e atmosfera de argônio a $80\text{m}/\text{min}$. Na primeira etapa, a biomassa libera umidade (vapor d'água), num processo fortemente endotérmico, que ocorre entre 110°C e 180°C . Na segunda etapa, entre 180°C e 370°C , a hemicelulose é degradada e a lignina e a celulose são parcialmente degradadas. A partir dos 250°C as reações passam a ser exotérmicas. Aos 370°C ocorre uma grande emissão de voláteis, compostos orgânicos, CO , H_2 , CH_4 e CO_2 , ácido acético, metanol e acetona. A terceira etapa, acima de 370°C , a lignina é completamente degradada e ocorre a formação de alcatrões pesados e alguns hidrocarbonetos.

O objetivo da pirólise é transformar a biomassa em um combustível de melhor qualidade e conteúdo energético, que podem ser divididos em três categorias: sólido, líquido e gasoso.

O produto sólido da pirólise é o carvão vegetal; o produto gasoso contém uma mistura gases não condensáveis, incluindo CO , H_2 e CH_4 . Já o produto líquido é chamado líquido pirolenhoso, líquido da pirólise ou licor pirolenhoso e contém duas fases: uma fase aquosa ácida (ácido pirolenhoso) e uma fase oleosa que recebe o nome de alcatrão.

O processo de pirólise é influenciado tanto pelas características da matéria-prima quanto pelos parâmetros do processo. A composição química e a granulometria da biomassa constituem fatores que alteram o produto final da pirólise; assim como a temperatura, tempo de residência, tempo de aquecimento, pressão, o gás utilizado no processo e o uso de catalisadores.

Altas taxas de aquecimento favorecem a formação de frações voláteis (gás e líquido), enquanto incrementos graduais de temperatura favorecem a formação do carvão vegetal, como é exemplificado na Fig. (7).

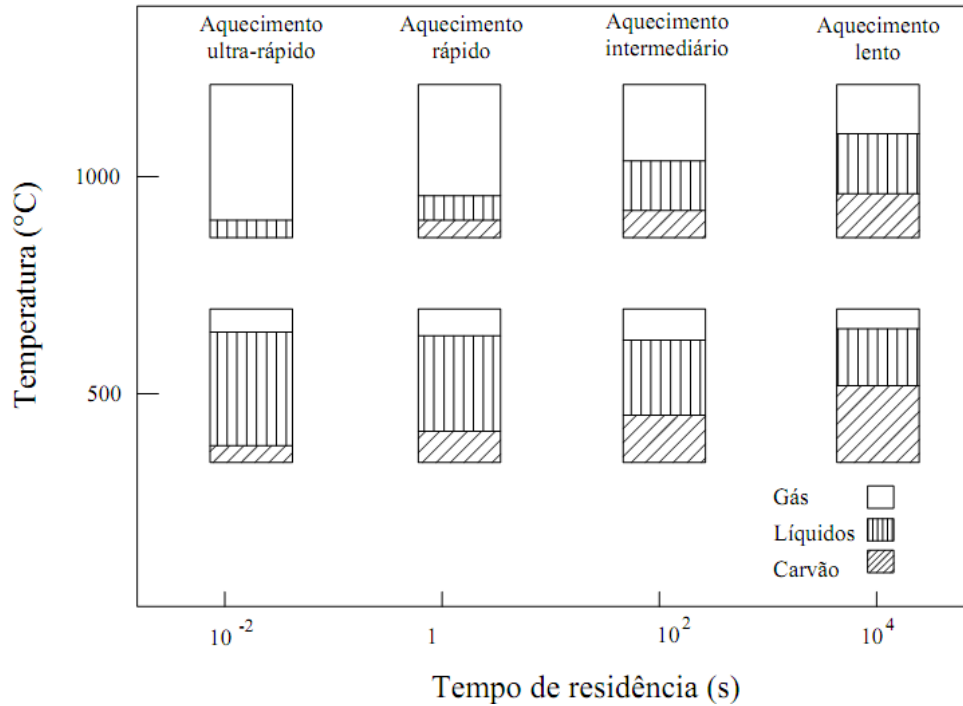


Figura 7 - Produtos da pirólise em função do tempo de residência e temperatura
 Fonte: Mezerette& Girard (1991)

O aumento da pressão no reator pirolítico favorece altos rendimentos de sólidos e reduz consideravelmente as frações gasosas.

Sobre a influência da matéria-prima utilizada, segundo Martin (1989) as características finais dos produtos obtidos também dependem em grande parte das propriedades físico-químicas da matéria-prima utilizada, por exemplo, a maior parte das frações voláteis é formada a partir da celulose e da hemicelulose. Por outro lado a lignina contribui para a formação de cerca de 50% do carbono fixo na fração sólida. Portanto, materiais com alto teor de lignina são mais apropriados para a obtenção de alta concentração de carbono fixo na fração sólida.

O tamanho do grão influencia a taxa de transferência de calor, partículas grandes aumenta a resistência à transferência, como resultado disto, as partículas grandes pirolisam-se abaixo de 400°C (pirólise lenta) e para tempos menores (pirólise rápida) exige-se partículas menores.

A Tab. (3) evidencia a mudança de componentes finais de um mesmo processo de pirólise com a alteração da biomassa utilizada.

Tabela 3 - Rendimentos de Carvão e Voláteis para os diferentes componentes da biomassa, em % em peso
 Fonte: Sánchez (2003)

Componente	Voláteis	Carvão Vegetal
Celulose	97,54	2,46
Lignina	59,37	40,63
Hemicelulose	68,04	31,96

A influência da atmosfera em que ocorre a pirólise foi comentada por Sánchez (2003): os gases emanados durante a decomposição térmica dos materiais lignocelulósicos, é afetada em maior parte por atmosferas reativas (presença de O₂) de tal forma que possa provocar a combustão parcial dos voláteis formados e acelerar as reações de craqueamento em fase gasosa. A presença de ar dilui os gases não condensáveis com N₂ e diminui seu valor calórico. O vapor de água e o dióxido de carbono, a temperaturas suficientemente altas, gaseificam o carvão vegetal e deslocam o equilíbrio da reação de formação de gás de água.

Utilizando como parâmetro o tempo de aquecimento, a pirólise pode ser dividida em duas grandes categorias: pirólise lenta (ou carbonização) e pirólise rápida (onde também se encontram os tipos flash e ultrarrápida). A Tab. (4) mostra os principais parâmetros operacionais de diferentes processos de pirólise, assim como características dos produtos finais.

Tabela 4- Resultados de pirólise modificando os parâmetros de operação
 Fonte: Bridgwater (1991)

Parâmetros de operação	Carbonização	Pirólise lenta	Pirólise rápida	
			Baixa temperatura	Alta temperatura
Temperatura, °C	300-500	400-600	450-600	700-900
Pressão, bar	1,0	0,1-1	1,0	1,0
Capacidade máxima até hoje, ton/h	5,0	1,0	0,05	0,10
Produtos (base seca)				
Gás: produção, % massa PCS, MJ/Nm ³	até 50 3-6	até 60 5-10	até 30 10-20	até 80 15-20
Líquido: produção, % massa PCS, MJ/kg	até 25 20	até 30 20	até 70 24	até 20 22
Sólido: produção, % massa PCS, MJ/kg	até 40 30	até 30 30	até 15 30	até 15 30
Características do combustível				
Tamanho partículas, mm	qualquer	5-50	menor de 1	menor de 0,5
Teor de umidade	qualquer	baixa	muito baixa	muito baixa

- Carbonização

A carbonização da madeira é o mais antigo dos tratamentos térmicos de biomassas. A madeira, queimada em ambientes fechados, se tornava preta e friável, produzindo um combustível que não produzia fumaça nem chama e gerava um calor mais intenso que a própria madeira. Começou-se assim, a produção de carvão vegetal para utilização como fonte de energia nas habitações sem enchê-las de fumaça (Juvillar, 1980).

Também chamada de pirólise lenta, a carbonização é caracterizada por baixas temperaturas e longos tempos de residência, favorecendo a produção de carvão vegetal.

- Pirólise Rápida

A pirólise rápida ocorre com elevadas taxas de aquecimento, baixo tempo de residência no reator e baixo tempo de aquecimento. A fase gás tem baixo tempo de residência no reator e os vapores isentos de sólidos carbonosos são rapidamente resfriados. A pirólise rápida é classificada em pirólise rápida, "flash" e ultrarrápida de acordo com as taxas de aquecimento e tempos de residência empregados.

O produto principal proveniente da pirólise rápida é o bio-óleo, já seus coprodutos são o carvão vegetal e uma mistura de gases. O carvão vegetal pode ser utilizado em sistemas industriais médios ou pequenos, por ser fonte de material carbonoso de baixo custo; já a mistura de gases pode ser reaproveitada como combustível no próprio processo de pirólise, por se tratar de uma quantidade pequena de gás.

A queima do bio-óleo apresenta eficiência teórica de 65 a 70% (base poder calorífico inferior dos energéticos), sendo menor somente que sistemas eficientes de combustão direta ou a queima do gás combustível produto da gaseificação. (Cortéz et al., 2006)

O bio-óleo pode ter diversas aplicações, como combustível líquido, produtos químicos refinados e geração de eletricidade.

Provavelmente a mais promissora das aplicações do bio-óleo é como substituinte do fenol petroquímico em resinas fenólicas. A fração fenólica do alcatrão ou bio-óleo pode substituir o fenol petroquímico na formulação de resinas fenólicas em até 50% em massa. (Cortéz et al., 2006)

Os principais problemas do uso de bio-óleo como combustível são a baixa volatilidade, a alta viscosidade, formação de coque e corrosividade. Esses problemas limitam o uso de bio-óleo a aplicações estáticas. Para queima em motores da diesel as principais dificuldades são a difícil ignição, formação de coque e corrosividade. O bio-óleo tem sido usado com sucesso em

caldeiras e tem mostrado potencial para uso em motores a diesel e turbinas. (Czernick & Bridgwater, 2004).

Diversas frações obtidas a partir dos bio-óleos leves da pirólise rápida de biomassa encontram muitas oportunidades imediatas de aplicação e, por isso, este processo de pirólise é considerado o mais avançado, importante e de maior atrativo comercial. (Bridgwater, 2002)

Além disso, a pirólise rápida é atrativa pela maior facilidade que se pode estocar, transportar e manusear o líquido com um menor custo do que a biomassa sólida, que é menos densa.

2.2.3 GASEIFICAÇÃO

Gaseificação é um processo bastante antigo que consiste na oxidação parcial de combustível sólido a altas temperaturas para obtenção de gás energético, com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e também que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos. (Sánchez et al., 2006)

O gás produto desse processo, o gás de síntese, pode ser utilizado como combustível em motores e turbinas para geração de potência, redutor direto em fornos siderúrgicos, na geração direta de calor ou matéria-prima para síntese química da amônia e metano. Os combustíveis gasosos têm a vantagem de poderem ser distribuídos facilmente, sua combustão pode ser amplamente controlada a fim de se obter alta eficiência, podem queimar automaticamente, são queimados com baixa emissão de poluentes e não necessitam grandes espaços de armazenagem. (Milne, 1981)

Um processo ideal de gasificação tem características tais como: gás combustível limpo e de alta qualidade produzido a partir de vários tipos de combustíveis, alta eficiência num processo que não exija atenção constante, resposta rápida a alterações de carga, barato e durável; porém num sistema real esses fatores são conflitantes e devem ser equilibrados para obtenção de resultado mais apropriado.

Uma instalação de gaseificação é constituída por:

- pré-processamento: estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado;
- gaseificador, dotado de seção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás;
- tratamento do gás, com resfriamento e limpeza;
- sistema de controle, e
- tratamento dos resíduos, com disposição adequada.

Já o processo de gaseificação pode ser sub-dividido em várias etapas, que podem ocorrer em diferentes partes do gaseificador ou em todo ele, dependendo do tipo de gaseificador, de maneira simultânea:

- Etapa de pirólise ou decomposição térmica, a temperaturas próximas de 600°C.
- Oxidação de parte do carbono fixo do combustível.
- Gaseificação propriamente dita, incluindo reações heterogêneas, entre os gases e o coque residual, e reações homogêneas entre os produtos já formados.
- Craqueamento do alcatrão – destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO₂, CH₄ e outros gases.
- Oxidação parcial dos produtos da pirólise.

Os tipos de processos de gaseificação podem ser classificados como mostra a Fig. (8).

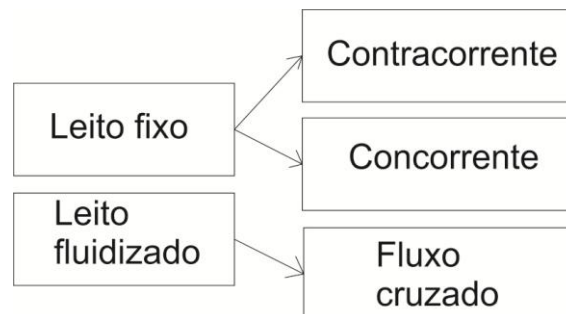


Figura 8 - Tipos de processos de gaseificação

Além destes gaseificadores mais difundidos, uma variedade de tipos vem sendo desenvolvida ao longo dos anos. No século XIX apareceram gaseificadores de fluxo duplo, que gaseificavam dois combustíveis diferentes: o primeiro era um combustível com alto teor de alcatrão, que produzia um gás com impurezas que era utilizado na gaseificação de carvão vegetal limpo, na segunda unidade. Têm sido produzidos também gaseificadores com duas zonas de combustão no mesmo cilindro (Kuramoto et al., 1982), e vários métodos foram desenvolvidos para se extrair os gases de pirólise e reinjetá-los na zona de combustão, propiciando o craqueamento dos alcatrão (Judd et al., 1983).

- Leito Fluidizado

Para entender o fenômeno da fluidização, imagine uma massa de partículas acomodada sobre uma placa ou tela perfurada, formando um leito de seção transversal circular ou retangular. Agora imagine uma corrente gasosa atravessando esse leito de partículas no sentido ascendente, como se mostra na Fig. (9). (Nitz et al., 2008)

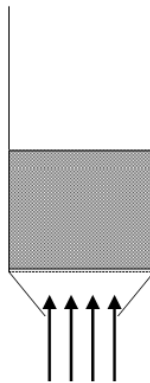


Figura 9 - Leito de partículas percolado por uma corrente gasosa ascendente
Fonte: Nitz e Guardani (2008)

Com uma baixa velocidade do gás, ele escoar nos espaços entre as partículas, sem promover movimentação do material— é uma simples percolação e o leito permanece fixo. À medida que se aumenta a velocidade do gás, as partículas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração — tem-se nesse momento um leito expandido. Com velocidade ainda maior, atinge-se uma condição em que a soma das forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente igualam-se ao peso das partículas. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o que se chama de leito fluidizado. À velocidade do gás nessa condição dá-se o nome de mínima velocidade de fluidização, que é a velocidade correspondente ao regime de fluidização incipiente. (Kunii & Levenspiel, 1991; Gupta & Sathiyamoorthy, 1999).

Continuando-se o processo de aumento da velocidade do gás, a fluidização borbulhante é o regime que se observa após a fluidização incipiente. No caso de partículas de pequeno tamanho, com densidade geralmente menor do que $1,4 \text{ g/cm}^3$, ocorre uma expansão considerável do leito antes de surgirem as bolhas que caracterizam a fluidização borbulhante. No caso de partículas mais densas, entre $1,4 \text{ g/cm}^3$ e 4 g/cm^3 , a expansão do leito não vai muito além daquela adquirida na condição de fluidização incipiente e as bolhas já surgem com a velocidade de mínima fluidização. (Geldart, 1973; Kunii & Levenspiel, 1991)

- Gaseificação contracorrente

Esse tipo de gaseificador é o mais simples existente e é assim chamado porque o fluxo de ar (ou oxigênio) é contrário ao fluxo da biomassa. A biomassa é introduzida no topo, enquanto o ar, introduzido na base, realiza um movimento ascendente (Fig. 10).

O gaseificador contracorrente apresenta alta eficiência térmica e simplicidade, porém produz um gás extremamente impuro, pois os alcatrão e outros produtos de pirólise são levados para cima antes de serem craqueados e podem até incrustar tubulações. Alguns gaseificadores,

particularmente de grande porte, possuem uma câmara acima do topo do combustível, para reduzir a velocidade do gás e permitir a condensação de voláteis dentro do próprio gaseificador. As impurezas do gás produzido impede sua utilização em motores de combustão interna e restringe sua utilização na queima direta em fornos e caldeiras.

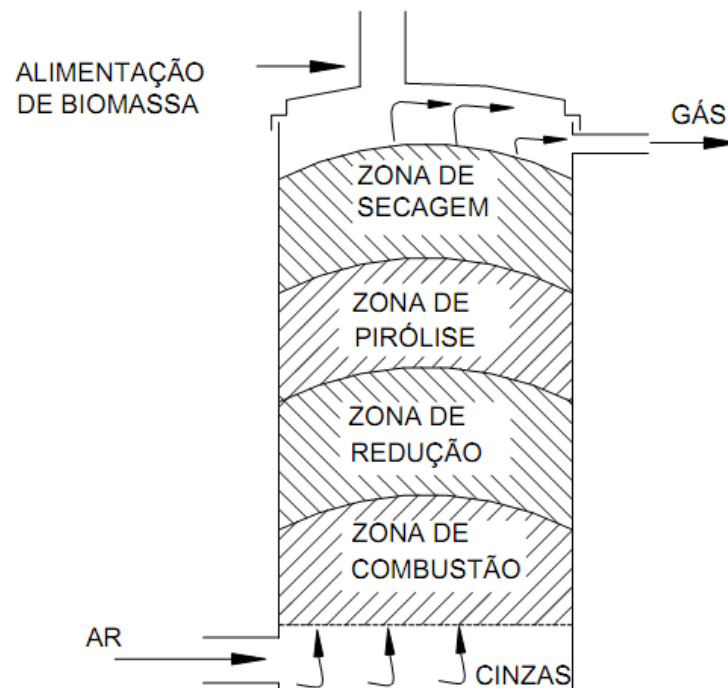


Figura 10 - Gaseificador contracorrente
Fonte: Sánchez et al. (2006)

- Gaseificação concorrente

O gaseificador tipo concorrente é o mais difundido e é assim chamado porque o fluxo de ar tem a mesma direção do fluxo do gás produzido, no sentido descendente (Fig. 11).

Ele é caracterizado pelo alto craqueamento do alcatrão (até 99,9%) e voláteis ao passarem pela zona e combustão, porém o gás liberado tende a apresentar quantidades significativas de cinzas e fuligem por não passarem pelo combustível e serem, assim, filtrados - diferente do gaseificador contracorrente. O ar de saída tem temperaturas mais altas (cerca de 700°C) por não haver muita troca de calor com as áreas de secagem e pirólise.

A maioria desses gaseificadores apresenta uma diminuição do diâmetro (ou garganta) no local onde o ar é injetado para garantir uma distribuição uniforme e adequação da temperatura nessa região.

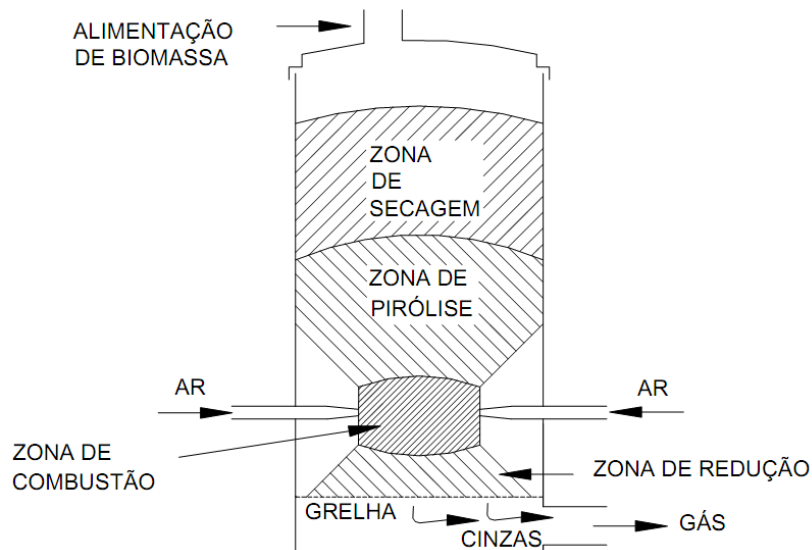


Figura 11- Gaseificador concorrente
 Fonte: Sánchez et al. (2006)

- Gaseificação fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado, o ar é injetado à mesma altura em que o gás é retirado.

Existe uma taxa de injeção de ar maior do que nos outros tipos de gaseificadores, criando uma zona de combustão de temperatura extremamente alta e concentrada, assim como a zona de redução, em um pequeno volume no centro do gaseificador (Fig. 12).

Esse processo resulta em um gás com características intermediárias entre os gaseificadores concorrentes e contracorrentes, tem como vantagens a simplicidade, rápida resposta pela mudança de carga e o peso reduzido, desvantagens são a grande sensibilidade às variações na composição e umidade do combustível, requerendo sempre carvão vegetal limpo e seco.

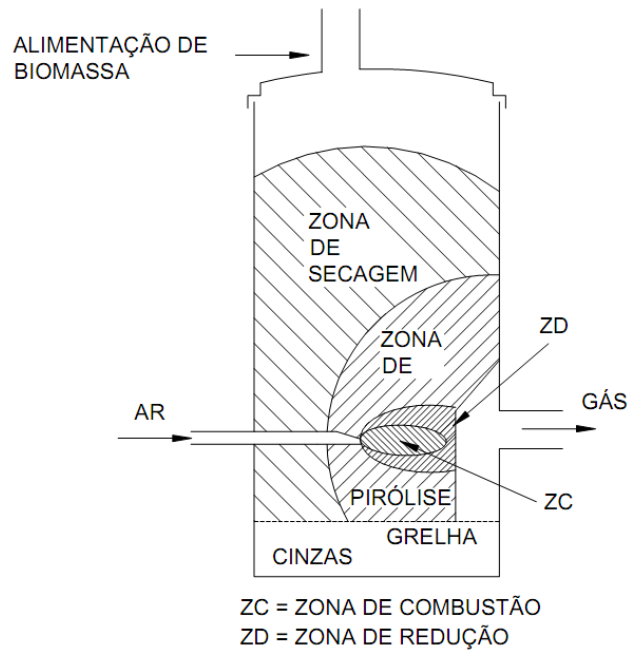


Figura 12- Gaseificador de fluxo cruzado
Fonte: Sánchez et al. (2006)

Esse tipo de gaseificador apresenta partículas de combustível suspensas pelo ar fluidizado e imersas num leito de partículas inertes; como areia, cinzas ou alumina (Fig. 13). A fluidização pode ocorrer em leito borbulhante, com velocidade de 1 m/s, ou circulante, com velocidades de 7 a 10 m/s. No leito circulante, as partículas arrastadas são coletadas e retornadas ao leito, aumentando a taxa de produção e troca de calor do processo.

O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar (GLP, carvão vegetal, etc.) e quando a temperatura for suficientemente alta o combustível é introduzido dando início ao processo de gaseificação. (Sánchez et al., 2006)

Gaseificadores de leito fluidizante apresentam alta velocidade de reação gás-sólido, ocasionando alta transferência de calor e temperaturas mais uniformes na câmara de combustão. Os voláteis ficam em contato com as partículas do leito, contribuindo para reações mais completas com produto mais limpo. Para operações sem alcatrão exigem-se temperaturas entre 1100°C e 1200°C, tendo sido encontrados bons resultados já com 900°C.

Eles podem ser operados a temperaturas mais baixas, porém com maiores quantidades de alcatrão no gás produzido. A utilização de pressão maior que a atmosférica torna mais complexos os sistemas, entretanto a capacidade do gaseificador é aumentada.

Gaseificadores de leito fluidizante tem operação mais complicada que os de leito fixo pois não apresentam resposta automática para mudanças de consumo do gás produzido, sendo utilizados na maioria das vezes em grandes instalações.

O gás resultante apresenta quantidades não queimadas de carbono, um pouco de alcatrão e parte das cinzas pertencentes ao combustível original, sendo necessária uma etapa de limpeza para remoção de tais partículas.

Esse sistema é considerado promissor por operar com combustíveis de difícil gaseificação pois apresentam alta umidade, granulometria (funciona com dimensões máximas de 5 a 10cm), baixa densidade; mas são combustíveis de baixo preço e alta disponibilidade, como cana-de-açúcar e casca de arroz.

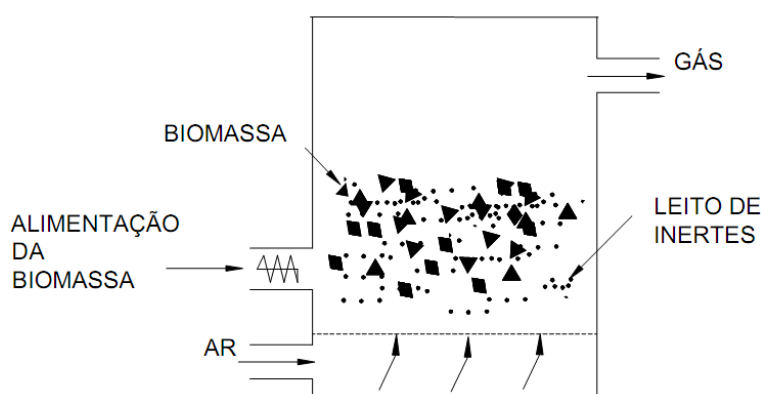


Figura 13– Gaseificador de leito fluidizado
Fonte: Sánchez et al. (2006)

Estudos realizados sobre os diferentes tipos de gaseificadores são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 5 - Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores para biomassa
Fonte: Bridgwater (1991)

Gaseificador	Composição do gás, % vol. base seca					PCS MJ/Nm ³	Qualidade do gás*
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		
Leito Fluidizado	9	14	20	7	50	5,4	Média
Contracorrente	11	24	9	3	53	5,5	Pobre
Concorrente	17	21	13	1	48	5,7	Boa

* Particulados e alcatrão.

2.2.4 COMBUSTÃO DIRETA

A combustão direta consiste na queima da biomassa sem haver antes uma transformação química. Esse processo é feito com a utilização de caldeiras.

Caldeira é o nome popular dado aos equipamentos geradores de vapor, cuja aplicação tem sido ampla no meio industrial e também na geração de energia elétrica nas chamadas centrais termelétricas. Portanto, as atividades que necessitam de vapor para o seu funcionamento têm a caldeira como componente essencial para sua geração. Para a produção de potência, o vapor é utilizado em máquinas alternativas e em turbinas, sendo que nessas o vapor é em geral superaquecido. (Altafani, 2002).

A Fig. (14) traz a foto de uma caldeira industrial comercializada.



Figura 14 - Exemplo de uma caldeira
 Fonte: <<http://www.sotofilhos.com.br/caldeira.html>>

Sobre as caldeiras utilizadas para bagaço de cana, Prieto (1982) as classifica de acordo com a Tab. (6).

Tabela 6- Classificação das caldeiras para a queima de bagaço de cana
 Fonte: Prieto (1982)

Critério	Classificação
Pelo método de combustão	Queima em pilha ou camada (leito fixo)
	Queima em suspensão
Pelas características construtivas	Caldeiras de tubos retos
	Caldeiras de tubos curvados com vários balões (Tipo Stirling)
	Caldeiras convectivas com dois balões
	Caldeiras radiantes com um passe de gás

Tabela 7 - Dados e parâmetros mais importantes para diferentes tipos de caldeiras de bagaço
 Fonte: (Prieto, 1982, Perez, 1985 e Barroso, 1988)

Dados e Parâmetros	Tipos de caldeiras			
	de tubos retos	de tubos curvos e vários balões	convectivas de dois balões	radiantes
Tipo de fornalha	Ferradura – grelha inclinada	Ferradura - grelha basculante	Grelha basculante	Grelha basculante, grelhas comportas
Eficiência	50-60%	50-70%	70-80%	80-87%
Pressão de vapor (MPa)	1,8	1,8-3,0	1,8-14,0	7,0-13,0
Temperatura do vapor (°C)	300	320	320-510	400-549
Geração de vapor máx. (t/h)	35	60	80	120-300

Essas classificações exemplificam a vasta gama de tipos e modelos de caldeiras. Para cada aplicação deve ser estudado qual o tipo mais vantajoso, levando em consideração a magnitude do trabalho a ser realizado pela caldeira, sua eficiência e os custos de implantação envolvidos.

Como não é objetivo desse trabalho fazer o selecionamento da caldeira para uma usina de queima de biomassa esse assunto não será mais detalhado.

- Fornalhas

Fornalhas são dispositivos projetados para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento de sua energia térmica liberada na combustão, com o máximo de rendimento na conversão da energia química do combustível em energia térmica. As fornalhas podem ser classificadas como de fogo direto, em que os gases resultantes da combustão são misturados com o ar ambiente e insuflados por um ventilador, diretamente na massa de grãos; e de fogo indireto, em que os gases provenientes da combustão passam por um trocador de calor que aquece o ar de secagem. (Melo et al., 2010)

O correto dimensionamento de uma fornalha envolve parâmetros como: o volume da câmara de combustão, a área da grelha ou da célula de queima e as aberturas de entrada de ar. O tamanho e a forma de uma fornalha dependem da natureza do combustível, dos dispositivos de queima e da quantidade de calor a ser liberado em um intervalo de tempo, pois cada combustível apresenta propriedades distintas.



Figura 15- Fornalha para queima de biomassa com alimentador automático.
(1) Alimentador; (2) Biomassa na câmara de combustão; (3) Bandeja de cinzas; (4) Gás aquecido devido à combustão.

2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia termelétrica pode ser dividida da seguinte maneira:

1. A energia química do combustível é transformada em calor através da queima do combustível;
2. O calor produzido é transformado em trabalho mecânico por uma máquina térmica;
3. O trabalho mecânico, produzido pela máquina térmica, é transformado em energia elétrica pelo gerador elétrico.

A geração de energia, depois de processos como a pirólise e gaseificação, pode acontecer por turbinas a vapor ou a gás. Ambas serão mostradas a seguir.

2.3.1 TURBINAS A VAPOR

Atualmente, a geração de energia elétrica a partir do vapor baseia-se, conforme mostra a abaixo, nos seguintes equipamentos:

- Caldeira;

- Turbina;
- Condensador;
- Bomba.

O fluido de trabalho, em máquinas térmicas a vapor, é completamente separado do ar e do combustível. Este fluido, comumente a água, é aquecido na caldeira, através da troca de calor com o calor gerado por combustão, e transformado em vapor. O vapor passa pela turbina e volta a ser líquido num condensador. Uma bomba o leva de volta à caldeira, recomeçando o ciclo (Fig. 16).

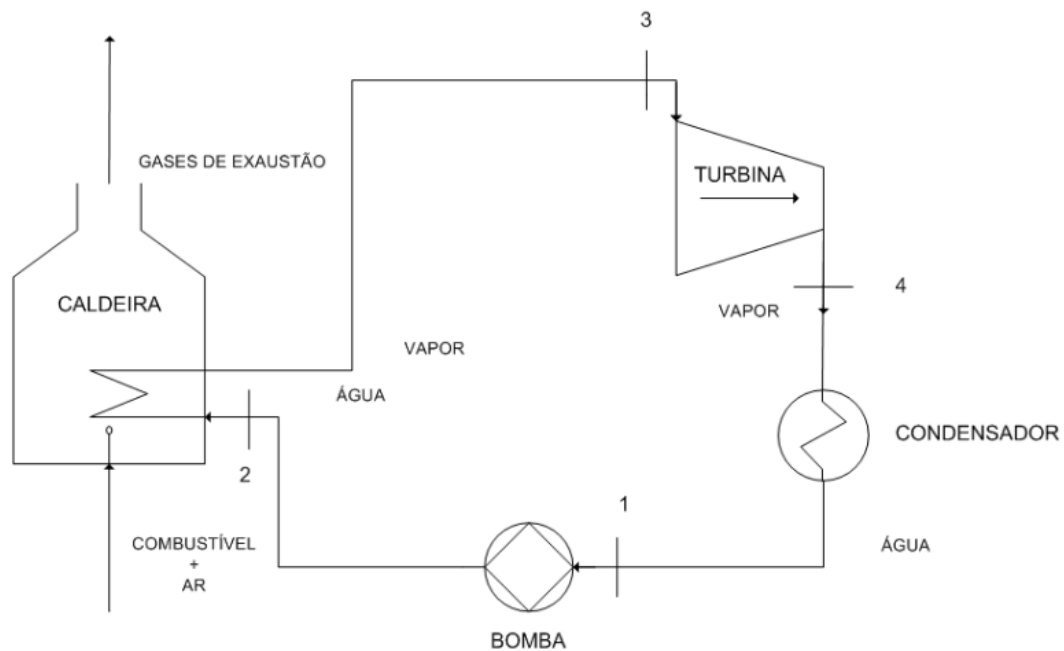


Figura 16 – Máquina térmica a vapor

Fonte: Site <http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/gera_vapor.php>

2.3.2 TURBINAS A GÁS

Toda turbina a gás consiste basicamente em um compressor, uma câmara de combustão e a turbina, conforme mostra a Fig. (17). O compressor comprime o ar atmosférico até à câmara de combustão utilizando parte do trabalho mecânico da turbina. Por sua vez, o combustível queimado na câmara de combustão aumenta a temperatura dos gases. Estes gases aquecidos entram na turbina e se expandem realizando trabalho mecânico, que aciona o compressor e a carga. Finalmente, os gases da saída da turbina são jogados de volta para a atmosfera que os esfria.

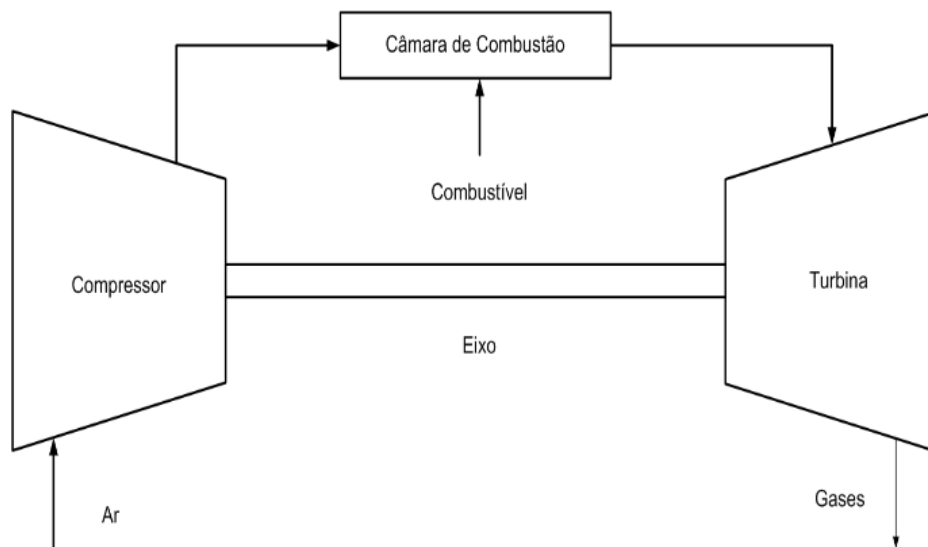


Figura 17 - Máquina térmica a gás
 Fonte: <http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/turbina_gas.php>

2.4 MERCADO DE CARBONO

Fará parte deste trabalho calcular custos ambientais da emissão de carbono, tanto pelo transporte da biomassa, como pela energia utilizada durante o processo de densificação. Para quantificar financeiramente o custo do carbono, serão utilizados preços do carbono no Mercado de Carbono.

O Homem lança mais de 35,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) por ano na atmosfera, o principal gás causador do aquecimento global. Para diminuir estes números, foram criados projetos de redução de emissões de gases do efeito estufa. (Instituto Carbono Brasil)

Estes projetos, após serem avaliados segundo metodologias aprovadas pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, na sigla em inglês), podem gerar créditos de carbono e serem utilizados por países desenvolvidos integrantes do Anexo 1 (países que devem diminuir suas emissões de dióxido de carbono) do Protocolo de Quioto para alcançar suas metas de redução das emissões de gases do efeito estufa. O Protocolo de Quioto institui o mercado de carbono como um dos mecanismos para reduzir os custos no corte das emissões, assim como o Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e a Implementação Conjunta. (Instituto Carbono Brasil).

Atualmente o comércio de crédito de carbono está movimentando a economia de grandes países. O Brasil, que já ocupou o primeiro lugar no ranking dos principais produtores de projetos, acabou perdendo o lugar para a China e a Índia. Esses dois países em conjunto com a Austrália, Coreia do Sul e Japão produzem quase metade dos gases causadores do aquecimento

global. Segundo especialistas, o potencial brasileiro é muito grande, existindo uma grande expectativa nesse novo mercado. (Instituto Carbono Brasil)

2.4.1 Crédito de carbono

Créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificados emitidos para que agente que reduziu a sua emissão de gases do efeito estufa (GEE). Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) corresponde a um crédito de carbono. Este crédito pode ser negociado no mercado internacional. A redução da emissão de outros gases, igualmente geradores do efeito estufa, também pode ser convertida em créditos de carbono, utilizando-se o conceito de Carbono Equivalente. Comprar créditos de carbono no mercado corresponde aproximadamente a comprar uma permissão para emitir GEE. O preço dessa permissão, negociado no mercado, deve ser necessariamente inferior ao da multa que o emissor deveria pagar ao poder público, por emitir GEE. Para o emissor, portanto, comprar créditos de carbono no mercado significa, na prática, obter um desconto sobre a multa devida. (GBC Internacional)

O Comércio Internacional de Emissões, instituído pelo Protocolo de Quioto, permite que os países desenvolvidos comprem ou vendam cotas de emissão de outros países. (Abdo, 2004)

Além do Protocolo de Quioto, a União Europeia também assinou, em 2003, a Diretiva Europeia que tem como principal objetivo a redução de 8% da emissão dos gases de efeito estufa na Europa no período de 2008 a 2012, comparado aos níveis de 1990, superando os níveis previstos no Protocolo de Quioto e tendo como principal instrumento o Comércio de Cotas de Emissão, que limita a quantidade máxima de “permissões” de emissões. Cada “permissão” dá à empresa que a recebe o direito de emitir 1 tonelada de CO₂ por ano. (Abdo, 2004)

O crédito de carbono é negociado no Mercado de Carbono, e não apresenta valores fixos. O que pode ser exemplificado pelas notícias do mês de maio deste ano pelo Instituto Carbono Brasil: “Os valores do carbono no mercado europeu fecharam a semana passada no mesmo nível da semana anterior. As permissões de Emissão da União Europeia (EUAs) para entrega em dezembro de 2011 ficaram em € 16,83/t e as Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) de 2011 estavam sendo negociadas entre € 12,5/t e 13/t. O nível de emissão de RCEs foi alto, com 5,6 milhões de toneladas emitidas.”

2.4.2 Carbono equivalente

O carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas do GEE (gases do efeito estufa) pelo seu potencial de aquecimento global.

Potencial de Aquecimento Global (em inglês, *Global Warming Potential*) ou Fator de Aquecimento Global (em inglês, *Global Warming Factor*) é uma medida de como uma determinada quantidade de gás do efeito estufa (GEE) contribui para o aquecimento global. O GWP é uma medida relativa que compara o gás em questão com a mesma quantidade de dióxido de carbono (cujo potencial é definido como 1). O Potencial de Aquecimento Global é calculado sobre um intervalo de tempo específico e este valor deve ser declarado para a comparação. (Wikipedia)

O Protocolo de Quioto determina sete gases cujas emissões devem ser reduzidas, a Tab. (8) mostra os gases e seus respectivos valores de potencial de aquecimento global, em um período de 100 anos.

Tabela 8– Gases cujas emissões devem ser reduzidas
Fonte: Site da UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)

Gases	GWP
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido nitroso (N ₂ O)	310
Hidrofluorcarbonetos (HFCs)	140 ~11.700
Perfluorcarbonetos (PFCs)	6.500 ~9.200
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	23.900
Clorofluorcarbonetos (CFCs)*	0

* Gases destruidores da camada de ozônio

Apesar de alguns gases apresentarem valores maiores de GWP do que o CO₂, ele e o metano são os gases que mais contribuem ao efeito estufa, em valor absoluto.

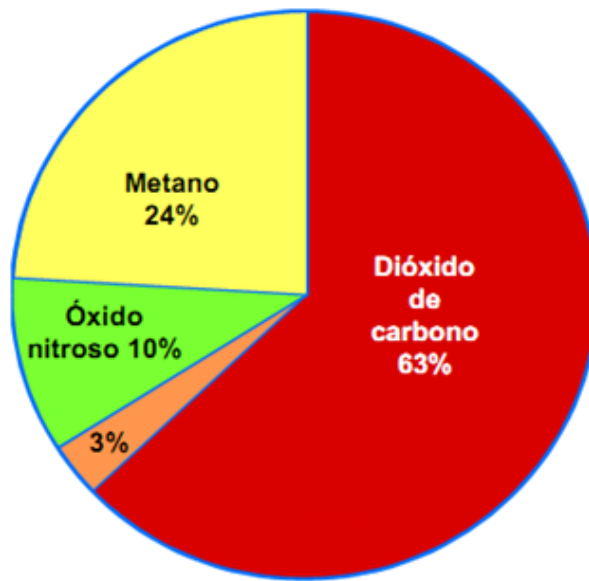


Figura 18 - Contribuição dos gases ao efeito estufa
Fonte: IPCC

2.5 OTIMIZAÇÃO LINEAR

Um dos principais objetivos deste trabalho é realizar a otimização da localização de usinas termelétricas, que utilizarão combustível proveniente de resíduos de madeira. Essa otimização será categorizada como linear. É necessário, para tanto, saber em que consiste otimização linear, e entender sua lógica, para que, posteriormente, possa ser feito o trabalho de encontrar a solução ótima do problema proposto.

A otimização linear é uma técnica de pesquisa operacional. A Pesquisa Operacional é um conjunto de técnicas e métodos matemáticos para auxiliar a tomada de decisões nas operações de organizações. A pesquisa operacional busca sempre a melhor solução possível (solução ótima) que seja consistente com os objetivos da organização como um todo. A busca de uma solução mais adequada entre diversas soluções alternativas traz consigo os elementos de um problema de otimização: um critério de avaliação das soluções alternativas, o qual nos permite dizer que uma solução é “melhor” que outra. A este critério de avaliação chamamos de função objetivo, que buscamos otimizar, ou seja, maximizar ou minimizar. Por outro lado, as soluções alternativas devem ser passíveis de execução indicando a presença de restrições que devem ser respeitadas. (Santos, 2010 e Pereira, 2009)

Um modelo de otimização linear (também conhecido como “programa linear”) envolve a otimização de uma função linear sujeita a restrições lineares de variáveis. Embora funções lineares sejam simples, elas aparecem frequentemente em economia, planejamento de produção, cadeias de dados, determinação de cronogramas, e outras aplicações. (Griva et al., 2009)

Tendo uma função f , chamada função objetivo, definida no conjunto de soluções alternativas, Ω . Um problema de otimização matemática é definido por: $\min f(x), x \in \Omega$. (Santos, 2010)

2.5.1 Representação de problemas

As restrições de programação linear podem ser apresentadas como equações ou inequações. De acordo com Barreto (2010), estas podem ser representadas da forma padrão ou canônica, respectivamente; e ambas podem ser representadas da forma reduzida.

Um exemplo de representação do problema do transporte nas diversas formas é apresentado na Tab. (9).

Tabela 9 – Representação de problemas

Forma canônica	Forma reduzida
Otimizar $z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$	Otimizar

<p>Sujeito a:</p> $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1$ $a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2$ <p style="text-align: center;">...</p> $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m$ <p>Onde $x_1, x_2, x_n \geq 0$</p>	$z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ <p>Sujeito a:</p> $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$ $i = 1, 2, \dots, m$ $x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n$
<p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> - n é o número de variáveis do problema - m é o número de restrições do problema - i é o índice de uma determinada restrição - j é o índice de uma determinada variável - c_j é o coeficiente (constante) da variável x_j da função – objetivo - a_{ij} é o coeficiente (constante) da variável x_i da j-ésima restrição 	

2.5.2 Solução gráfica e Teorema fundamental da programação linear

Modelos de Programação Linear de até três variáveis podem ser resolvidos graficamente. Este tipo de solução não tem aplicação prática, pois os problemas do mundo real têm sempre muito mais variáveis (dezenas, centenas e até milhares). No entanto a solução gráfica nos ajuda a entender os princípios básicos do método analítico, chamado de método Simplex, usado para resolver os modelos de Programação Linear. (Barreto, 2010)

Considere do seguinte exemplo dado por Santos (2010): Queremos saber quais as quantidades ideais de cada ingrediente para fazer uma quantidade de ração de aves, com as necessidades nutricionais atendidas (Tab. 10) e o custo total dos ingredientes seja o menor possível. Temos como ingredientes o milho (A_1) e a farinha de ossos (A_2). Para fazer certa quantidade de ração é necessária certa quantidade de nutrientes, são eles: vitamina A (V_a), vitamina B (V_b) e proteína (V_c). Os ingredientes apresentam esses nutrientes em determinadas unidades (un.).

Tabela 10 – Dados do problema de mistura (ração)

Nutrientes	Ingredientes		Qtde
	A_1	A_2	Mínima
Vitamina A	2	3	7
Vitamina B	3	2	9
Proteína	1	0	1
Custos (R\$/kg)	65	30	

Para misturar as quantidades dos ingredientes e produzir a ração de menor custo possível, atendendo as necessidades de nutrientes, define-se x_1 =quantidade de ingrediente do tipo 1 presente na mistura (un.) e x_2 = quantidade de ingrediente do tipo 2 presente na mistura (un.). O custo mínimo seria nulo se não fossem as quantidades mínimas de nutrientes a serem atendidas (Vitamina A, Vitamina B e Proteína). O objetivo do problema é minimizar o custo total da mistura.

O modelo matemático para a solução do problema está representado na Fig. (19).

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2) &= 65x_1 + 30x_2 \\ 2x_1 + 3x_2 &\geq 7 \\ 3x_1 + 2x_2 &\geq 9 \\ 1x_1 + 0x_2 &\geq 1 \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0. \end{aligned}$$

Figura 19 – Modelo matemático do problema das rações

Como x_1 e x_2 tem que ser ≥ 0 , o ponto ótimo, ou seja, o ponto que maximiza o valor de Z, obedecendo todas as restrições, só pode estar no 1º quadrante. Considerando a 1ª restrição na igualdade, traça-se reta passando pelos pontos (0 , 2,33) e (3,5 , 0). Todos os pontos acima da reta satisfazem a restrição. Faz-se o mesmo para as seguintes restrições, chegando-se ao conjunto de possibilidades totais do problema, o chamado espaço solução.

Para encontrar o ponto ótimo, observa-se a função objetivo: $f = 65x_1 + 30x_2$. Graficamente esta equação representa uma família de retas paralelas, ou seja, para cada valor de f temos uma reta que será paralela a qualquer outra para outro valor de f , inclusive para aquela com o valor ótimo. Como queremos minimizar valor de f , traça-se a paralela mais baixa possível, que toque, pelo menos, um ponto do espaço solução. Este ponto é a solução ótima.

O Teorema Fundamental da Programação Linear diz que: uma vez que todas as equações e/ou inequações envolvidas são lineares, o valor ótimo da função-objetivo só pode ocorrer em um dos vértices da região das restrições. (Nogueira, 2009)

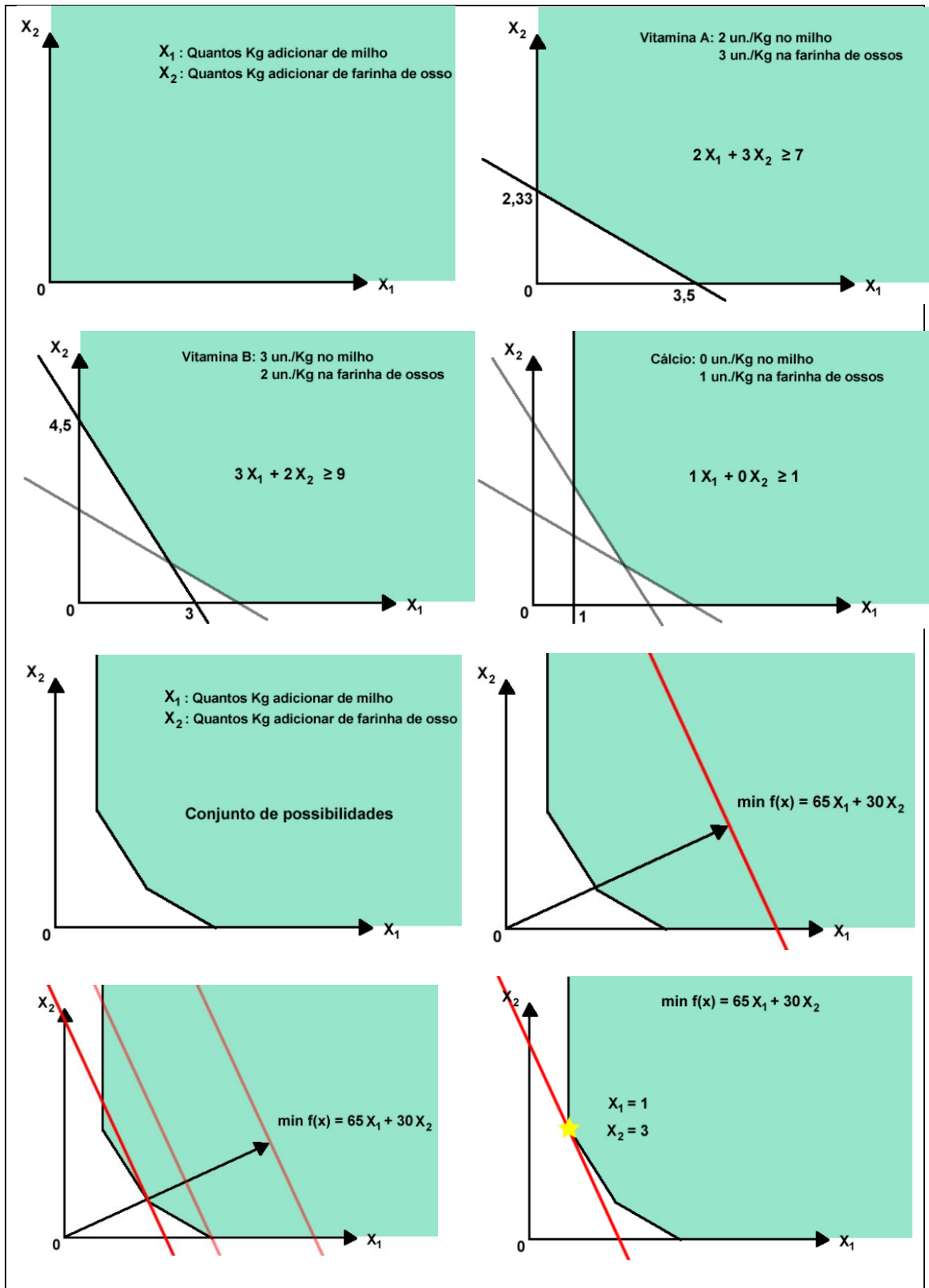


Figura 20 – Solução gráfica do problema das rações
 Fonte: Santos, 2010

2.5.3 Dualidade

Sobre dualidade, modelo primal e dual, e teorema dual, tem-se o que disse Santos (2000).

O termo dualidade refere-se ao fato de que cada modelo de Programação Linear consiste de duas formas. A primeira, ou original, é chamada de primal e a segunda forma do modelo é chamada de dual. Como seria esperado, as propriedades de uma das formas do modelo estão relacionadas com as propriedades da outra. Como resultado disto é possível, dada a solução ótima de uma das formas do modelo, encontrar a solução ótima da outra forma do modelo.

A solução do chamado modelo dual fornece informações significativas sobre as questões econômicas existentes em qualquer modelo de Programação Linear.

- Modelo primal e dual

Consideremos o seguinte par de modelos de Programação Linear:

Tabela 11 – Modelos Primal e Dual

$\begin{aligned}(\text{MAX}) Z &= 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 \\ x_1 + x_2 + 2x_3 &\leq 16 \\ 7x_1 + 5x_2 + 3x_3 &\leq 25 \\ x_1; x_2; x_3 &\geq 0\end{aligned}$	$\begin{aligned}(\text{MIN}) Y &= 16y_1 + 25y_2 \\ y_1 + 7y_2 &\geq 4 \\ y_1 + 5y_2 &\geq 5 \\ 2y_1 + 3y_2 &\geq 9 \\ y_1; y_2 &\geq 0\end{aligned}$
---	--

Chamaremos o 1º modelo de modelo Primal e o 2º modelo de modelo Dual. Poderíamos ter chamado o 2º de primal e aí o 1º, seria o dual.

Observando os dois modelos, reparamos que eles são relacionados. Assim as constantes do lado direito do 1º modelo são os coeficientes da função objetivo do 2º. Os coeficientes da função objetivo do 1º modelo são as constantes do lado direito do 2º. Os coeficientes da 1ª linha do primeiro (1, 1 e 2) são os coeficientes da 1ª coluna do 2º e assim por diante.

Em resumo, fica claro que, dado um dos modelos, podemos construir o outro. Veremos mais adiante em detalhes como fazer isto, ou seja, dado um dos modelos como construir o outro.

- Teorema dual

Suponha que no exemplo acima x_1 , x_2 e x_3 sejam valores praticáveis para o modelo primal e y_1 e y_2 sejam valores praticáveis para o modelo dual. Se multiplicarmos a 1ª restrição do primal por y_1 e a 2ª por y_2 e somarmos as duas, vamos ter:

$$y_1x_1 + y_1x_2 + 2y_1x_3 + 7y_2x_1 + 5y_2x_2 + 3y_2x_3 \leq 16y_1 + 25y_2$$

Se, da mesma forma, multiplicarmos a iésima restrição do dual por x_i e somarmos as 3, teremos:

$$x_1y_1 + 7y_2x_1 + y_1x_2 + 5y_2x_2 + 2y_1x_3 + 3y_2x_3 \geq 4x_1 + 5x_2 + 9x_3$$

Como podemos observar, os lados esquerdos das 2 inequações são iguais e pode-se escrever então:

$$16y_1 + 25y_2 \geq 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 \text{ ou } Y \geq Z$$

Este resultado implica em que o valor da função objetivo de uma solução praticável de um dos modelos é um limite para qualquer outra solução praticável do outro modelo.

Assim, por exemplo, se considerarmos a solução praticável, para o modelo primal, em que $x_1 = 1$, $x_2 = 2$ e $x_3 = 2$, dando um valor igual a 32 para Z e a solução praticável $y_1 = 0$ e $y_2 = 3$ para o dual, dando um valor igual a 75 para Y, que conclusão podemos tirar?

Qualquer solução praticável, inclusive a ótima, para o primal será menor ou igual a 75 e qualquer solução praticável, inclusive a ótima, para o dual será maior ou igual a 32. A conclusão óbvia é que a solução ótima será aquela em que $Z = Y$.

A partir disso pode ser enunciado o Teorema Dual:

No evento em que tanto o modelo dual quanto o primal possuam soluções praticáveis, temos que: $Z^* = Y^*$, ou seja, o valor ótimo dos dois modelos é o mesmo.

Um corolário deste teorema é que se um dos modelos tem solução ilimitada, então o outro modelo não tem solução praticável, pois, caso tivesse, seria uma contradição ao exposto anteriormente.

Logo podemos enunciar o corolário como:

Se um dos modelos tem solução ótima ilimitada (Z^* ou $Y^* = \pm\infty$), então o outro modelo não tem solução praticável.

- Relação entre o primal e o dual

dado um modelo de P.Linear pode-se, através de regras conhecidas, construir o outro modelo. A Tab.(12) abaixo dá as relações existentes entre os dois modelos.

Tabela 12 – Relação entre o primal e o dual

Modelo Primal	Modelo Dual
(MAX) com todas as restrições \leq ou $=$	(MIN) com todas as restrições \geq ou $=$
(MIN) com todas as restrições \geq ou $=$	(MAX) com todas as restrições \leq ou $=$
restrição	variável
variável	restrição
Coefficientes da função objetivo	Constantes do lado direito
Constantes do lado direito	Coefficientes da função objetivo
j-ésima coluna de coeficientes	j-ésima linha de coeficientes
j-ésima linha de coeficientes	j-ésima coluna de coeficientes
j-ésima variável ≥ 0	j-ésima restrição \geq (MIN) ou \leq (MAX)
j-ésima variável irrestrita em sinal	j-ésima restrição com sinal de $=$
j-ésima restrição com sinal \geq ou \leq	j-ésima variável ≥ 0
j-ésima restrição com sinal de $=$	j-ésima variável irrestrita em sinal

- Significado econômico dos valores ótimos das variáveis do Modelo Dual

O significado do valor ótimo de uma variável do modelo dual é o limite que se deve pagar por uma unidade adicional do recurso associado à variável.

Por terem este significado, os valores ótimos das variáveis do modelo dual são chamados de valores implícitos (*shadow prices*, em inglês).

O *shadow price* é a variação do valor objetivo da solução ótima de um problema de otimização obtido através do relaxamento de uma restrição por uma unidade - é a utilidade marginal de relaxar a restrição ou, de forma equivalentemente, o custo marginal de reforçar a restrição.

- Taxa de Pigou

Taxa de Pigou é uma taxa de imposto que se aplica a um “custo externo”, ou externalidade, tal como a poluição, desenhado para levar as forças de mercado a atingirem uma alocação eficiente dos recursos. É um sistema que internaliza custos externos ao mercado, sendo, por exemplo, o custo externo causado pela poluição internalizado se os poluidores pagarem uma taxa igual ao valor desse custo externo. (Sousa, 2000)

“Deve-se implementar um imposto sobre quem polui (em termos gerais)” – este é o princípio básico de controle das externalidades que se baseia no fato de que os custos sociais e privados não são iguais, sendo calculada uma taxa de imposto precisa que demonstrará ao indivíduo poluidor os reais custos (os custos sociais) das suas ações. A taxa pressupõe assim que se equivalham os custos marginais sociais aos custos marginais privados, assim como os benefícios marginais. Isto reflete as ideias mais gerais do conhecido por “*Pigouvian Tax*” (Sousa, 2000)

2.5.4 Exemplo básico de otimização linear: o problema do transporte

O problema do transporte consiste em transportar itens de centros de origens a centros de destinos. São dados conhecidos do problema: o custo de transporte de cada item, as quantidades dos itens disponíveis em cada centro, e as demandas de cada consumidor. O transporte deve ser efetuado de modo que as limitações de oferta em cada centro sejam respeitadas e a demanda de cada mercado atendida e o custo total de transporte seja mínimo. (Sousa, 2010)

Considere, para o entendimento básico de otimização linear, o seguinte problema do transporte adaptado de Dantzig, 1963.

Suponha que existam duas plantas de enlatamento de conservas (representadas pelo índice i) e três mercados alvo (representados pelo índice j); e deseja-se transportar caixas de conserva das plantas até os mercados. Suponha, também, que se conheçam dados de distância (das plantas i até os mercados j), frete (por caixa transportada), capacidades das plantas e demanda do mercado; e deseja-se minimizar o custo de transporte (Tab. 1).

Para solucionar o problema, determinam-se equações para o custo por caixa transportada (distâncias de i a j multiplicadas pelo frete), e custo total (custo por caixa multiplicado pelas quantidades de caixas), restringe-se o problema com os dados de oferta e demanda, isto é: todas as quantidades transportadas de i a j devem ser menores ou iguais à capacidade disponível das plantas e maiores ou iguais às demandas existentes. Nesse problema, o custo total deve ser minimizado e, para isso, o valor de caixas transportadas de i a j é uma variável do problema.

Tabela 13 - Dados do problema do transporte

Plantas	Distâncias (*1000 km)			Oferta (caixas)
	Mercados			
	Nova-York	Chicago	Topeka	
Seattle	2,5	1,7	1,8	350
San Diego	2,5	1,8	1,4	600
Demanda	325	300	275	

Com a introdução de dados no problema, as equações (1), (2), (3) e (4) o resolvem.

$$c_{ij} = \frac{f * d_{ij}}{1000} \quad (1)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq a_i \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij} \geq b_j \quad (3)$$

$$\text{Minimizar } z = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Os termos das equações são explicados na Tab.(14).

Tabela 14 - Dados e variáveis do problema

Definição	Símbolo
Plantas de enlatamento	i
Mercados	j
Capacidade das plantas i (em caixas)	a_i
Demanda do mercado j (em caixas)	b_j
Quantidade de remessas (em caixas)	$x_{ij} \geq 0$
Frete (por caixa)	f
Distâncias	d_{ij}
Custo de transporte por caixa (em milhares de dólares)	c_{ij}
Custo total de transporte	z

A função objetivo do problema é a função z , as equações (1), (2) e (3) são funções de restrição.

A partir da formulação acima do problema, e utilizando os dados da Tabela 1, chega-se a um resultado ideal (Tab. 15), isto é, de menor custo dentro das restrições existentes.

Tabela 15 - Quantidades transportadas ótimas (em n° de caixas)

	Nova York	Chicago	Topeka
Seattle	50	300	0
San Diego	275	0	275

Os custos marginais, ou *shadow costs*, são apresentados na Tab. (16). Ela que indica que é ótimo não enviar nenhuma quantidade de Seattle a Topeka, mas caso se insista em enviar uma caixa, será adicionado um valor de \$0,036 ao custo ótimo e custando \$0,009 no caso de San-Diego a Chicago.

Tabela 16 – Custos marginais

	Chicago	Topeka
Seattle		0,036
San-Diego	0,009	

2.6 O PROGRAMA GAMS

O problema de otimização proposto neste trabalho será traduzido à linguagem do programa GAMS, para que este seja capaz de realizar a otimização de equações lineares e fornecer os resultados do problema. A sintaxe do programa deve ser bem entendida, para que seja bem feita a representação matemática do problema no programa.

GAMS (Generalized Algebraic Modeling System); em português: “Sistema Geral de Modelagem Algébrica”; é uma linguagem para organização e solução de modelos de otimização e programação matemática. O GAMS permite especificar a estrutura de um modelo de otimização e calcular dados que fazem parte dele, resolvê-lo e fazer um relatório escrito sobre um modelo.(McCarl, 1998)

Para entender a linguagem do programa GAMS, pode-se dividir a estrutura de resolução de um problema de otimização nas seguintes partes:

- Sets (índices);
- Dados
 - Parameter (parâmetro);
 - Table (tabela);
 - Scalar (escalar);
- Variables (variáveis);
- Equations (equações);
- Model (modelo);
- Solve (resolver);
- Display (mostrar);

Os exemplos mostrados posteriormente serão a representação do programa de transporte, já mencionado, na estrutura do GAMS. A estrutura completa está mostrada abaixo:

2 OTIMIZAÇÃO

Este trabalho tem por objetivo encontrar uma solução ótima para a localização de plantas termelétricas e suas respectivas escalas de produção, a partir de dados de produção madeireira, localização das produções e custos de transporte.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema proposto consiste em, através da utilização de otimização linear, determinar as demandas de resíduos para um número de usinas localizadas no estado do Pará. O número de usinas será calculado com base no valor de oferta de resíduos e escalas de produção. A localização das usinas será predeterminada com base em localidades que possuam estrutura para distribuição de energia elétrica. A otimização concluirá quais as localidades mais adequadas, entre as predeterminadas, e quais as quantidades ótimas de resíduo a serem transportada para cada usina, utilizando o custo de transporte como parâmetro de otimização.

Serão feitos dois programas similares, para dois tipos de tecnologias: gaseificação e combustão direta. A partir desses programas, poderão ser tiradas conclusões sobre qual tecnologia seria mais adequada. A pirólise não será considerada no problema, pela impossibilidade de utilização de pellets na pirólise rápida.

Também serão calculados custos operacionais de transporte e consumo de energia do processo total, considerando a parte ambiental destes custos, isto é, as emissões de gases estufa.

Os resíduos de biomassa que serão considerados no trabalho de otimização são obtidos a partir do processamento de toras de madeira no Pará, ou seja, serragem. Não sendo levados em conta, portanto, os resíduos restantes nas áreas de exploração da madeira, tais como folhas, galhos e cascas. O rendimento do processamento da madeira é mostrado na Fig. (21).

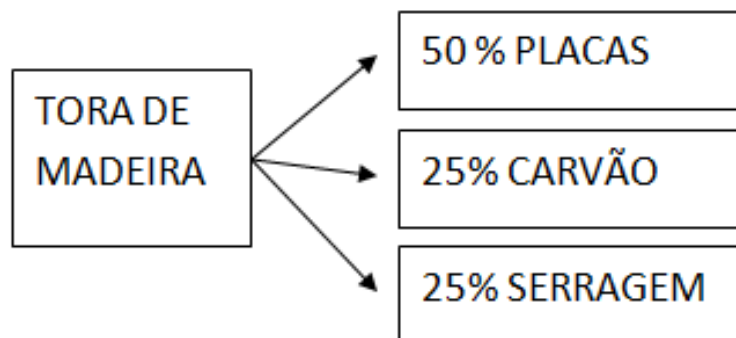


Figura 21 – Rendimento do processamento da madeira

A madeira é cortada em toras e transportada para uma serraria, onde é transformada em placas, havendo formação de resíduos como pequenos pedaços de madeira, que são posteriormente transformados em carvão, e serragem, resíduo para posterior geração de energia. Os processos por que passará a madeira até ser transformada em serragem estão representados a seguir, na Fig. (22).

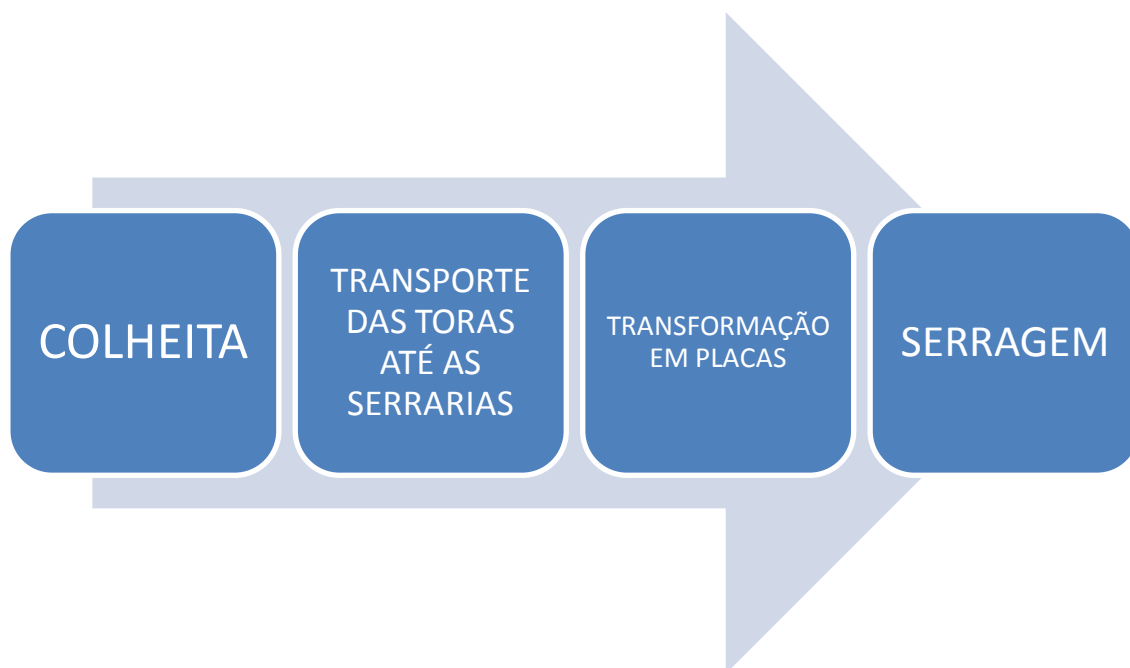


Figura 22 – Fluxograma de transformação da madeira

Para geração de energia, a serragem será, primeiramente, transportada até a unidade de densificação mais próxima, para diminuir os custos de transporte totais. Para a densificação, será utilizado o processo de peletização.

Foi escolhida a peletização, pois essa tecnologia é mais propícia para ser utilizada na gaseificação, por apresentar tamanhos pequenos e possibilitar a fluidização.

Em cada município produtor de madeira será localizada uma peletizadora, de forma a minimizar os custos de transporte da serragem. Os custos diretamente relacionados ao transporte das peletizadoras não serão contabilizados nos cálculos deste trabalho, já que as distâncias entre as serrarias e as peletizadoras não serão determinadas.

Depois de densificada, a biomassa será transportada até a usina termelétrica (Fig.23). A usina termelétrica será composta de tecnologia de gaseificação, pirólise ou combustão direta, havendo integração, no mesmo local, com turbinas para geração de energia.

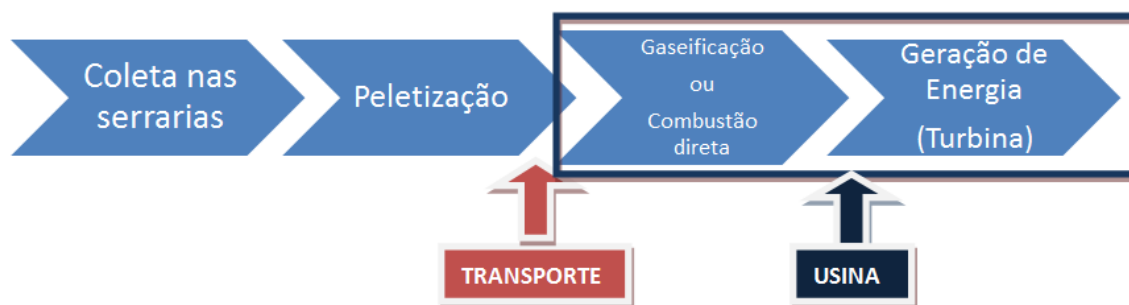


Figura 23 - Processos de transformação da biomassa

3.2 DADOS DE PRODUÇÃO DO PARÁ

As informações de produção e localização de serrarias no Pará foram adquiridas a partir de dados de pesquisa do IBGE, em 2009, condensados, pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), em uma tabela contendo quantidades de extração e processamento de madeira, em volume, assim como os municípios onde estão localizadas as produções. A partir dos municípios correspondentes serão encontradas distâncias, que, junto aos dados de madeira já processada, serão parâmetros utilizados no programa de otimização. Tais dados são apresentados nas Tab.(17) e (18).

Tabela 17 - Polos madeireiros do estado do Pará em 2009
 Fonte: Imazon (2010)

Polo madeireiro	Número de indústrias¹	Extração anual de toras (milhares m³)	Produção processada (milhares m³)	Empregos gerados²	Receita bruta (US\$ milhões)
Altamira ³	31	108	31	2.270	13,1
Anapu ⁴	41	339	111	6.070	66,3
Breu Branco	12	122	47	1.582	19,4
Novo Repartimento	23	201	89	3.313	41,6
Uruará ⁵	25	125	52	2.843	21,4
Centro do Pará	132	895	330	16.078	161,8
Afuá ⁶	219	64	18	1.001	1,7
Belém ⁷	35	697	279	13.241	141,0
Breves ⁸	159	444	136	2.171	42,3
Calha Norte ⁹	7	230	67	2.643	25,1
Cametá ¹⁰	39	112	47	1.763	18,4
Moju	11	122	48	1.754	21,4
Portel	7	139	55	678	23,2
Porto de Moz	14	62	21	1.018	9,0
Estuário Paraense	491	1.870	671	24.269	282,1
Dom Eliseu	14	273	118	3.057	48,7
Goianésia do Pará	21	201	82	2.963	30,5
Jacundá	27	187	81	3.687	36,0
Marabá ¹¹	25	156	60	2.385	22,4
Paragominas ¹²	42	755	280	3.693	114,8
Rondon do Pará ¹³	27	162	71	3.886	26,2
Tailândia	28	304	114	1.594	50,5
Tomé-Açu ¹⁴	36	396	153	9.147	62,5
Tucuruí	22	302	128	3.819	51,6
Ulianópolis	24	247	119	4.327	47,5
Leste do Pará	266	2.983	1.206	38.558	490,7

Tabela 18 - Continuação de Polos madeireiros do estado do Pará em 2009
 Fonte: Imazon (2010)

Polo madeireiro	Número de indústrias¹	Extração anual de toras (milhares m³)	Produção processada (milhares m³)	Empregos gerados²	Receita bruta (US\$ milhões)
Castelo de Sonhos ¹⁵	22	104	45	1.829	20,8
Itaituba ¹⁶	26	115	49	2.991	24,7
Novo Progresso	43	185	72	3.464	34,5
Santarém ¹⁷	31	237	96	1.159	45,6
Trairão	17	83	29	1.509	11,9
Oeste do Pará	139	724	291	10.952	137,5
Parauapebas ¹⁸	23	95	40	1.799	16,8
Santana do Araguaia ¹⁹	16	32	12	768	5,3
Sul do Pará	39	127	52	2.567	22,1
Pará	1.067	6.599	2.550	92.424	1.094,2

¹ Inclui as micro serrarias.

² Empregos diretos e indiretos. Cada emprego direto da indústria madeireira gera em média 2,06 empregos indiretos.

³ Inclui Brasil Novo, Medicilândia, Senador José Porfírio e Vitória do Xingu.

⁴ Inclui Paçará.

⁵ Inclui Placas.

⁶ Inclui Anajás.

⁷ Inclui Ananindeua, Benevides, Marituba e Santa Bárbara do Pará.

⁸ Inclui Currealinho.

⁹ Inclui Alenquer, Almeirim, Curuá e Óbidos.

¹⁰ Inclui Baião, Igarapé-Miri, Mocajuba, Oeiras e Limoeiro do Ajuru.

¹¹ Inclui Itupiranga e Nova Ipixuna.

¹² Inclui Ipixuna do Pará.

¹³ Inclui Abel Figueiredo.

¹⁴ Inclui Acará e Concórdia do Pará.

¹⁵ Castelo de Sonho é um distrito de Altamira.

¹⁶ Inclui Rurópolis.

¹⁷ Inclui Oriximiná e Prainha.

¹⁸ Inclui Água Azul do Norte, Eldorado dos Carajás, São Félix do Xingu, Tucumã e Xinguara.

¹⁹ Inclui Cumarú do Norte, Pau D'Arco, Redenção e Rio Maria.

Sobre os dados apresentados nas tabelas acima, é importante ressaltar que Castelo de Sonhos é um distrito de Altamira e, por isso, seus dados de processamento de madeira serão acrescentados aos números de Altamira e o distrito será desconsiderado do programa. Para os municípios de Afuá, Portel e Porto de Moz, não foi possível encontrar rotas disponíveis, através do *Google Maps*, e não foram encontradas informações suficientes para calcular distâncias até eles, levando à retirada de suas produções e localizações do trabalho de otimização. Essa

simplificação do problema pode ser considerada válida, já que a dificuldade de encontrar rotas disponíveis reflete uma provável inviabilidade, tanto financeira quanto de meios de infraestrutura, de transporte de resíduos a partir desses locais.

Cada um dos municípios utilizados no trabalho, considerando como um só os municípios com dados juntos na tabela, conterà uma unidade de peletização, totalizando 26 peletizadoras.

Como entrada para o programa de otimização serão utilizadas as quantidades de madeira densificada, em kg. O que significa que os dados disponíveis de madeira processada, em m³, devem ser convertidos em dados densificados, em kg.

Como já mencionado, será considerado que 50% da madeira processada é convertida em serragem. Para converter o volume, em m³, da biomassa, será utilizada a densidade do pellet de 650kg/m³, de acordo com Andritz Fuel & Biofuel. Será considerado que 95% dos resíduos disponíveis serão realmente utilizados pelas usinas. Portanto, o Eq. 5 demonstra os cálculos realizados para conversão nos dados introduzidos no programa de otimização.

$$O_i[kg] = Oferta [m^3] * 650 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0,5 * 0,95 \quad (5)$$

Em que O_i é a oferta de biomassa densificada das serrarias às usinas e $Oferta$ é a quantidade de madeira processada. Uma tabela contendo os dados de produção e de oferta densificada se encontra no anexo I.

3.3 POSSÍVEIS ALVOS PARA LOCALIZAÇÃO DE USINAS

Tendo como objetivo encontrar cidades que possuam estrutura de distribuição de energia para acolherem as usinas, foram escolhidos os seguintes municípios: Belém, Ananindeua, Marabá, Barcarena, Santarém, Castanhal, Paragominas, Capanema, Altamira e Redenção.

Foram utilizados como parâmetros para determinação desses municípios aqueles de maiores demandas energéticas, de acordo com a Celpa (Tab. 15).

Tabela 19 - Principais Municípios atendidos pela Celpa
 Fonte: Centrais Elétricas do Pará S.A. – Celpa

Principais Municípios	4º Trim. MWh	2010 Nº Cons.
Belém	2.135.159	408.319
Ananindeua	412.966	137.321
Marabá	574.816	67.071
Barcarena	153.900	28.412
Santarém	244.164	65.209
Castanhal	184.406	53.092
Paragominas	99.827	28.895
Capanema	40.547	20.075
Altamira	80.300	24.574
Redenção	76.150	22.768
Total	4.002.235,00	855.736,00

* NºCons. – Nº de consumidores

3.4 DISTÂNCIAS

As distâncias entre cada município de produção de biomassa e os municípios alvo foram obtidas com a utilização do *Google Maps*, ferramenta de visualização de mapas e determinação de rotas e distâncias do Google.

Pode-se verificar, através de mapas, como estão distribuídas as produções madeireiras do Pará nas Fig. (22), (23) e (24) e as distâncias entre cada município se encontram no anexo II.



Figura 24 - Visão geral de produções madeireiras do Pará
 Fonte: Google Maps

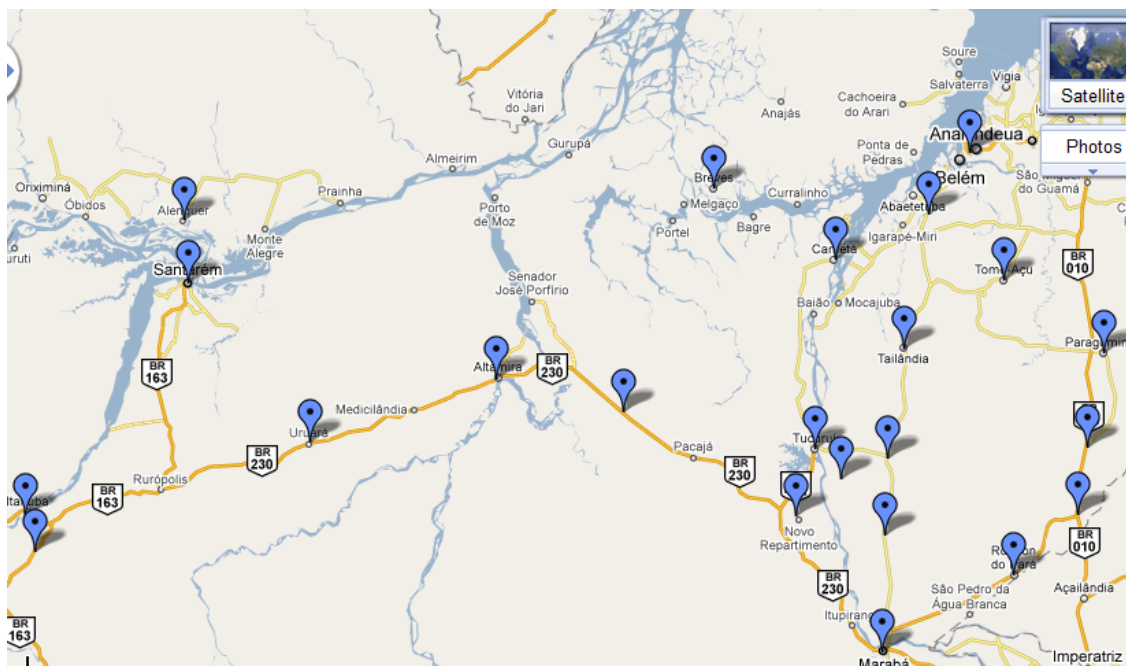


Figura 25 - Produções madeireiras do Pará – parte ao norte
 Fonte: Google Maps

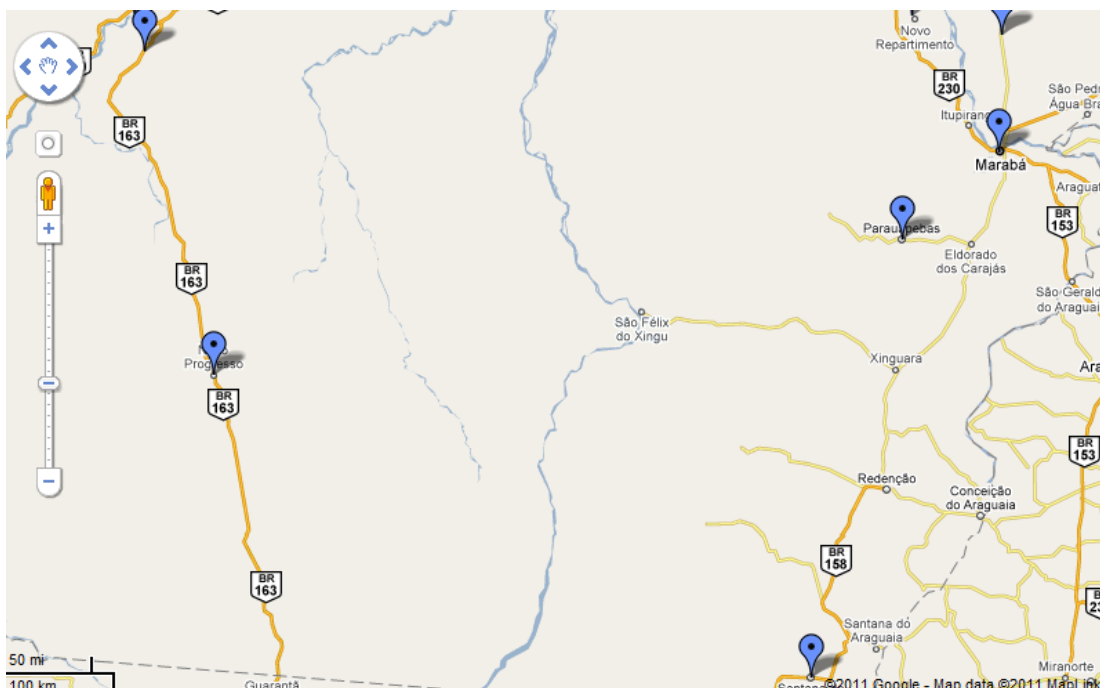


Figura 26 - Produções madeireiras no Pará – parte ao sul
 Fonte: *Google Maps*

3.5 CUSTOS DE TRANSPORTE

Os custos de transporte considerados no problema são divididos em duas categorias: custo de frete e custo ambiental devido a emissões de gases estufa.

O transporte entre as unidades de densificação e as usinas será feito por caminhões do tipo “caminhão pesado”, que são os caminhões comumente utilizados em estradas, com capacidades de cerca de 17 toneladas.

Para cálculos de frete, foi utilizada uma tabela de fretes (Tab. 20) disponibilizada pelo site Guia do Transportador. Como podem ser observados na tabela, os valores de frete dependem tanto da massa da carga transportada quanto da distância percorrida. Além disso, os preços variam entre intervalos de distância.

Tabela 20 - Tabela base para frete
 Fonte: site Guia do Transportador

Distância em km		Tipo de Caminhão				
		Leves R\$/t	Médios R\$/t	Semi- Pesados R\$/t	Pesados R\$/t	Bi-trem R\$/t
0	50	36,59	23,80	11,63	12,23	11,51
51	100	62,18	37,82	18,53	18,59	15,79
101	150	87,76	51,84	25,42	24,95	20,07
151	200	113,35	65,86	32,31	31,30	24,35

201	250	138,94	79,88	39,20	37,66	28,63
251	300	164,53	93,90	46,09	44,02	32,91
301	350	190,11	107,92	52,98	50,37	37,19
351	400	215,70	121,94	59,87	56,73	41,47
401	450	241,29	135,95	66,77	63,09	45,75
451	500	266,88	149,97	73,66	69,44	50,03
505	600	318,05	178,01	87,44	82,16	58,59
601	700	369,23	206,05	101,22	94,87	67,15
701	800	420,40	234,09	115,01	107,59	75,71
801	900	471,58	262,12	128,79	120,30	84,27
901	1.000	522,75	290,16	142,57	133,01	92,83
1001	1.100	573,93	318,20	156,35	145,73	101,39
1101	1.200	625,10	346,24	170,14	158,44	109,95
1201	1.300	676,28	374,27	183,92	171,16	118,51
1301	1.400	727,45	402,31	197,70	183,87	127,07
1401	1.500	778,63	430,35	211,48	196,58	135,63
1501	1.600	829,80	458,39	225,27	209,30	144,19
1601	1.700	880,98	486,42	239,05	222,01	152,75
1701	1.800	932,15	514,46	252,83	234,72	161,31

Para o programa de otimização, foi utilizado um valor de frete por quilômetro rodado. Para chegar a esse valor, foi utilizada a quantidade de 17 toneladas como carga do caminhão, determinando, assim, valores em reais (R\$) para os intervalos de distâncias.

Quer-se encontrar um valor médio de frete, com unidade R\$/km, que, ao multiplicado pela distância, resultaria num preço total.

Para chegar a esse valor médio de frete, em cada faixa de distância foi dividido o valor total em reais pelo valor das distâncias mínimas e máximas, resultando na Tabela 21 abaixo, com exceção da distância 0 km, que foi substituída pelo valor de 1 km.

A próxima etapa deste cálculo foi calcular o valor médio encontrado entre os mínimos e máximos, chegando-se ao valor de 2,5 para os valores máximos, que foi escolhido em vez do mínimo por ser mais confiável, pois o frete para a distância de 1 km tem um valor muito alto por ser considerada uma distância muito pequena.

Esse valor, de R\$2,5/km, foi utilizado no programa de otimização para encontrar os custos de transporte.

Tabela 21 – Cálculo de frete

Distância em km		Pesados R\$/t	17t*R\$	Mínimos	Máximos
0	50	12,23	207,9	207,9	4,2
51	100	18,59	316,0	6,2	3,2
101	150	24,95	424,1	4,2	2,8
151	200	31,30	532,1	3,5	2,7

201	250	37,66	640,2	3,2	2,6
251	300	44,02	748,3	3,0	2,5
301	350	50,37	856,3	2,8	2,4
351	400	56,73	964,4	2,7	2,4
401	450	63,09	1.072,5	2,7	2,4
451	500	69,44	1.180,6	2,6	2,4
505	600	82,16	1.396,7	2,8	2,3
601	700	94,87	1.612,8	2,7	2,3
701	800	107,59	1.829,0	2,6	2,3
801	900	120,30	2.045,1	2,6	2,3
901	1.000	133,01	2.261,2	2,5	2,3
1001	1.100	145,73	2.477,4	2,5	2,3
1101	1.200	158,44	2.693,5	2,4	2,2
1201	1.300	171,16	2.909,6	2,4	2,2
1301	1.400	183,87	3.125,8	2,4	2,2
1401	1.500	196,58	3.341,9	2,4	2,2
1501	1.600	209,30	3.558,0	2,4	2,2
1601	1.700	222,01	3.774,2	2,4	2,2
1701	1.800	234,72	3.990,3	2,3	2,2
MÉDIA	-	-	-	11,8	2,5

3.5.1 Transporte – Custo Ambiental

Existem quatro ingredientes principais que saem pelo escapamento dos veículos e que têm efeitos negativos sobre a saúde e o meio ambiente: óxidos de nitrogênio (NOx), particulados, hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO). (Site da Volvotrucks, 2011)

Para contabilizar os custos do CO2 emitidos no transporte, será utilizada a Tab.(22), resultante de cálculo dos fatores de emissão de CO2 desenvolvida em cooperação entre o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Ministério de Minas e Energia (MME) (2009).

Tabela 22 - Fator de emissão de CO2 do óleo diesel
Fonte: MCT e MME (2009)

Combustíveis	Unidade	Conteúdo de energia por combustível (TJ/unidade)	Fator de emissão de carbono por combustível (t C/TJ)	Fator de oxidação
Óleo Diesel	1000 m ³	35,52	20,20	0,99
	10 ⁶ l	35,52	20,20	0,99

As usinas térmicas emitem CO2 pela queima de combustível fóssil. O fator de emissão de CO2 por unidade de combustível consumido é calculado com base no poder calorífico dos

combustíveis e em fatores de emissão por unidade de energia, conforme a Eq. 6. (MCT & MME, 2009)

$$FC_c = CE_c * FE_c * OX_c * \frac{44}{12} \quad (6)$$

Em que FC_c é o fator de emissão de carbono por tipo de combustível, CE_c é o conteúdo de energia por unidade de combustível, FE_c é o fator de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível, OX_c são os fatores de oxidação do combustível.

Realizando esse cálculo, encontra-se o valor de 2,6tC/m³ para FC_c , o que significa que 2,6 toneladas de CO₂ são emitidas à atmosfera para cada 1.000 litros de óleo diesel consumido. Como já mencionado, o consumo dos caminhões aqui adotado é de 2,5 km/l. O que significa que a cada quilômetro rodado serão emitidas 1,04 10⁻³ toneladas de CO₂.

Quanto aos preços das emissões, no período de 30 de maio a 6 de junho, o Instituto Carbono relatou o preço das Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) como sendo negociadas entre € 12,5/t e 13/t. Neste trabalho, o valor das RCEs será considerado como €13/t, mas é justo apontar que este é um valor que varia de acordo com o mercado de crédito de carbono. O valor do euro será considerado R\$2,28, de acordo com cotação do mês de junho de 2011. Então, o valor da tonelada de CO₂ emitida valerá R\$29,64.

O custo ambiental resulta em R\$0,0308 por quilômetro rodado.

3.6 CUSTO DE PELETIZAÇÃO

De acordo com Quirino (2007) os custos de peletização incluem: transporte (5 kWh/t), moagem (15 kWh/t), peletização (60 kWh/t), resfriamento (2,5 kWh/t) e “vários” (2,5 kWh/t). Totalizando 85 kWh/t de pellets.

O cálculo dos custos de energia elétrica gasta nesse processo terá como base uma tarifa de R\$ 0,2163561/KWh, para consumo rural de energia grupo B. O custo, então, será de R\$18,39 por tonelada de pellets produzidos.

3.6.1 Custo Ambiental de Peletização

O custo ambiental para o processo de peletização envolverá o custo de emissão de dióxido de carbono para a energia elétrica gasta no processo. Como já mencionado, o gasto de energia será de 85kWh/t. As emissões de carbono por unidade de energia são mostradas na Tab.(23).

O valor de toneladas de CO₂ emitidas para cada tonelada de biomassa densificada será igual a $4,352 * 10^{-3}$ tCO₂/t, resultado da multiplicação do Fator Médio Anual (Tab. 23) pelo gasto de energia, em MWh, de 0,085MWh/t.

Tabela 23 – Fator Médio Anual de Emissão de Carbono para Geração de Energia
Fonte: Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) - 2010

Fator Médio Anual (tCO ₂ /MWh)
ANO - 2010
0,0512

O custo para as emissões de CO₂ serão os já mencionados para o custo ambiental do transporte da biomassa (R\$29,64).

Então, o custo ambiental da peletização será de R\$0,12899/t: resultado da multiplicação de $4,352 * 10^{-3}$ tCO₂/t pelo custo ambiental R\$29,64/tCO₂.

3.7 CUSTOS TOTAIS

Os custos totais (Eq. 9) serão compostos pela soma do: custo energético e ambiental do processo de densificação (Eq. 7), custo de transporte, incluindo custo ambiental, das unidades de densificação até a usina (Eq. 8).

Os custos de transporte das serrarias até as peletizadoras não serão considerados neste cálculo, já que elas estarão inseridas nos municípios produtores e não há como definir distâncias corretas entre elas e as serrarias por não haver dados precisos de localização das serrarias.

$$C_{dens_i} = \sum O_i (CustEnerg + CustAmb) \quad (7)$$

$$C_{transp_{ij}} = \sum D_{ij} (Frete + CustEmis) \quad (8)$$

$$C_{ij} = C_{dens_i} + C_{transp_{ij}} \quad (9)$$

$$D_{tot} = D_{ij} * \frac{O_i}{CapCam} \quad (10)$$

Onde os termos das equações (7), (8), (9) e (10) são explicados na Tab.(24).

Tabela 24 – Termos das equações

Processo	Termo	Significado	Unidade
Densificação	C_{dens_i}	Custo de densificação	R\$
	O_i	Oferta de biomassa já densificada	kg

	$CustEnerg$	Custo Energético do Processo	$R\$/kg$
	$CustAmb$	Custo Ambiental do Processo	$R\$/kg$
Transporte Densificação - Usina	$Ctransp_{ij}$	Custo de transporte	$R\%$
	$Frete$	Frete	$R\$/km$
	$CustEmis$	Custo das emissões de CO2	$R\$/km$
	D_{ij}	Distâncias entre os municípios	km
	D_{tot}	Distância total percorrida	km
	$CapCam$	Capacidade de carga do caminhão	kg
TOTAL	C_{ij}	Custo total	$R\%$

Na Eq. (8), a multiplicação dos custos por 2 (dois) é feita para levar em conta os caminhões de ida e volta dos caminhões. O índice i se refere às unidades de peletização, que compõem as ofertas de biomassa, e o índice j se refere às usinas, que são o destino da biomassa.

A Eq. (10) leva em consideração o número de viagens realizadas para o transporte de toda a biomassa disponível: dependendo da capacidade de carga do caminhão utilizado e da quantidade transportada.

3.8 POTÊNCIA INSTALADA

Capacidade Elétrica Instalada (medida em unidades de potência) é a soma, prevista pelos projetistas e fabricantes de máquinas, das potências dos grupos turbo-geradores de uma usina hidrelétrica ou termelétrica. É equivalente à potência máxima que a usina pode produzir. (Sevá, 2005)

Serão feitos dois programas diferentes para as tecnologias de conversão de biomassa: gaseificação e combustão direta. Cada um desses processos possui sua eficiência e, através dessa informação, pode-se saber qual o potencial total de energia necessária para aproveitar toda a quantidade de resíduos de madeira disponíveis no Pará.

Para conversão de massa para energia, vai-se utilizar a energia específica dos pellets de madeira igual a 4,8 MWh/t, ou 4,8 kWh/kg. (Andritz Feed & BioFuel).

Tendo como base a Piratini Energia: uma usina termelétrica a resíduo de madeira, localizada no estado do Rio Grande do Sul, com potência instalada de 10MW; será considerado que 89% das horas anuais serão utilizadas para as operações, resultando no valor de 7.796 horas totais.

O cálculo da potência instalada necessária para absorver as produções de resíduos de madeira está demonstrado nas equações (11) e (12) para as rotas tecnológicas escolhidas.

$$PotInst_{gaseif} = O_i * 4,8 * \frac{1}{7796} * \eta_{gaseif} \quad (11)$$

$$PotInst_{comb} = O_i * 4,8 * \frac{1}{7796} * \eta_{comb} \quad (12)$$

Em que, $PotInst$ significa a potência instalada em kW, O_i é a oferta de biomassa densificada em kg, η representa eficiência e os subscritos $gaseif$, e $comb$ significam, respectivamente: processo de gaseificação e de combustão direta já incluindo a queima da biomassa e a geração de energia.

Os valores de eficiência a serem adotados neste projeto serão determinados na próxima etapa do trabalho.

3.9 RECEITA GERADA

Para se calcular os ganhos financeiros obtidos com produção de energia, precisa-se calcular a produção total de energia (Eq. 13), que é a potência instalada das usinas multiplicada pelas horas totais de funcionamento das mesmas e pelo preço da energia elétrica.

Tomando como base a usina uma partir de resíduos de madeira já existente no Rio Grande do Sul, a Piratini Energia, que produz energia em cerca de 89% das horas anuais, também aqui será considerado esse percentual de uso para a usina, resultando em 7.796 horas por ano.

$$G = (PotInst * 7796 * Pr) + (PrCarbEvit * FatorMed * PotInst * 7796) \quad (13)$$

$PotInst$ significa a potência instalada, em MW e Pr representa o preço de venda da energia elétrica em $\frac{R\$}{MWh}$.

O preço da energia elétrica vendida pelas empresas geradoras é variado, já que é definido principalmente em leilões. Utilizando como base o dado de compra da Celpa, em 2008, mostrados na Tab. (25), o preço médio de venda de energia gerada será considerado R\$83,16.

A segunda parte da equação de receita gerada envolve ganhos pela venda de carbonos evitados, isto é, pela geração de energia não envolver emissões extras de carbono, já que o carbono da biomassa é contabilizado como já existente na natureza e os métodos naturais de decomposição o levariam de volta ao ambiente.

$PrCarbEvit$ é o preço pago pelo carbono evitado, determinado, novamente, pelo mercado de carbono (R\$29,64/tCO₂). $FatorMed$ é Fator Médio Anual, já citado anteriormente na Tab.(25) (0,0512tCO₂/MWh).

Tabela 25 – Preço médio ponderado de energia comprada pela Celpa em 2008

Fonte: Nota Técnica nº 269/2009-SER/ANEEL (2009)

PREÇO MÉDIO PONDERADO - ENERGIA COMPRADA APÓS LEI 10.848/2004			
Empresa Vendedora	Energia - MWh	Preço - R\$/MWh	R\$
CCEAR 2005 - 8 anos	3.821.170	71,40	272.836.556,97
CCEAR 2006 - 8 anos	1.735.686	83,59	145.091.693,29
CCEAR 2007 - 8 anos	665.299	93,69	62.329.918,33
CCEAR 2007-8 anos (A-1)	23.384	119,29	2.789.475,30
CCEAR 2008 - 8 anos	318.880	100,52	32.053.292,65
CCEAR 2009 - 8 anos	98.788	112,51	11.114.554,54
MCSD - 2005 - 8 anos	251.686	70,54	17.754.407,95
MCSD - 2006 - 8 anos	85.646	82,29	7.048.183,08
MCSD - 2007 - 8 anos	3.283	91,19	299.383,35
MCSD 2007 - 8 anos (A-1)	4	117,86	414,75
MCSD 2008 - 8 anos	501	96,89	48.569,01
MCSD 2009 - 8 anos	0	-	-
1º Leilão 2008-H30	24.904	125,64	3.128.779,96
1º Leilão 2008-T15	196.774	110,64	21.771.063,11
1º Leilão 2009-H30	11.830	134,25	1.588.071,64
1º Leilão 2009-T15	150.956	109,88	16.586.992,40
1º Leilão 2010-H30	0	-	-
1º Leilão 2010-T15	0	-	-
2º Leilão 2009-H30	248.207	146,66	36.401.891,01
2º Leilão 2009-T15	128.471	116,23	14.932.140,18
4º Leilão 2010-T15	0	-	-
1º Leilão F.Altern. 2010-H30	0	-	-
1º Leilão F.Altern. 2010-OF15	0	-	-
subtotal	7.765.466		
EXPOSIÇÃO	0	39,81	-
TOTAL	7.765.466	Preço Médio 83,16	645.775.387,53

3.10 VERIFICAÇÃO DE NECESSIDADE DE OTIMIZAÇÃO

Antes que seja feita a otimização, é importante verificar se é necessário fazê-lo, isto é, se as próprias serrarias não demandam a energia elétrica gerada a partir da serragem.

Uma estimativa de demanda para as serrarias que oferecem serragem é demonstrada a seguir, a partir de dados de energia elétrica utilizada na serraria para toras de pinus da empresa Zíngaro Produtos Florestais Ltda.

Tal serraria processa 200m³ de madeira por turno de trabalho. Considera-se, aqui, que um turno significa um dia de 8h de trabalho. As máquinas utilizadas na serraria são mostradas na Fig. (27).

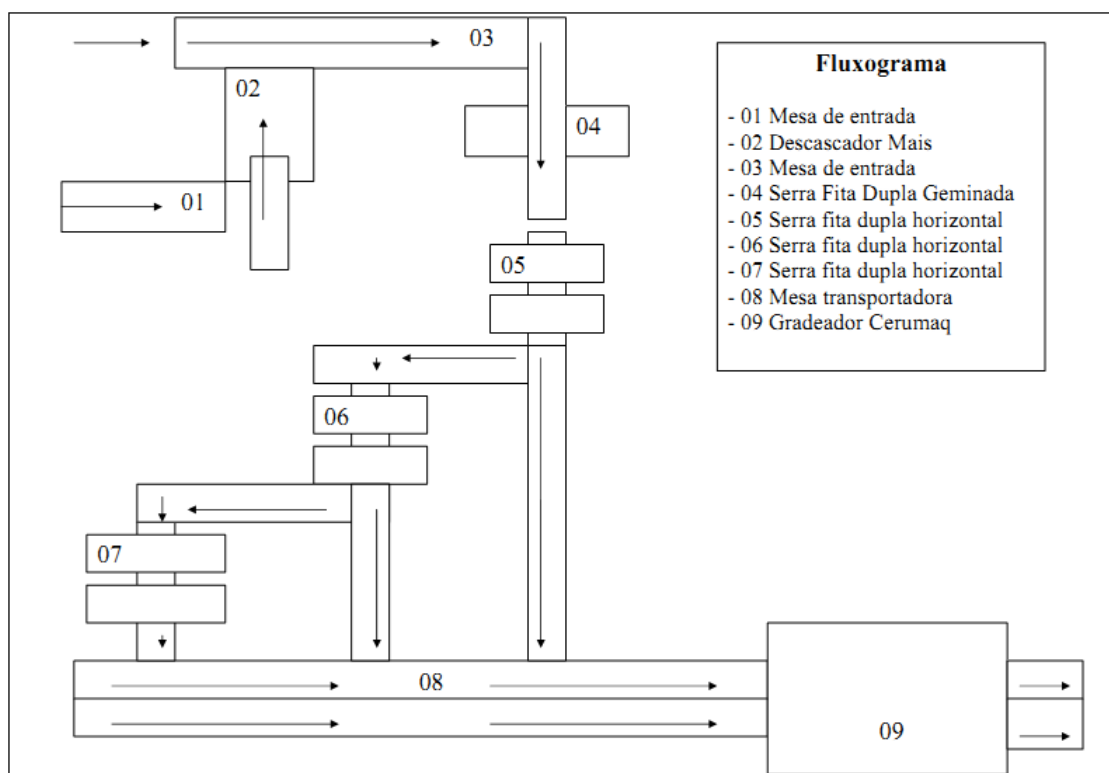


Figura 27 - Maquinário da serraria

Os equipamentos utilizados na serraria são detalhados na Tab.(26), que calcula a quantidade de energia demandada pelos mesmos.

Tabela 26 - Relação de equipamentos

EQUIPAMENTO	QUANT.	MARCA /MODELO	PARTE	POTÊNCIA	
				(HP)	(KW)
Mesas de entrada e transportadora	3	Transmaq	Motor	10	22,4
Serra fita dupla (germinada)	2	Mendes SFD 100	Motores principais (total)	50	74,6
	1		Unidade hidráulica	15	11,2
	1		Corrente de alimentação das toras	7,5	5,6
	1		Mesa Posicionadora	4	3,0
Serra fita dupla horizontal	2	Mendes FHS 900	Motor principal	80	119,3
	2		Potência de avanço	8,5	12,7
Serra fita dupla horizontal	1	CLUX SFH 110hid	-	40	29,8
Descascador de toras	1	Ma Si M360	-	30	22,4
Conjunto de Gradeamento	1	Cerumaq CR-2004	-	2,0	1,5
TOTAL				247	302,4

Nessa serraria, também foi observada a utilização de algumas máquinas, tais como uma bancada para desempenar serra fita, afiadeira de facas e máquina de afiar serra fita. Por isso, além de outros gastos de energia como lâmpadas de iluminação, o total calculado será aqui multiplicada por 2 para levar em conta tais gastos não contabilizados, totalizando um valor aproximado de 605 kW demandados por uma serraria com produção de 200m³ por dia.

Para verificar a quantidade de energia demandada pelos municípios produtores de madeira, foi calculado um valor proporcional aos da serraria mencionada acima, de acordo com a equação 14.

$$Energia\ Demandada\ [MWh] = \frac{Oferta\ [m^3]}{200\ [m^3]} * 0,605\ [MW] * 8[h] \quad (14)$$

A equação 14 apresenta a energia demandada em MWh, a oferta, em m³, é dividida por 200. Tal divisão resulta na quantidade de turnos de 8 horas realizados pela serraria que demandariam 605kW (ou 0,605MW) de potência.

Já a energia gerada foi calculada a partir da multiplicação da equação 14 pelas 7.796 horas utilizadas para geração anual de energia.

Pode ser observado na Tab.(27) que a energia demandada pelas serrarias corresponde a menos de 4% da energia gerada, não sendo, portanto, aproveitada a maioria do potencial de energia gerado pela serragem produzida.

Tabela 27 – Demanda de energia

Município	Oferta (10³ m³)	Energia anual gerada (MWh)	Energia demandada (MWh)
Altamira	76	50.684	1.839
Anapu	111	74.025	2.686
Breu Branco	47	31.344	1.137
Novo Repartimento	89	59.355	2.154
Uruará	52	34.679	1.258
Belém	279	186.065	6.752
Breves	136	90.698	3.291
Calha Norte	67	44.682	1.621
Cametá	47	31.344	1.137
Moju	48	32.011	1.162
Dom Eliseu	118	78.695	2.856
Goianésia do Pará	82	54.687	1.984
Jacundá	81	54.019	1.960
Marabá	60	40.014	1.452
Paragominas	280	186.732	6.776

Rondon do Pará	71	47.349	1.718
Tailândia	114	76.028	2.759
Tomé-Açu	153	102.036	3.703
Tucuruí	128	85.363	3.098
Ulianópolis	119	79.361	2.880
Itaituba	49	32.679	1.186
Novo Progresso	72	48.017	1.742
Santarém	96	64.022	2.323
Trairão	29	19.341	702
Parauapebas	40	26.676	968
Santana do Araguaia	12	8.003	290
TOTAL	2456	1.637.906	59.435

3.11 PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

Para resolução do problema de otimização, foram utilizados as variáveis apresentadas na Tab.(28).

Tabela 28 - Definições e Símbolos

Definição	Símbolo
Peletizadoras	i
Possível localização de usinas	j
Oferta de biomassa	a_{i1}
Distância entre municípios	d_{ij}
Quantidade de pellets transportada (t)	x_{ij}
Frete por caminhão (R\$/km*viagem)	$f1$
Custo de transporte (R\$/viagem)	c_{ij}
Função custo a ser otimizada	z

As equações utilizadas para otimização estão mostradas e explicadas abaixo:

$$c_{ij} = f * d_{ij} \quad (15)$$

c_{ij} define o custo de transporte por viagem de um caminhão. A multiplicação do frete pela distância resulta num custo por viagem realizada, já que o frete f representa o custo por quilômetro rodado em apenas uma viagem.

Para restringir o problema, foram utilizadas as equações 16 e 17 abaixo. Elas indicam que a quantidade de biomassa transportada deve ser positiva e, principalmente, que toda a biomassa deve ser transportada, isto é, a quantidade transportada deve se igualar à peletizada.

$$\sum_j x_{ij} = a_i \quad (16)$$

$$\sum_i x_{ij} \geq 0 \quad (17)$$

O objetivo do programa é otimizar o valor de z , que seria o custo total de todos os transportes realizados. O valor de z , não estando dividido pela capacidade de caminhões (para representar fielmente o número de viagens), não representa o valor exato do custo do transporte. Porém, para fins de otimização a divisão de z por um escalar não altera o resultado da otimização.

$$\text{Minimizar } z = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (18)$$

Foram calculados diversos custos junto ao programa de otimização, os escalares e variáveis envolvidos nestes cálculos estão mostrados na Tab.(29):

Tabela 29 - Mais definições e símbolos

Definição	Símbolo
Frete (R\$/km)	f
Quantidade de pellets transportada (t)	x_{ij1}
Oferta de biomassa (t)	a_i
Capacidade dos caminhões (t)	cap
Custo ambiental de transporte por quilômetro (R\$/km)	$f2$
Custo da energia para peletização por tonelada (R\$/t)	$p1$
Custo ambiental de peletização por tonelada (R\$/t)	$p2$
Distância entre municípios	d_{ij}
Custo calculado de transporte (somente frete - R\$)	$c1_{ij}$
Custo ambiental de transporte (R\$)	$c2_{ij}$
Custo total de transporte (R\$)	ctr_{ij}
Custo energético de peletização (R\$)	cp_i
Custo ambiental de peletização (R\$)	$cp2_i$
Custo total de peletização	ctp_i
Custo total	ct_{ij}

As equações 19 a 25 representam os custos indicados na tabela.

$$c1_{ij} = \frac{f * x_{ij} * d_{ij}}{cap} \quad (19)$$

Novamente, a divisão pela capacidade do caminhão é necessária para indicar a quantidade de viagens necessárias para transporte de toda a biomassa ofertada.

$$c2_{ij} = \frac{f2 * x_{ij} * d_{ij}}{cap} \quad (20)$$

$$ctr_{ij} = c1_{ij} + c2_{ij} \quad (21)$$

$$cp_i = p1 * a_i \quad (22)$$

$$cp2_i = p2 * a_i \quad (23)$$

$$ctp_i = cp_i + cp2_i \quad (24)$$

$$ct_{ij} = ctr_{ij} + ctp_i \quad (25)$$

A otimização foi realizada utilizando o programa GAMS. Levando em conta o transporte com origem nas cidades produtoras de biomassa e fim nos municípios-alvo escolhidas para solução do problema, foram feitas algumas variações com obtenção de resultados diversos, escolhidos com uma análise de custos. Tais variações referem-se ao número de municípios-alvo envolvidos no problema: foi variado esse número nas quantidades de 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 e 3 e analisados os resultados para verificação da melhor escolha.

3.12 RESULTADOS

Foram realizadas 8 opções de otimizações, variando o número de cidades-alvo (em cada uma delas. A cada nova otimização foi retirada uma cidade-alvo com a menor demanda energética, como mostrado na Tab.(30).

Tabela 30 - Cidades-alvo

Otimização	B e l é m	A n i d e u a	M a r á	B a r c a r e n a	S a n t a r é m a l	C a t a g o r i a s	P a g o m a	C a p a m a	A l t e r a ç õ e s	R e d e n ç ã o
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
3	X	X	X	X	X	X	X	X		
4	X	X	X	X	X	X	X			
5	X	X	X	X	X	X				
6	X	X	X	X	X					
7	X	X	X	X						
8	X	X	X							

Alguns parâmetros das otimizações são mostrados na Tab.(31). Pode-se verificar que a diferença entre o número de cidades escolhidas, traduzido em número de usinas instaladas, varia pouco. Já a menor potência instalada apresenta variações significativas, principalmente entre a otimização 1 e a 2. Também a maior potência instalada varia substancialmente entre a primeira e a última otimização.

O parâmetro com maior prioridade neste trabalho é o custo total, que envolve peletização e transporte da serragem, tanto custos de energia e frete como os custos ambientais. Estes custos são bem visualizados no gráfico da Fig. (28).

Tabela 31 - Comparação de Parâmetros

Otimização	Nº cidades escolhidas	Menor potência instalada (MW)	Maior potência instalada (MW)	Custo total (R\$)
1	7	1,42	79,95	17.483.283
2	6	28,52	79,95	17.683.510
3	5	33,29	100,71	21.062.216
4	5	33,29	100,71	21.062.216
5	6	18,26	128,99	25.781.495
6	5	33,29	129,99	26.548.934
7	4	33,29	172,54	39.724.134
8	3	33,29	186,14	42.721.918

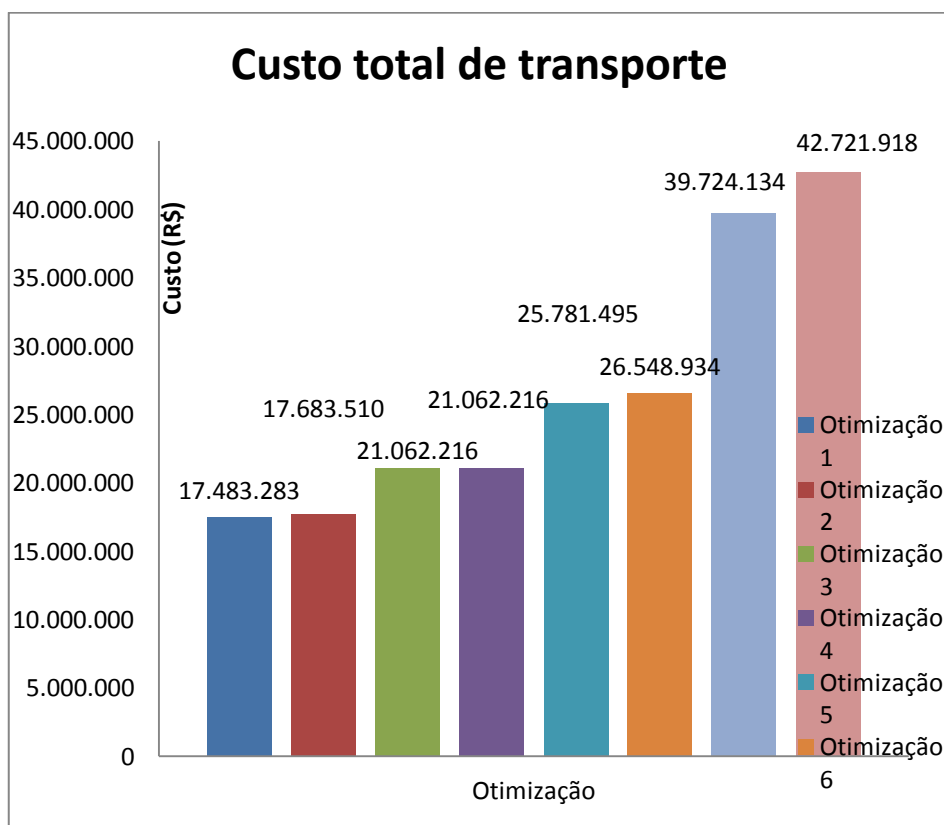


Figura 28 - Custos totais

Vê-se que o custo é crescente, à medida que o número de cidades-alvo, opções de localização para as usinas, diminui. Porém, como já mencionado, o número de cidades realmente escolhidas não varia muito.

Levando, então, em conta os parâmetros apresentados, a otimização 1 pode ser eliminada como uma boa opção: apresenta diferença de apenas R\$200.227,00 , ou 1,14%, para a otimização 2 e, apesar de apresentar o menor custo, apresenta uma usina com baixa potência instalada, que representaria custos de instalação e funcionamento que provavelmente não seriam viáveis.

As otimizações de 5 e 6 não apresentam grandes modificações em termos de número de usinas ou menor potência instalada em relação às otimizações anteriores, que são menos custosas, e, portanto, não apresentam alto custo-benefício.

As otimizações 7 e 8 apresentam resultados de menor número de usinas instaladas e maior potência instalada, mas a menor potência instalada não difere das outras otimizações. Esses dois resultados podem apresentar-se mais viáveis quanto aos custos para instalação e funcionamento das usinas, mas estes custos não estão sendo avaliados neste trabalho, logo estas duas otimizações também não apresentam bom custo-benefício.

Restam, para esta análise, as otimizações 2,3 e 4, sendo que estas duas últimas apresentaram resultados iguais. Para avaliar qual delas apresenta maior custo benefício, alguns dados são verificados nas Tab.(32) e (33).

Tabela 32 - Otimização 2

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestral (MWh)
Belém	33,29	63.998	2.135.159
Marabá	78,40	150.706	574.816
Barcarena	35	68.357	153.900
Santarém	37,35	71.797	244.164
Paragominas	79,95	153.688	99.827
Altamira	28,52	54.823	80.300
TOTAL	293,06	563.372	3.288.166

Tabela 33 - Otimizações 3 e 4

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestral (MWh)
Belém	33,29	63.998,70	2.135.159
Marabá	100,71	193.601,80	574.816
Barcarena	35,56	68.357,03	153.900
Santarém	43,55	83.725,90	244.164
Paragominas	79,95	153.688,63	99.827
TOTAL	293,06	563.372,05	102.651.712

Observam-se as localizações das usinas para ambas as otimizações, assim como o potencial de geração de cada uma. Como na otimização 3 não há a cidade de Altamira, a energia que seria gerada nessa cidade foi distribuída entre Santarém e Marabá.

Avaliando a demanda trimestral das cidades, encontra-se a demanda de Paragominas totalmente suprida em ambos os casos. É interessante notar que Marabá, cidade com alta demanda, apesar de apresentar maior geração de energia na otimização 3, chega apenas a 33,7% da sua demanda.

Pode ser considerada uma vantagem da otimização 2 o fato de Altamira ter 68% de sua energia suprida pela usina lá instalada. Como Altamira é a cidade que é adicionada da otimização 3, essa usina a mais se apresenta como uma vantagem.

Já que a otimização 2 apresenta custo menor que as 3 e 4, e diante de todas as comparações e justificativas já apresentadas, ela pode ser apontada como o melhor custo-benefício e melhor resultado de otimização.

A potência instalada totaliza, então, 293MW distribuídos por seis usinas termelétricas, como pode ilustrado nas Fig. (29) e (30).

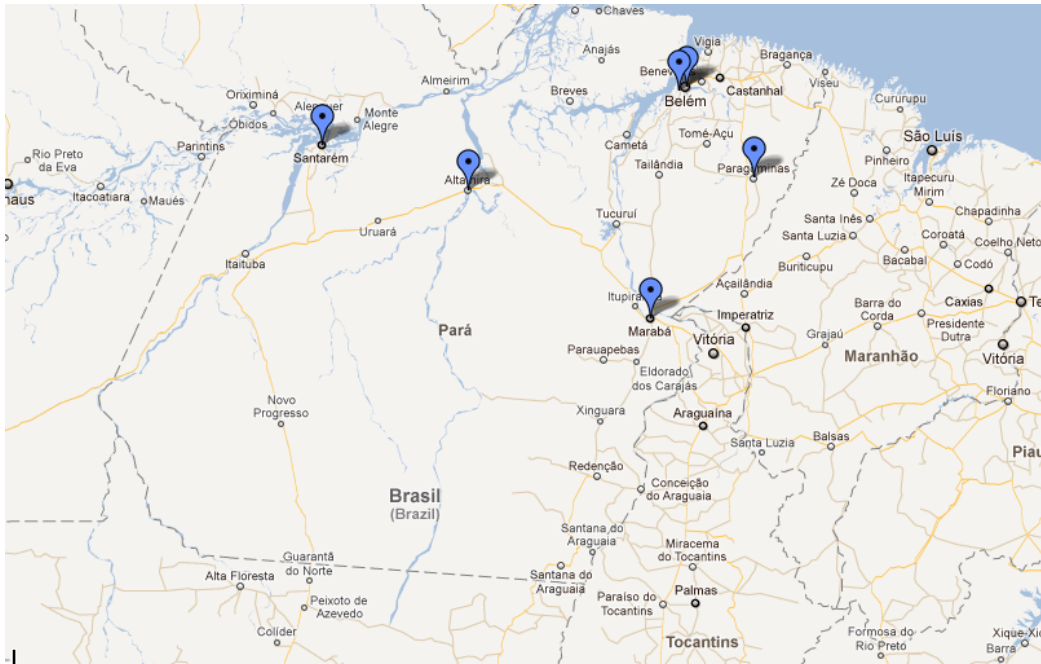


Figura 29 - Localização das usinas

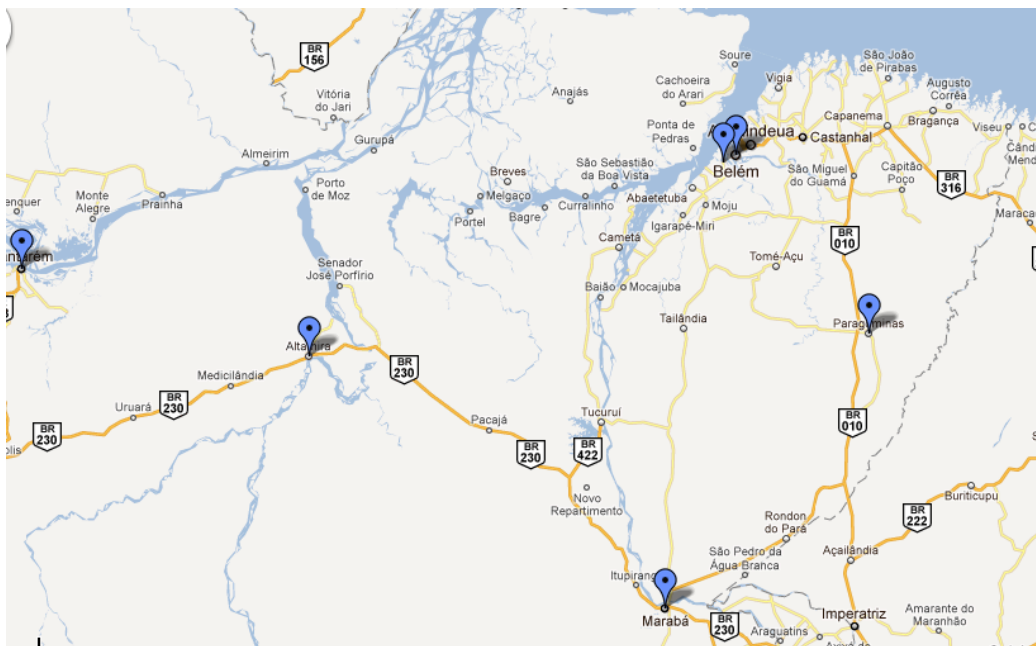


Figura 30 - Localização das usinas 2

3.12.1 Custos e Receita Gerada

Os custos anuais foram obtidos separadamente, em cada uma das seguintes categorias: frete, ambiental de transporte, peletização e ambiental de peletização.

Tabela 34 - Custos de transporte

	Belém	Marabá	Barcarena	Santarém
Custo de frete (R\$)	0	5.964.766,00	2.976.103,00	4.589.118,00
Custo ambiental de transporte (R\$)	0	73.484,00	36.666,00	56.538,00
Custo total de transporte (R\$)	0	6.038.250,00	3.012.769,00	4.645.656,00
	Paragominas	Altamira	TOTAL	
Custo de frete (R\$)	2.772.381,00	1.165.935,00	17.468.303,00	
Custo ambiental de transporte (R\$)	34.156,00	17.037,00	217.881,00	
Custo total de transporte (R\$)	2.806.536,00	1.180.299,00	17.683.510,00	

Belém não revela nenhum custo porque a distância no trecho transportado foi considerada zero, isto é, foram transportados pellets somente de Belém a Belém, não se computando nenhuma distância.

O gráfico da Fig. (31) mostra que cerca de 1% do custo total de transporte é ambiental, consequência da emissão de carbono à atmosfera.

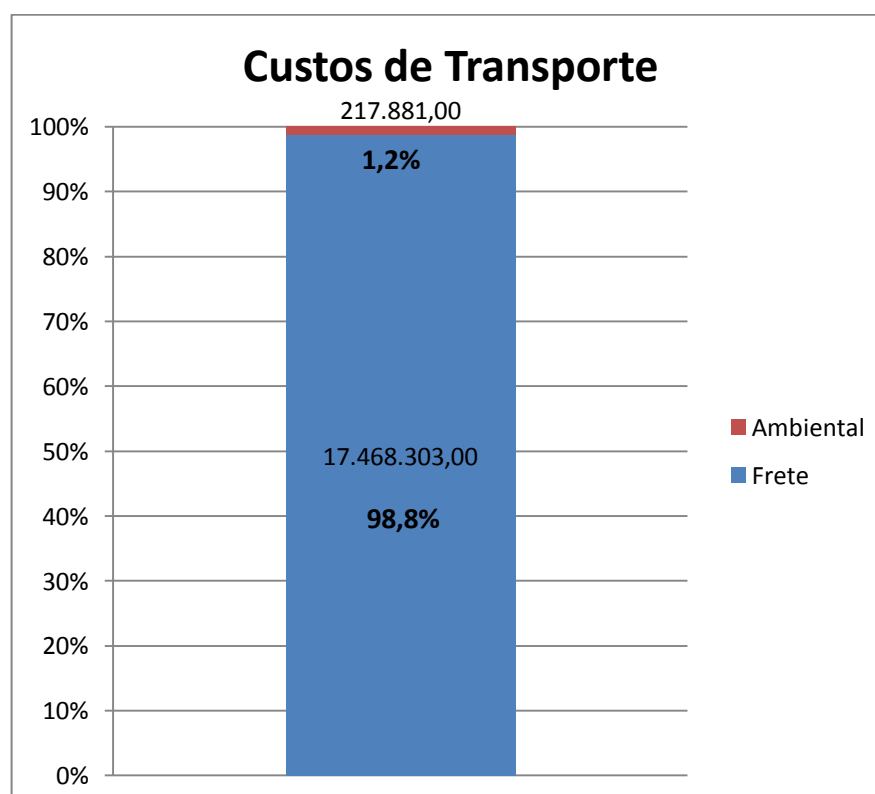


Figura 31 - Segmentação dos custos de transporte

Os custos provenientes da peletização são apresentados no anexo IV. O gráfico da Fig. (32) traz uma melhor visualização dos resultados totais, já que a peletização é realizada em cada município onde haja produção de serragem. Vê-se que para a peletização, apenas 0,7% dos custos totais correspondem a custos ambientais.

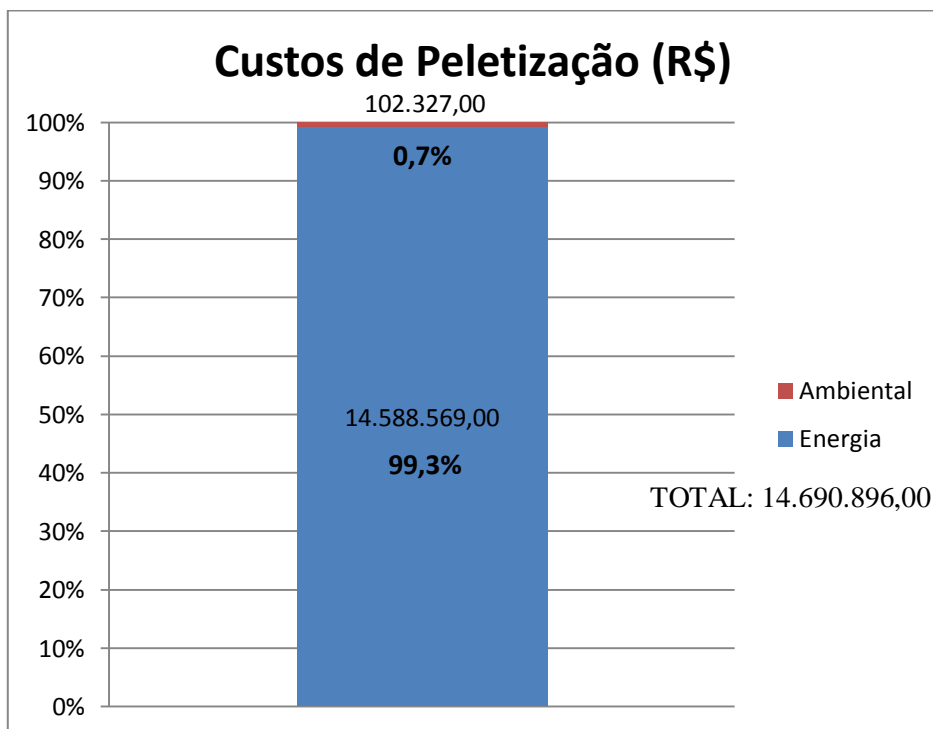


Figura 32- Segmentação dos custos de Peletização

Verificam-se no gráfico da Fig. (32) as porcentagens de cada custo. Os custos ambientais são divididos em custo de transporte e de peletização. A visualização de ambos no gráfico é difícil por sua magnitude em relação ao total: o custo ambiental de peletização soma apenas 0,3% e o custo ambiental de transporte soma 0,7%. Os custos ambientais totais, portanto, somam 1%. Esse valor, apesar de pequeno em relação ao total, é uma parte não contabilizada de custos e que faria diferença se fosse adicionado aos custos realmente pagos do processo. Internalizar os custos ambientais torna-os uma preocupação que atualmente é inexistente ou muito pequena: o ambiente arca com os custos que não são contabilizados e atribuídos aos emissores de carbono à atmosfera.

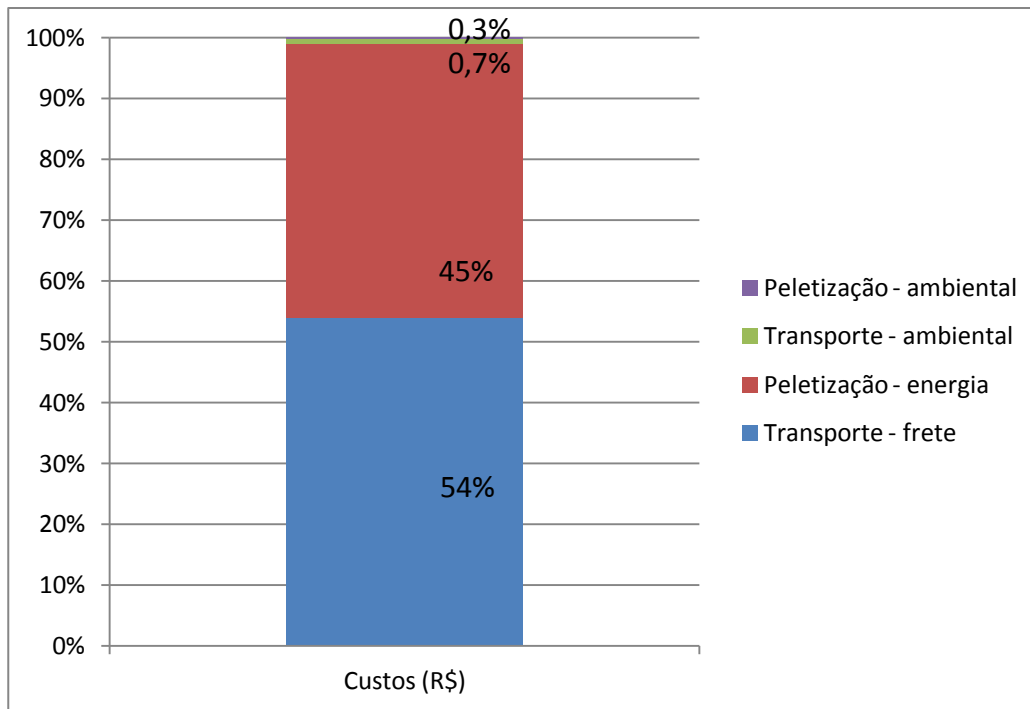


Figura 33 - Segmentação dos custos totais

A receita, relacionados à venda da energia elétrica produzida e à quantidade de carbono evitada pela produção de energia limpa, são mostrados na Tab. (35). Para a receita, a parte ambiental dos resultados chega a 1,8% do total, correspondente a 3,4 milhões de reais anuais.

Tabela 35 – Receita gerada

	Potencial de Geração (MW)	Receita - energia gerada (milhões R\$)	Carbono evitado (milhões R\$)	Receita - total (milhões R\$)
Belém	33,29	21,58	0,39	21,98
Marabá	78,40	50,82	0,93	51,75
Barcarena	35	23,05	0,42	23,47
Santarém	37,35	24,21	0,44	24,66
Paragominas	79,95	51,83	0,95	52,78
Altamira	28,52	18,49	0,34	18,83
TOTAL	293,06	189,99	3,47	193,46

O gráfico da Fig. (34) mostra que os custos representam 16,7% do total de receita de 193,4 milhões de reais anuais. O lucro, subtraindo somente custo de transporte e peletização, representa 83,3% do total, isto é, 161 milhões de reais por ano.

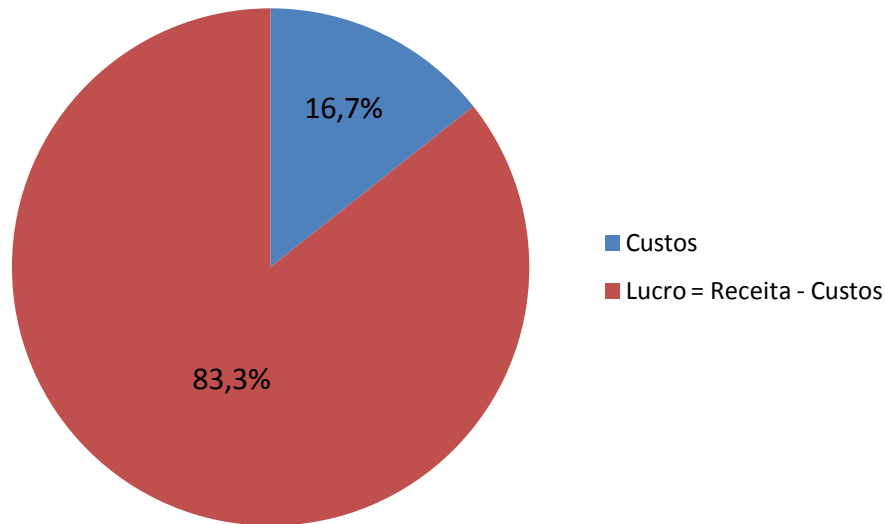


Figura 34 – Receita e Custos

Fazendo-se um balanço das quantidades de carbono evitadas e emitidas à atmosfera anualmente, encontram-se os seguintes números: a energia utilizada para a peletização emite 3.452 toneladas de carbono, o transporte dos pellets emite 7.351 toneladas de carbono, e na geração de energia limpa são evitadas 117.071,5 toneladas de carbono. O resultado é um balanço positivo de 106.268,5 toneladas evitadas, correspondentes a aproximadamente 3,15 milhões de reais no Mercado de Carbono.

3.12.2 Taxa de Pigou

O intuito da taxa de Pigou é internalizar custos que são enviados ao meio-ambiente, ou à sociedade. Com o Mercado de Carbono, é possível por um preço ao carbono emitido à atmosfera. Tendo sido identificadas as emissões acontecidas durante a peletização da biomassa e o transporte dos pellets, pôde-se identificar custos relativos ao prejuízo ao meio-ambiente, que não são arcados por nenhuma parte envolvida nos processos.

Se fosse estabelecida uma taxa para internalizar esses custos, seria apropriado que os responsáveis pela peletização da biomassa, de acordo com os cálculos já realizados e previamente apresentados, paguem uma taxa de 0,7% sobre os custos de energia do processo e os agentes responsáveis pelo transporte paguem uma taxa de 1,25% sobre o valor total de frete pago.

3.12.3 Tecnologias utilizadas

Como já mencionado, as tecnologias que seriam possivelmente utilizadas para transformação da biomassa seriam: a pelletização para densificação da serragem e posterior transporte com menor custo; e duas opções de tecnologia para obtenção de energia: queima direta ou gaseificação.

Para a otimização, é irrelevante a tecnologia utilizada, a única constante que é modificada é eficiência do processo para obtenção da energia elétrica. Tal constante é utilizada apenas para cálculo das potências instaladas, e a receita gerada.

De acordo com Silva (2001), a eficiência da gaseificação é de 80% enquanto a combustão direta tem eficiência entre 60 e 75%.

Nos cálculos apresentados anteriormente, foi adotado o valor de 60% de eficiência, correspondente à menor eficiência possível da combustão direta.

A diferença entre os resultados para a queima direta e gaseificação estarão localizadas somente nos cálculos de potência instalada e receita gerada pela venda da energia elétrica produzida. Os resultados obtidos com a gasificação são apresentados abaixo.

Tabela 36 - Potência Instalada (Gaseificação)

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestre
Belém	44,39	85.331,60	2.135.159
Marabá	104,53	200.942,15	574.816
Barcarena	47,41	91.142,71	153.900
Santarém	49,80	95.730,43	244.164
Paragominas	106,59	204.918,17	99.827
Altamira	38,02	73.097,68	80.300
TOTAL	390,74	751.162,74	3.288.166

Tabela 37 - Receita gerada (Gaseificação)

	Receita (milhões R\$) - energia gerada	Carbono evitado (milhões R\$)	Receita - total (milhões R\$)
Belém	28,78	0,53	29,30
Marabá	67,77	1,24	69,00
Barcarena	30,74	0,56	31,30
Santarém	32,28	0,59	32,87
Paragominas	69,11	1,26	70,37
Altamira	24,65	0,45	25,10
TOTAL	253,32	4,62	257,95

3.12.4 Custos Marginais

Dentro dos resultados obtidos, os custos marginais representam os custos que seriam adicionados ao total se decidir-se por outras rotas que não as ótimas.

O programa GAMS oferece como parte de seus resultados os custos marginais, neste caso calcularam-se dois custos marginais distintos: custo para transporte, que leva em conta o frete, e o custo marginal ambiental. Tais custos incidem sobre as toneladas de biomassa transportada: cada valor, representado nas Tab. (38) e (39), é acrescentado ao valor total a cada tonelada que for desviada da rota ótima, isto é, representa um custo marginal por tonelada. Algumas cidades apresentam custo marginal zero: essas são as soluções ótimas.

Pode-se perceber, a partir da formulação do problema, que o custo marginal é o próprio custo de transporte para a nova localização: o frete multiplicado pela distância entre as cidades. Tal valor pode ser, posteriormente, multiplicado pela total quantidade de pellets transportado para cálculo do valor total.

Tabela 38 - Custos Marginais (frete)

	Belém	Ananindeua	Marabá	Barcarena	Santarém	Castanhal
Altamira	2.250	2.205	1.218	1.855	1.360	2.205
Anapu	1.580	1.535	548	1.185	1.355	1.535
Breu Branco	650	605	0	255	1.805	608
Novo Repartimento	1.108	1.063	0	713	1.773	1.063
Uruará	2.245	2.200	1.213	1.850	430	2.200
Belém	0	47	1.710	67	3.605	186
Breves	800	755	1.188	0	3.210	758
Calha Norte	3.590	3.545	2.558	3.195	0	3.545
Cametá	675	630	0	280	1.698	630
Moju	524	479	911	0	2.934	479
Dom Eliseu	728	683	183	823	2750	543
Goianésia do Para	665	620	0	270	2035	620
Jacundá	1.018	973	0	623	2390	975
Marabá	1.713	1.668	0	1.193	2.573	1.528
Paragominas	768	723	983	863	3.550	580
Rondon do Para	980	935	0	1.075	2.568	793
Tailândia	395	348	265	0	2.288	350
Tomé Açu	68	23	620	43	2.643	25
Tucuruí	688	643	0	293	1.700	643
Ulianópolis	727	682	487	825	3.055	542
Itaituba	2.538	2.493	1.505	2.145	0	2.495
Novo Progresso	2.538	2.493	1.505	2.143	0	2.495
Santarém	3.608	3.563	2.575	3.213	0	3.563

Trairão	2.538	2.493	1.505	2.143	0	2.493
Parauapebas	1.673	1.628	0	1.153	2.568	1.488
Santana do Araguaia	1.675	1.630	0	1.155	2.568	1.490

Tabela 39 - Custos Marginais (frete - continuação)

	Paragominas	Capanema	Altamira
Altamira	2.195	2.320	0
Anapu	1.525	1.650	0
Breu Branco	483	720	450
Novo Repartimento	978	1.178	418
Uruará	2.190	2.315	0
Belém	768	410	2.250
Breves	863	918	1.855
Calha Norte	3.535	3.660	1.345
Cametá	508	745	343
Moju	561	641	1.576
Dom Eliseu	0	568	1.393
Goianésia do Para	498	735	678
Jacundá	853	1.088	1.033
Marabá	985	1.553	1.218
Paragominas	0	608	2.193
Rondon do Para	253	820	1.213
Tailândia	228	465	930
Tomé Açu	0	128	1.285
Tucuruí	520	758	343
Ulianópolis	0	567	1.697
Itaituba	2.485	2.608	293
Novo Progresso	2.483	2.608	293
Santarém	3.553	3.678	1.360
Trairão	2.483	2.608	293
Parauapebas	945	1.515	1.210
Santana do Araguaia	948	1.515	1.213

Tabela 40 - Custos marginais ambientais

	Belém	Ananindeua	Marabá	Barcarena	Santarém
Altamira	28	27	15	23	17
Anapu	19	19	7	15	17
Breu Branco	8	7	0	3	22
Novo Repartimento	14	13	0	9	22
Uruará	28	27	15	23	5
Belém	0	0,58	21	0,82	44
Breves	10	9	15	0	40
Calha Norte	44	44	32	29	0
Cametá	8	8	0	3	21
Moju	6	6	11	0	36
Dom Eliseu	9	8	2	10	34
Goianésia do Para	8	8	0	3	25
Jacundá	13	12	0	8	29
Marabá	21	21	0	15	32
Paragominas	9	9	12	11	44
Rondon do Para	12	12	0	13	32
Tailândia	5	4	3	0	28
Tomé Açu	0,83	0,27	8	0,52	33
Tucuruí	8	8	0	4	21
Ulianópolis	9	8	6	10	38
Itaituba	31	31	19	26	0
Novo Progresso	31	31	19	26	0
Santarém	44	44	32	40	0
Trairão	31	31	19	26	0
Parauapebas	21	20	0	14	32
Santana do Araguaia	21	20	0	14	32

Tabela 41 - Custos Marginais ambientais (continuação)

	Paragominas	Capanema	Altamira
Altamira	27	29	0
Anapu	19	20	0
Breu Branco	6	9	6
Novo	12	15	5
Repartimento			
Uruará	27	29	0
Belém	9	5	28
Breves	11	11	23
Calha Norte	44	45	17
Cametá	6	9	4
Moju	7	8	19
Dom Eliseu	0	7	17
Goianésia do	6	9	8
Para			
Jacundá	11	13	13
Marabá	12	19	15
Paragominas	0	7	27
Rondon do	3	10	15
Para			
Tailândia	3	6	11
Tomé Açu	0	2	16
Tucuruí	6	9	4
Ulianópolis	0	7	21
Itaituba	31	32	4
Novo	31	32	4
Progresso			
Santarém	44	45	17
Trairão	31	32	4
Parauapebas	12	19	15
Santana do	12	19	15
Araguaia			

4 CONCLUSÃO

O Pará é o maior produtor madeireiro do país, deixando para trás, neste processo, grande quantidade de resíduos. Essa biomassa não aproveitada pode ser utilizada como fonte de energia, podendo contribuir para a alimentação energética do Pará ou outros estados. Para fazê-lo, porém, é necessário considerar os custos de transporte da biomassa.

Esse trabalho trata da otimização, utilizando o programa GAMS, de localizações de possíveis usinas que utilizam os resíduos de madeira no estado do Pará e determinação de escalas de produção de tais usinas, calculando, como parte de análise, custos de transporte envolvidos no processo, inclusive custos ambientais.

Para atingir o objetivo proposto, foi realizado o estudo das tecnologias de transformação da biomassa existentes, a escolha de tecnologias mais adequadas, estudo de otimização linear, entendimento do programa GAMS, e coleta de dados relacionados a custos de transporte, produção, energia elétrica, eficiências e escalas de tecnologias. Depois do estudo, foi feita, então, a modelagem matemática do problema proposto e otimização utilizando o programa GAMS.

Para a primeira parte do trabalho, foi feito o estudo de tecnologias para obtenção de energia através de biomassa oriunda de resíduos da indústria madeireira e foram levantados os dados de localização e quantidade destes resíduos no Pará, com o objetivo de obter, na etapa seguinte, a localização ótima para possíveis usinas termelétricas que utilizem resíduos de madeira para geração de energia. Foram coletados, também, dados de custos de transporte e custos ambientais. Foi também iniciado o estudo de otimização linear, com o intuito de ser aprimorado na próxima etapa do projeto e aplicado à solução do problema.

Existem várias tecnologias disponíveis para realizar a conversão da biomassa em energia, entre elas a pirólise, gaseificação e combustão direta. Assim como algumas tecnologias de densificação de biomassa, como a briquetagem, peletização e torrefação. Para o trabalho proposto, a tecnologia de densificação que se mostrou mais apropriada foi a peletização, que possibilita a gaseificação e pode ser utilizada na combustão direta.

A combustão direta é o modo mais simples de transformação da biomassa, para posterior geração de energia, sendo adotada, junto com a gaseificação, como modo de transformação de biomassa para geração de energia neste trabalho.

Obteve-se, como resultado da otimização, seis usinas termelétricas localizadas nos municípios de Belém, Marabá, Barcarena, Santarém, Paragominas e Altamira. As usinas

apresentam potência instalada de aproximadamente 33 MW, 78 MW, 35 MW, 37 MW, 80 MW e 28 MW respectivamente, somando 293 MW de potência instalada total.

Foram calculados os custos anuais de peletização e transporte: R\$17.683.510,00 totais de peletização, sendo R\$102.327,00, que correspondem a 0,7% do custo total, o custo ambiental da energia gasta com o processo; e R\$14.690.896,00 o custo energético do processo de peletização; o transporte totalizou R\$14.690.896,00, sendo R\$217.881,00 o custo ambiental do transporte dos pellets, correspondendo a 1,2% do custo total, e R\$17.468.303,00 o custo relativo ao frete.

Se os custos ambientais fossem internalizados pelos poluidores através da imposição de uma taxa de emissão de carbono, seria adequado o valor de 0,7% para a peletização sobre os custos de energia da peletização e 1,25% sobre os custos de transporte.

A receita gerada totalizou 193,46 milhões de reais, sendo que 3,47 milhões correspondem ao carbono evitado pelas usinas, ou 1,8% da receita total, e aproximadamente 190 milhões pela venda da energia elétrica gerada pelas usinas.

O lucro de todo o processo, tendo sido retirados os custos com peletização de transporte, resultou em 161 milhões de reais, sendo que os custos correspondem a 16,7% da receita.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDO F. N., Comércio Europeu de Cotas de Emissão de Gases de Efeito Estufa: como funcionará e quais são os possíveis impactos para a economia europeia e o meio-ambiente. VII SEMEAD, 2004.
- ALTAFINI C. R. **Apostila sobre Caldeiras**. Universidade de Caxias do Sul, 2002.
- ANDRITZ FUEL & BIOFUEL. **Produção de combustíveis “verdes” a partir de Biomassa**. Disponível em <<http://www.adetec.org.br/Administracao/Eventos/andritz.pdf>>, Acesso em 19/06/2011.
- ANEEL **Nota Técnica nº 269/2009-SRE/ANEEL**, agosto de 2009.
Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/nreh2009857.pdf>>
- BARRETO, L. **Programação Linear – Introdução**, 2010.
Disponível em: <<http://sites.google.com/site/leonardbarreto/pesquisaoperacional>>
Acesso em 19/07/2011.
- BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. **Gasification and Pyrolysis of Biomass in Europe**, in Pyrolysis and Gasification, Elsevier Applied Sciences, Vol. I, pp-129-155, Londres, 1989.
- BEZZON G. **Capítulo V - Compactação de Biomassa**. Biomassa para Energia, 2006
- BONFÁ M. R. L., XAVIER-SANTOS S., CARVALHO C. C., DA SILVA R. GOMES, E. **Produção de Ligninases por Fungos de Degradação Branca em Resíduos Agroindustriais**. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – UNESP, 2003.
- BOURGEOIS J.P., **Thermocondensed lignocelluloses material, and a method and an oven for obtaining it**. US patent. 4954620, 03/1989.
- BUEKENS, A.G., SCHOETERS, J.G., **Modelling of biomass gasification**, in Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion, Elsevier App. Sc. Pub., London, 1985.
- CARVALHO E. A., BRINCK V., **Briquetagem**. Capítulo 15. Livro de Tratamento de Minérios, Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2004.
- COPERSUCAR, **Compactação do Bagaço**. Seminário sobre Bagaço de Cana. Piracicaba, 1983.
- CORTEZ, L. A. B., LORA E. S., AYARZA J. A. C. **Capítulo I – Biomassa no Brasil e no Mundo**. Biomassa para Energia, 2006.
- DANTZIG G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton University Press e RAND Corporation, 1963.
- FELFLI F. F., **Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação**. Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 1999.
- FLORESTAR ESTATÍSTICO, **Fatos e Números do Brasil Florestal**, Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2004
São Paulo, 2006
- GBC INTERNACIONAL, **Crédito de Carbono**. Disponível em: <http://www.gbcinternacional.com/site/index.php?option=com_content&view=article&id=89%3Acredito-de-carbono&catid=34&Itemid=64&lang>, Acesso em 08/06/2011.
- GIRARD P., SHAH N. N., **Developments on Torrefied wood an alternative to charcoal for reducing deforestation**. REUR Technical Series, 1991.
- GÓMEZ E. O., PÉREZ J. M. M., PÉREZ L. E. B., **Capítulo XI - Pirólise rápida para materiais lignocelulósicos para obtenção de bio-óleo**. Biomassa para Energia, 2006.
- GROENEVELD, M.J., **The co-current moving bed gasifier**, Ph.D. Thesis, Twente University of Technology, The Netherlands, 1980.
- GRIVE I, NASH S. G., SOFER A. **Linear and Nonlinear Optimization**. Second Edition. George Mason University, Fairfax, Virginia, 2009.
- GUIA DO TRANSPORTADOR, <http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/lista_tabelas.asp>
- GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid Bed Technology in Materials Processing**. CRC Press, United States, 498p., 1999.

- IMAZON. **Fatos Florestais da Amazônia 2010**. Belém, 2010.
- INSTITUTO CARBONO BRASIL, **Mercado de Carbono**, Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/#mercado_de_carbono>, Acesso em 08/06/2011.
- JUVILLAR, J. B., **Tecnologia de Transformação de Madeira em Carvão**. Uso da Madeira para Fins Energéticos, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Vol I., pp 67-82, Belo Horizonte, 1980.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 491p., USA, 1991.
- KURAMOTO, M., FURUSAWA, T., KUNII, D., **New circulation system of fluidized solids applied to biomass gasification**, proceedings of the Pacific Synfuels Conference, vol. 2, p. 509-516, Tokio, 1982.
- LIMA A. G. G., **Máquinas Térmicas**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Disponível em: <http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/maq_termica.php>, Acesso em 10/06/2011.
- LUENGO C. A., BEZZON G., FELFLI F. E. F., **Capítulo X - Pirólise e Torrefação de Biomassa**. Biomassa para Energia, 2006.
- MARTIN M. F., **El Carbón Vegetal**. Madrid: Mundi-Prensa Castelló, 1989.
- MCCARL B. A., **Agricultural Impact Analysis using GAMS - Introduction to GAMS**, 1998
- MEZERETTE C., GIRARD P. **Environmental Aspects of gaseous Emissions from Wood Carbonisation and Pyrolysis Proecess**, in "Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization", Elsevier Applied Science, Vol I., pp. 263-287, Londres, 1991.
- MELO F. A. O. M, SILVA N., SOUSA S. S., SAMPAIO J. P. S. **Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar**. Acta Scientiarum Technology (UEM), 2010.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT), MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME), **Cálculo dos fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**, 2009.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT), **Fatores de Emissão de CO₂**, 2010. Disponível em < www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora >, Acesso em 19/06/2011.
- NITZ M., GUARDANI R. **Fluidização Gás-Sólido – Fundamentos e Avanços**. Revista Brasileira de Engenharia Química, 2008.
- NOGUEIRA F. **Programação Linear**. 2009. Disponível em <http://www.inf.ufpr.br/ess07/Meus_Programas/PO/4shared/programa%25E7%25E3o_linea_r.pdf>, Acesso em 19/07/2011.>
- OLIVEIRA T. J. P. de, ATAIDE C.H., **Aspectos Fluidodinâmicos De Leito Fluidizado Circulante**. XII Seminário de Iniciação Científica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2008.
- PEREIRA M., **Programação Matemática**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009. Disponível em <http://www.feg.unesp.br/~mapereira/PL_arquivos/Parte1.pdf>
- PINHEIRO G. F., RENDEIRO G., PINHO J. T. **Densidade Energética de Resíduos Vegetais**. Universidade Federal do Pará (UFPA). 2006.
- PRIETO P. N. **Eficiência em caldeiras na agro-indústria canavieira**, Série STAB nº 1, Piracicaba, SP, 1982.
- QUIRINO W. F., **Densificação de Resíduos da Biomassa**. Workshop - Madeira Energética: Principais questões envolvidas na organização e no aperfeiçoamento do uso energético da lenha, 2007.
- RAVEENDRAN, GANESH A., K. KHILAR K.C. **Influence of Ash on Pyrolysis Characteristics of Biomass**. ASAE Summer Meeting, Kansas, USA, 1994.
- REED, T.B., & DAS, A., **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems**, Biomass Energy Foundation Press, USA, 1998.
- MILNE T., **Pyrolysis- the thermal behavior of biomass below 600C**, in Biomass Gasification: Principles and Technology, ed. by Reed, T.B., p. 91-111, Noyes Data, Corporation, 1981.

- ROSENTHAL R. E., **A Gams Tutorial**. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2010.
- SÁNCHEZ C. G., LORA E. S., GÓMEZ E. O., **Capítulo IX – Gaseificação**. Biomassa para Energia, 2006.
- SÁNCHEZ C. C., CAMPO E. R. B. del, **Tecnologia da Gaseificação**. Unicamp, 2003.
- SANTOS M. O. dos, **Programação Matemática – Otimização Linear. Aula 1** Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC. Universidade de São Paulo – USP, 2010. Disponível em < http://wiki.icmc.usp.br/images/f/fd/Aula1PM_mari.pdf > Acesso em 08/06/2011.
- SANTOS M. O. dos, **Programação Matemática – Otimização Linear. Aula 2** Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC. Universidade de São Paulo – USP, 2010. Disponível em <http://wiki.icmc.usp.br/images/1/13/Aula2PM_mari.pdf> Acesso em 08/06/2011.
- SANTOS M. P. dos, **Programação Linear**. Departamento de Matemática Aplicada. Instituto de Matemática e Estatística. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2000.
- SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (CETESB). **Encontro sobre Mudanças Climáticas: São Paulo e o relatório do IPCC**, 2007. Apostila inédita, em versão experimental, sujeita a revisões e aperfeiçoamentos, elaborada
- SEVÁ O., **Usinas hidrelétricas e termelétricas - Roteiro experimental sobre as concepções e o modo de funcionamento**. Unicamp, 2005.
- SILVA, D. A. **Avaliação da Eficiência Energética em uma Indústria de Painéis de Compensado**, (Tese de Doutorado, UFPR), Curitiba, 2001.
- SOUSA, R. M. D. de, **Externalidades**, 2000.
- THE GERMAN SOLAR ENERGY SOCIETY (GDS), **Planning and Installing Bioenergy Systems**, James&James, 2005.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Global Warming Potentials**. Disponível em: <http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php>, Acesso em 08/06/2011.
- ZAMPIERI M., LORA E. S., **Capítulo VIII - Características Construtivas e Avaliação de Caldeiras para Biomassa**. Biomassa para Energia, 2006.
- ZAGATTO, A.J.A.G., **Gaseificadores de médio e grande porte**, Energia- Fontes Alternativas, vol. III, No. 16, p. 44-, 1981.
- ZHANBIN C., **Normal Temperature Briquetting Technology for Biomass with Original Moisture Content**, International Conference on Bioenergy Utilization and Environment Protection, 6th LAMNET Workshop – Dalian, China, 2003.

ANEXOS

	Pág.	
Anexo I	Tabela com oferta de biomassa densificada	60
Anexo II	Distâncias entre os municípios de oferta e demanda de biomassa	61
Anexo III	Mini-tutorial do GAMS	61

Anexo I – Tabela com ofertas de biomassa densificada

Tabela I.1 – Ofertas de biomassa densificada

Município	Oferta (10 ³ m ³)	Pellets (10 ³ kg)
Altamira	76	23.465
Anapu	111	34.271
Breu Branco	47	14.511
Novo Repartimento	89	27.479
Uruará	52	16.055
Belém	279	86.141
Breves	136	41.990
Calha Norte	67	20.686
Cametá	47	14.511
Moju	48	14.820
Dom Eliseu	118	36.433
Goianésia do Pará	82	25.318
Jacundá	81	25.009
Marabá	60	18.525
Paragominas	280	86.450
Rondon do Pará	71	21.921
Tailândia	114	35.198
Tomé-Açu	153	47.239
Tucuruí	128	39.520
Ulianópolis	119	36.741
Itaituba	49	15.129
Novo Progresso	72	22.230
Santarém	96	29.640
Trairão	29	8.954
Parauapebas	40	12.350
Santana do Araguaia	12	3.705
TOTAL	2456	758.290

Anexo II - Imagens da localização das produções madeireiras do Pará

Tabela II.1 – Distâncias - em km

	Altamira	Anapu	Breu Branco	Novo Repartimento	Uruará	Belém	Breves
Belém	900	766	490	603	1084	0	606
Ananindeua	882	748	472	585	1066	18,9	588
Marabá	487	353	230	160	671	684	761
Barcarena	742	608	332	445	926	26,6	286
Santarém	544	676	952	869	358	1442	1570
Castanhal	882	748	473	585	1066	74,5	589
Paragominas	878	744	423	551	1062	307	631
Capanema	928	794	518	631	1112	164	653
Altamira	0	134	410	327	186	900	1028
Redenção	835	701	565	508	1019	1019	1097

Tabela II.2 – Distâncias - em km (continuação)

	Calha Norte	Cametá	Moju	Dom Eliseu	Goianésia do Pará	Jacundá
Belém	1722	717	265	451	450	520
Ananindeua	1704	699	247	433	432	502
Marabá	1309	447	420	233	184	113
Barcarena	1564	559	55,6	489	292	362
Santarém	286	1126	1229	1260	998	1069
Castanhal	1704	699	247	377	432	503
Paragominas	1700	650	280	160	383	454
Capanema	1750	745	312	387	478	548
Altamira	824	584	686	717	455	526
Redenção	1657	795	756	568	519	449

Tabela II.3 – Distâncias - em km (continuação)

	Marabá	Paragominas	Rondon do Pará	Tailândia	Tomé- Açu	Tucuruí	Ulianópolis
Belém	685	307	538	343	208	519	390
Ananindeua	667	289	520	324	190	501	372
Marabá	0	393	146	291	429	244	294
Barcarena	477	345	576	185	198	361	429
Santarém	1029	1420	1173	1100	1238	924	1321
Castanhal	611	232	463	325	191	501	316
Paragominas	394	0	247	276	181	452	99,1
Capanema	621	243	474	371	232	547	326
Altamira	487	877	631	557	695	381	778
Redenção	351	728	482	626	764	592	629

Tabela II.4 - Distâncias - em km (continuação)

	Itaituba	Novo Progresso	Santarém	Trairão	Parauapebas	Santana do Araguaia
Belém	1374	1703	1443	1371	836	1253
Ananindeua	1356	1685	1425	1353	818	1235
Marabá	961	1290	1030	958	167	583
Barcarena	1217	1545	1285	1213	628	1045
Santarém	359	688	0	356	1194	1610
Castanhal	1357	1686	1425	1353	762	1179
Paragominas	1353	1681	1421	1349	545	962
Capanema	1402	1731	1471	1399	773	1189
Altamira	476	805	544	473	651	1068
Redenção	1310	1257	1378	1306	315	236

Anexo III – Mini-tutorial do GAMS

```
Sets
  i  plantas de enlatamento / Seattle, San-Diego /
  j  mercados                / New-York, Chicago, Topeka / ;

Parameters
  a(i) capacidade da planta i em caixas
      /Seattle                350
      San-Diego              600 /
  b(j) demanda do mercado j em caixas
      /New-York              325
      Chicago                300
      Topeka                 275 / ;

Table d(i,j) distância em milhares de milhas
      New-York    Chicago    Topeka
  Seattle    2.5    1.7    1.8
  San-Diego  2.5    1.8    1.4 ;

Scalar f frete em dólares por caixa por milhares de milhas/90/
Parameter c(i,j) custo de transporte em milhares de dólares por
caixa;

      c(i,j) = f*d(i,j)/1000 ;

Variables
  x(i,j) quantidades de remessas em caixas
  z custo total de transporte em milhares de dólares ;

Positive variable x ;

Equations
  custo definindo função objetivo
  oferta(i) observar limite de oferta na planta i
  demanda(j) satisfazer demanda no mercado j;

  custo..      z =e= sum((i,j), c(i,j)*x(i,j)) ;
oferta(i) ..  sum(j, x(i,j)) =l= a(i) ;
demanda(j) .. sum(i, x(i,j)) =g= b(j) ;

Model transport /all/ ;
solve transport using lp minimizing z ;
display x.l, x.m ;
```

III.1. Sets

Sets são os blocos básicos de construção de um modelo GAMS, correspondendo exatamente aos índices nas representações algébricas dos modelos. (Rosenthal, 2010)

Usando como exemplo o problema de transporte anterior, os índices seriam representados no programa GAMS da maneira seguinte:

```
Sets
  i  plantas de enlatamento / Seattle, San-Diego /
  j  mercados                / New-York, Chicago, Topeka / ;
```

Sendo atribuído ao índice i dois valores (Seattle e San Diego) e para j três (New-York, Chicago e Topeka).

Uma ferramenta útil na atribuição dos índices é o asterisco, que indica uma progressão aritmética de razão unitária.

```
Set  t  período de tempo /1991*2000/ ;
Set  m  máquinas /maq1*maq24/ ;
```

III.2. Entrada de dados

Declarações de dados podem ser feitas em três formas: listas, tabelas e atribuições diretas. As listas são exemplificadas a seguir:

```
Parameters
  a(i) capacidade da planta i em caixas
      /Seattle          350
      San-Diego        600 /
  b(j) demanda do mercado j em caixas
      /New-York        325
      Chicago          300
      Topeka           275 / ;
```

As listas não precisam ser declaradas juntas, podendo ser repetida a declaração *parameter* mais de uma vez na estrutura do programa, podendo até ser consecutivas. Como é mostrado abaixo:

```
Parameter  a(i) capacidade da planta i em caixas
          /  Seattle          350
            San-Diego        600 /
Parameter  b(j) demanda do mercado j em caixas
          /  New-York        325
            Chicago          300
            Topeka           275 / ;
```

A Tabela 1 pode ser representada pelo programa GAMS através da declaração *Table*, mostrada a seguir:

```
Table d(i,j) distância em milhares de milhas
```

	New-York	Chicago	Topeka
Seattle	2.5	1.7	1.8
San-Diego	2.5	1.8	1.4 ;

Para tabelas muito grandes, é possível escrever a continuação da tabela em várias linhas, como o exemplo:

```
table ka(m,i) capital inicial de unidades produtivas (100 tons por
ano)
```

	Brasilia	Goiania
produto1	3702	12910
produto2		517
produto3		181
produto4		180
+	BeloHorizonte	
Produto1	9875	
Produto2	1207	
Produto3	148 ;	

Um escalar é considerado um parâmetro que não tem domínio. Ele pode ser declarado e a ele atribuído um valor com a declaração *Scalar*, contendo uma lista de um único valor. (Rosenthal, 2010) Como mostrado abaixo:

```
Scalar f frete em dólares por caixa por milhares de milhas/90/
```

O zero é o valor padrão para todos os parâmetros. Portanto, só se precisa incluir os valores não negativos na lista de valores dos elementos, e eles podem ser incluídos em qualquer ordem.

O método de atribuição direta para entrada de dados difere do método de lista e de tabela porque divide as tarefas de declaração de parâmetro e atribuição de valor ao parâmetro em declarações separadas. (Rosenthal, 2010)

Exemplo de atribuição direta:

```
Parameter c(i,j) custo de transporte em milhares de dólares por
caixa;
```

$$c(i,j) = f*d(i,j)/1000 ;$$

Ao mesmo parâmetro pode ser atribuído um valor mais de uma vez. Cada atribuição tem efeito imediatamente e substitui qualquer valor anterior. (Ao contrário, o mesmo parâmetro não pode ser declarado mais de uma vez. Isso é uma checagem de erro do GAMS para evitar que acidentalmente se use o mesmo nome para duas coisas diferentes). (Rosenthal, 2010)

III.3. Variables

As variáveis de decisão (ou variáveis endógenas) de um modelo expresso no GAMS devem ser declaradas como uma declaração de *Variables*. A cada variável é dado um nome, um domínio (se apropriado), e (opcionalmente) um texto. (Rosenthal, 2010)

Veja o exemplo a seguir:

```
Variables
    x(i,j) quantidades de remessas em caixas
    z custo total de transporte em milhares de dólares ;
Positive variable x ;
```

Essa afirmação resulta em uma declaração de uma remessa variável para cada par (i,j).

A variável z é declarada sem domínio porque é uma quantidade escalar. Cada modelo de otimização do GAMS deve conter uma variável tal que serve como a quantidade a ser minimizada ou maximizada.

Uma vez declarada, a cada variável deve ser atribuído um tipo. Os tipos permitidos são mostrados na Tab. (4).

Tabela 42 - Tipos de variáveis

Fonte: Rosenthal (2010)

Tipo de variável	Intervalo permitido da variável
Free	$-\infty$ a $+\infty$
Positive	0 a $+\infty$
Negative	$-\infty$ a 0
Binary	0 ou 1
Integer	0,1,...,100

A variável que serve como a quantidade a ser otimizada deve ser um escalar e deve ser do tipo *free*.

Note que o domínio de x não precisa ser repetido na atribuição de tipo. Todas as entradas no domínio têm automaticamente o mesmo tipo da variável. (Rosenthal, 2010)

Se necessário determinar limites inferiores ou superiores a uma variável, isso pode ser feito como os exemplos abaixo:

$$x.up(i,j) = capacidade(i,j) ;$$

$$x.lo(i,j) = 10.0 ;$$

Adicionar “.up” depois da variável é utilizado para definir um limite superior e “.lo” , um limite inferior.

III.4. Equações

Equações devem ser declaradas e definidas em declarações diferentes. O formato da declaração é o mesmo para outras entidades do GAMS. Primeiro vem o nome, domínio e texto de um ou mais grupos de equações o inequações a serem declaradas. O modelo de transporte contém as seguintes declarações de equações:

```
Equations
    custo definindo função objetivo
    oferta(i) observar limite de oferta na planta i
    demanda(j) satisfazer demanda no mercado j;
    custo..      z =e= sum((i,j), c(i,j)*x(i,j)) ;
    oferta(i) .. sum(j, x(i,j)) =l= a(i) ;
    demanda(j) .. sum(i, x(i,j)) =g= b(j) ;
```

Os componentes das definições de equações no GAMS são, em ordem:

- Nome da equação a ser definida;
- Domínio;
- Condição de restrição de domínio (opcional);
- O símbolo ‘..’;
- Lado esquerdo da equação;
- Operadores relacionais: =l=, =e=, ou =g=;
- Lado direito da equação.

A notação de somatório no GAMS é baseado na ideia de pensar no somatório como um operador com dois argumentos:

sum(índice da soma, itens somados)

Os dois argumentos são separados por uma vírgula, e se o primeiro argumento exige uma vírgula, então ele deve estar em parênteses. O segundo argumento pode ser qualquer expressão matemática, incluindo somatórios.

Como um simples exemplo, o problema de transporte contém a expressão:

sum(j, x(i,j))

Essa expressão é equivalente a $\sum_j x_{ij}$.

Um somatório um pouco mais complexo é utilizado no exemplo seguinte:

sum((i,j), c(i,j)*x(i,j))

Sendo equivalente a $\sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij}$.

Os operadores relacionais têm os seguintes significados:

- =l= menor ou igual;
- =g= maior ou igual;
- =e= igual.

(Rosenthal, 2010)

III.5. Model

A palavra *model*(modelo)tem um significado preciso para o GAMS. Ele é simplesmente uma coleção de equações. Como outras entidades do GAMS, ele precisa de um nome em uma declaração. O formato da declaração é a palavra-chave *Model* seguida pelo nome do modelo, seguido por uma lista de nomes de equações fechadas entre barras. Se todas as equações previamente definidas deverem ser incluídas, pode-se escrever /all/:

```
Model transport /all/ ;
```

Essa declaração significa o mesmo que:

```
Model transport /custo, oferta, demanda/ ;
```

(Rosenthal, 2010)

III.6. Solve

A resolução da equação é feita com a declaração *solve*, por exemplo:

```
solve transport using lp minimizing z ;
```

O formato do *solve* envolve:

- A palavra-chave *solve*
- O nome do modelo a ser resolvido
- A palavra-chave *using*
- Um procedimento de solução disponível (sendo 'lp' utilizado para otimização linear).
- A palavra-chave *minimizing* ou *maximizing*
- O nome da variável a ser otimizada.

(Rosenthal, 2010)

III.7. Display

Pode-se pedir ao programa que mostre determinados resultados separadamente. Isso é feito através da declaração *display*, como no exemplo abaixo:

```
Display x.l, x.m ;
```

- *x.l* : mostra resultados dos últimos níveis de solução;
- *x.m* : custos marginais (ou custos reduzidos) das variáveis de remessa $x(i,j)$.

O GAMS automaticamente formatará os resultados em tabelas apropriadas. (Rosenthal, 2010)

O resultado mostrado, no exemplo do transporte, para *x.l* (resultado do que se deseja otimizar) é:

	new-york	chicago	topeka
seattle	50.000	300.000	
san-diego	275.000		275.000

Para x.m, o resultado mostrado é:

	chicago	topeka
seattle		0.036
san-diego	0.009	

Esses resultados (x.m) indicam que é ótimo enviar nada de Seattle para Topeka, mas se for insistido em enviar uma caixa, vai ser adicionado 0,036 milhares de \$ (ou \$36,00) ao custo ótimo. (Rosenthal, 2010)

Anexo IV – Resultados detalhados

Tabela IV.1 - Custos de peletização

	Custo energético (R\$)	Custo Ambiental (R\$)	Custo total de peletização (R\$)
Altamira	451.438,00	3.166,00	454.604,00
Anapu	659.337,00	4.625,00	663.962,00
Breu Branco	279.179,00	1.958,00	281.137,00
Novo Repartimento	528.657,00	3.708,00	532.365,00
Uruará	308.878,00	2.167,00	311.045,00
Belém	1.657.252,00	11.624,00	1.668.876,00
Breves	807.836,00	5.666,00	813.502,00
Calha Norte	397.978,00	2.791,00	400.769,00
Cametá	279.179,00	1.958,00	281.137,00
Moju	285.119,00	2.000,00	287.119,00
Dom Eliseu	700.916,00	4.916,00	705.832,00
Goianésia do Pará	487.078,00	3.416,00	490.494,00
Jacundá	481.138,00	3.375,00	484.513,00
Marabá	356.398,00	2.500,00	358.898,00
Paragominas	1.663.192,00	11.666,00	1.674.858,00
Rondon do Para	421.738,00	2.958,00	424.696,00
Tailândia	677.157,00	4.750,00	681.907,00
Tomé Açu	908.815,00	6.375,00	915.190,00
Tucuruí	760.316,00	5.333,00	765.649,00
Ulianópolis	706.856,00	4.958,00	711.814,00
Itaituba	291.059,00	2.042,00	293.101,00
Novo Progresso	427.678,00	3.000,00	430.678,00
Santarém	570.237,00	4.000,00	574.237,00
Trairão	172.259,00	1.208,00	173.467,00
Parauapebas	237.599,00	1.667,00	239.266,00
Santana do Araguaia	71.280,00	500,00	71.780,00
TOTAL	14.588.569,00	102.327,00	14.690.896,00

Tabela IV.2 – Quantidade de pellets transportada

Quantidades de pellets transportada (t)							
	Belém	Marabá	Barcarena	Santarém	Paragominas	Altamira	TOTAL
Altamira						24.548	
Anapu						35.853	
Breu Branco		15.181					
Novo Repartimento		28.747					
Uruará						16.796	
Belém	90.117						
Breves			43.928				
Calha Norte				21.641			
Cametá		15.181					
Moju			15.504				
Dom Eliseu					38.114		
Goianésia do Pará		26.486					
Jacundá		26.163					
Marabá		19.380					
Paragominas					90.440		
Rondon do Para		22.933					
Tailândia			36.822				
Tomé Açu					49.419		
Tucuruí		41.344					
Ulianópolis					38.437		
Itaituba				15.827			
Novo Progresso				23.256			
Santarém				31.008			
Trairão				9.367			
Parauapebas		12.920					
Santana do Araguaia		3.876					
TOTAL	90.117	212.211	96.254	101.099	216.410	77.197	793.288

Tabela IV.3

Custo ambiental de transporte (R\$)							
	Belém	Marabá	Barcarena	Santarém	Paragominas	Altamira	TOTAL
Altamira						0	
Anapu						8.704	
Breu Branco		6.326					
Novo Repartimento		8.333					
Uruará						8.333	
Belém	0						
Breves			22.762				
Calha Norte				11.214			
Cametá		12.294					
Moju			1.562				
Dom Eliseu					11.049		
Goianésia do Pará		8.829					
Jacundá		5.356					
Marabá		0					
Paragominas					0		
Rondon do Para		6.066					
Tailândia			12.342				
Tomé Açu					16.206		
Tucuruí		18.277					
Ulianópolis					6.901		
Itaituba				10.294			
Novo Progresso				28.988			
Santarém				0			
Trairão				6.042			
Parauapebas		3.909					
Santana do Araguaia		4.094					
TOTAL	0	73.484	36.666	56.538	34.156	17.037	217.881

Tabela IV.4 – Custo de transporte - frete

Custo de transporte - frete (R\$)							
	Belém	Marabá	Barcarena	Santarém	Paragominas	Altamira	TOTAL
Altamira						0	
Anapu						706.515	
Breu Branco		513.475					
Novo Repartimento		676.400					
Uruará						459.420	
Belém	0						
Breves			1.847.560				
Calha Norte				910.195			
Cametá		997.928					
Moju			126.768				
Dom Eliseu					896.800		
Goianésia do Pará		716.680					
Jacundá		434.768					
Marabá		0					
Paragominas					0		
Rondon do Para		492.385					
Tailândia			1.001.775				
Tomé Açu					1.315.418		
Tucuruí		1.483.520					
Ulianópolis					560.163		
Itaituba				835.573			
Novo Progresso				2.352.960			
Santarém				0			
Trairão				490.390			
Parauapebas		317.300					
Santana do Araguaia		332.310					
TOTAL	0	5.964.766	2.976.103	4.589.118	2.772.381	1.165.935	17.468.303

Tabela IV.5 – Custo total de transporte

Custo total de transporte (R\$)							
	Belém	Marabá	Barcarena	Santarém	Paragominas	Altamira	TOTAL
Altamira						0	
Anapu						715.219	
Breu Branco		519.801					
Novo Repartimento		684.733					
Uruará						465.080	
Belém	0						
Breves			1.870.322				
Calha Norte				921.409			
Cametá		1.010.222					
Moju			128.330				
Dom Eliseu					907.849		
Goianésia do Pará		725.509					
Jacundá		440.124					
Marabá		0					
Paragominas					0		
Rondon do Para		498.451					
Tailândia			1.014.117				
Tomé Açu					1.331.623		
Tucuruí		1.501.797					
Ulianópolis					567.064		
Itaituba				845.867			
Novo Progresso				2.381.948			
Santarém				0			
Trairão				496.432			
Parauapebas		321.209					
Santana do Araguaia		336.404					
TOTAL	0	6.038.250	3.012.769	4.645.656	2.806.536	1.180.299	17.683.510

Tabela IV.6 – Resultados da Otimização 1

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestral (MWh)
Belém	33,29	71.908,65	2.135.159
Marabá	76,96	166.240,43	574.816
Barcarena	35,56	76.805,65	153.900
Santarém	37,35	80.671,71	244.164
Paragominas	79,95	172.683,85	99.827
Altamira	28,52	61.599,17	80.300
Redenção	1,43	3.092,85	76.150
TOTAL	293,06	633.002,31	3.364.316

Tabela IV.7 – Resultados da Otimização 5

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestre (MWh)
Belém	33,29	63.998,70	2.135.159
Marabá	128,99	247.966,28	574.816
Barcarena	35,56	68.357,03	153.900
Santarém	43,55	83.726,61	244.164
Castanhal	33,41	64.228,08	184.406
Ananindeua	18,26	35.096,06	412.966
TOTAL	293,06	563.372,05	3.705.411

Tabela IV.8 - Resultados da Otimização 6

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestre (MWh)
Belém	33,29	71.908,65	2.135.159
Marabá	128,99	278.613,80	574.816
Barcarena	35,56	76.805,65	153.900
Santarém	43,55	94.074,84	244.164
Ananindeua	51,67	111.600,16	412.966
TOTAL	293,06	633.002,31	3.521.005

Tabela IV.9 - Resultados da Otimização 7

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestre (MWh)
Belém	33,29	71.908,65	2.135.159
Marabá	172,54	372.687,84	574.816
Barcarena	35,56	76.805,65	153.900
Ananindeua	51,67	111.600,16	412.966
TOTAL	293,06	633.002,31	3.276.841

Tabela IV.10 - Resultados da Otimização 8

	Potencial de Geração (MW)	Geração por trimestre (MWh)	Demanda trimestre (MWh)
Belém	33,29	71.908,65	2.135.159
Marabá	186,14	402.069,87	574.816
Ananindeua	73,62	159.023,79	412.966
TOTAL	293,06	633.002,31	3.122.941