



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DA LOGÍSTICA DE
PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS
SÓLIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS
AGRÍCOLAS**

Por,
Rafael Hakme

Brasília, 27 de novembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DA LOGÍSTICA DE PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

POR,

Rafael Hakme

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

Banca Examinadora

Prof. Armando Caldeira-Pires, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Thiago Oliveira Rodrigues, UnB/EFL

Prof. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, UnB/ENM

Brasília, 27 de novembro de 2015.

RESUMO

A partir da teoria de otimização linear e da utilização do programa GAMS, este trabalho pretende identificar possíveis localizações ótimas para o estabelecimento de usinas termoelétricas que possam utilizar os resíduos da agricultura oriundos da produção de soja e milho no Estado de Mato Grosso. O processo tecnológico a ser analisado para essa otimização envolve a densificação energética dos resíduos de biomassa, através da torrefação, briquetagem e peletização. Também foram tratados o transporte da biomassa até as termoelétricas e a utilização dessa energia através de gaseificação ou combustão direta para a geração de eletricidade. A função otimizada será o custo ambiental e do uso de combustível para o transporte da biomassa. Serão calculados os custos de transporte entre unidades de densificação e usinas, custos de densificação e custos ambientais de emissão de carbono para ambos os processos. Também serão calculados os potenciais, as receitas geradas pela venda de energia elétrica e pela emissão de gás carbônico evitada.

Palavras-chave: biomassa, otimização linear, GAMS, localização, bioenergia

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 use the agricultural wastes originated from the production of soybeans and corn in the state of Mato Grosso. The technological process to be optimized involves the energetic densification of the biomass residues, through the torrefaction, briquetting and palletization. The biomass transportation to the thermoelectric plants and the energy utilization through the gasification or the direct combustion for the energy generation will be also analyzed. The function to be optimized will be the environmental cost and the fuel used for the for the transportation of the biomass. Transportation costs between the densification and plants, densification and environmental costs of carbon emission from both processes will be calculated. The revenue generated by the electric energy sales and by the avoided carbon emissions will be calculated too.

Keywords: biomass, linear optimization, GAMS, siting, bioenergy

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO BRASILEIRO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA AGRICULTURA E O POTENCIAL DE ENERGIA	2
1.2	OBJETIVO.....	10
1.2.1	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	10
2	ESTADO DA ARTE CIENTÍFICO	11
3	CONTEXTUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA	13
3.1	BIOMASSA	13
3.2	TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	14
3.3	TECNOLOGIAS DE DENSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA	16
3.3.1	Peletização.....	16
3.3.2	Briquetagem	17
3.3.3	Torrefação	19
3.4	TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA EM BIOENERGIA	20
3.4.1	Conversão termoquímica.....	21
3.4.1.1	Combustão direta.....	22
3.4.1.2	Gaseificação	22
3.4.1.3	Pirólise.....	23
3.4.2	Conversão bioquímica.....	23
3.4.2.1	Digestão anaeróbica	23
3.4.2.2	Fermentação alcoólica.....	23
3.4.3	Conversão físico-química.....	24
3.5	GERAÇÃO DE ENERGIA.....	25
3.5.1	Turbinas a vapor.....	25
3.5.2	Turbinas a gás.....	26
3.6	MERCADO DE CARBONO	27

4	OTIMIZAÇÃO LINEAR	30
4.1	REPRESENTAÇÃO DE PROBLEMAS	30
4.2	TEORIA FUNDAMENTAL DA PROGRAMAÇÃO LINEAR	31
4.3	DUALIDADE	34
4.3.1	Modelo primal e dual	34
4.3.2	Teorema dual.....	34
4.3.3	Relação entre o modelo primal e dual	35
4.3.4	Valor ótimo do modelo dual em termos de economia.....	36
4.3.5	Imposto de Pigou.....	36
4.4	EXEMPLO APLICADO A UM PROBLEMA DE TRANSPORTE.....	36
4.5	O PROGRAMA GAMS.....	39
5	MODELO TECNOLÓGICO A SER ANALISADO	41
5.1	MODELOS DE PREVISÃO.....	42
5.2	VOLATILIDADE DA DEMANDA	42
5.3	OBJETIVOS CONFLITANTES E TROCAS COMPENSATÓRIAS.....	42
5.4	MODELO MULTIOBJETIVOS.....	43
5.5	JUSTIFICATIVA DO MODELO TECNOLÓGICO ADOTADO	43
6	OTIMIZAÇÃO.....	45
6.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	45
6.2	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO NO ESTADO DE MATO GROSSO ⁴⁷	
6.3	PROVÁVEIS LOCALIZAÇÕES DAS USINAS TERMOELÉTRICAS	50
6.4	DISTÂNCIAS ENTRE MUNICÍPIOS	51
6.5	CUSTOS RELACIONADOS AO TRANSPORTE	53
6.5.1	Custos dos fretes dos briquetes	54
6.5.2	Custos ambientais relacionados ao transporte.....	55
6.6	CUSTOS DE DENSIFICAÇÃO DA BIOMASSA BRIQUETAGEM.....	56
6.6.1	Custos ambientais relacionados a densificação da biomassa	57
6.7	CUSTOS TOTAIS	57

6.8	POTÊNCIA INSTALADA DAS USINAS	58
6.9	RECEITA GERADA	59
6.10	AVERIGUAÇÃO DA NECESSIDADE DA OTIMIZAÇÃO.....	60
6.11	PROGRAMAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO.....	61
6.12	RESULTADOS	63
6.12.1	Taxa de Pigou.....	65
6.12.2	Tecnologias empregadas	65
6.12.3	Custos Marginais.....	65
7	CONCLUSÃO	68
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	71
9	ANEXOS	77
	ANEXO I – Lista de países que ratificaram o Protocolo de Quioto	77
	ANEXO II – CENÁRIO 1 – 80% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS	78
	ANEXO III – CENÁRIO 2 – 50% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS	85
	ANEXO IV – CENÁRIO 3 – 20% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS	92
	ANEXO V – PROGRAMAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO EM AMBIENTE GAMS.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa. Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2003 – ANEEL	15
Figura 2 - Pellets. FONTE: Site Balkangrain.....	16
Figura 3 - Prensa de matriz anular. FONTE: Site Akahl.....	17
Figura 4 - Processo de briquetagem por extrusão contínua.....	19
Figura 5 - Ilustração de algumas das tecnologias de reator utilizados para a torrefação. FONTE: Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: COMBUSTION, GASIFICATION, PYROLYSIS, TORREFACTIONAND FERMENTATION, 2013.	20
Figura 6 - Esquema de gaseificadores de leito fluidizado: (a) fluidizado borbulhante e (b) de leito fluidizado circulante. FONTE: Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: COMBUSTION, GASIFICATION, PYROLYSIS, TORREFACTIONAND FERMENTATION	22
Figura 7 – Exemplo de uma planta de geração de energia por biomassa com turbina movida a vapor de água. FONTE: site http://www.seropedicaonline.com/wp-content/uploads/2014/02/cental-biomassa-calor-e-electricidade.png	26
Figura 8 - Turbina a gás da EBX Parnaíba. FONTE: < http://i.ytimg.com/vi/k2Y24gzaAmc/maxresdefault.jpg >	27
Figura 9 - Solução gráfica do problema em questão. Fonte: Santos, 2010.	33
Figura 10- Principais desafios impostos ao SCM e a modelagem utilizada. FONTE: Modelos de previsão no supply chain management. (2006).....	41
Figura 11 - Mapa da distribuição dos municípios geradores de biomassa do Estado de Mato Grosso. FONTE: Google Maps.....	51
Figura 12 - Municípios alvos para o recebimento de usinas de processamento de biomassa para geração de energia elétrica. FONTE: Google Maps.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade produzida, em toneladas, segundo os principais produtos - Brasil - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.	3
Tabela 2 - Quantidade produzida de cereais, leguminosas e oleaginosas, em ordem decrescente, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e os principais produtos - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.	5
Tabela 3 - Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de milho, em ordem decrescente de quantidade produzida (t) - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.	7
Tabela 4 - Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de soja, em ordem decrescente de quantidade produzida, em toneladas - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.	8
Tabela 5 – Representação de problemas na forma canônica e na forma reduzida	31
Tabela 6 - Dados do exemplo: Mistura para ração.....	32
Tabela 7 - Modelos Primal e Dual	34
Tabela 8 - Relação entre modelo Primal e Dual.....	35
Tabela 9 - Dados do problema de transporte.....	37
Tabela 10 - Dados e variáveis do problema	38
Tabela 11 - Quantidades transportadas ótimas (em nº de caixas)	38
Tabela 12 - Custos marginais	39
Tabela 13 - Quantidade de resíduos gerados pelas culturas da soja e do milho nos principais municípios do Estado de Mato Grosso, em toneladas, em ordem decrescente - 2014.	47
Tabela 14 - Poder Calorífico dos resíduos das culturas da soja e do milho. FONTE: ¹ ABIB (2010) e ² CENBIO (2012).	48
Tabela 15 - Potencial energético dos resíduos gerados na agroindústria das principais culturas brasileiras em MW/ano - 2014.	49
Tabela 16 - Cenários de aproveitamento dos resíduos das culturas da soja e milho nos principais municípios produtores do Estado de Mato Grosso, em toneladas.....	50
Tabela 17 - Distâncias entre municípios alvos para recebimento de biomassa e potenciais municípios geradores de biomassa sólida, em quilômetros, no Estado de Mato Grosso. FONTE: Google Maps.	53
Tabela 18 - Tabela base de preços mínimos de frete no Estado de Mato Grosso. FONTE: Secretaria de Fazenda do Estado de Mato Grosso (2014).....	54
Tabela 19 - Custos relacionados ao frete.....	55

Tabela 20 - Valor médio de litros por quilometragem para veículos do ciclo Diesel. FONTE: MMA, 2011.....	56
Tabela 21 - Fatores de emissão de CO2. FONTE: MMA, 2011.	56
Tabela 22 - Representação das variáveis.....	57
Tabela 23 - Geração de Energia, Demanda de energia e variação percentual entre ambas.	60
Tabela 24 - Definições e símbolos a serem utilizados na programação.	61
Tabela 25 - Novas variáveis envolvidas no custo do transporte.	62
Tabela 26 - Custos marginais de transporte de biomassa para o Estado de Mato Grosso (R\$). .	66

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	[m³]
$oferta(i)$	-	Oferta	[caixas]
O_i	-	Oferta de biomassa já densificada	[kg]
OX_c	-	Fator de oxidação do combustível	
$PotInst$	-	Potência Instalada	[MW/ano]
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

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
CO	-	Monóxido de Carbono
CO ₂	-	Dióxido de Carbono
ERB	-	Energias Renováveis do Brasil
GAMS	-	Generalized Algebraic Modeling System
GCA	-	Grupo Combustíveis Alternativos
GDS	-	The German Solar Energy Society
GEE	-	Gases do Efeito Estufa
GLP	-	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	-	Global Warming Potencial
H ₂	-	Gás hidrogênio
HC	-	Hidrocarbonetos
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Imazon	-	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
IPEA	-	Instituto Econômico de Geografia e Estatística
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCT	-	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	-	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MME	-	Ministério de Minas e Energia
CH ₄	-	Metano
NO _x	-	Óxidos de Nitrogênio
RCE	-	Redução Certificada de Emissões
SCM	-	Supply Chain Management
UNFCCC	-	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a busca por formas alternativas de energia tem se tornado fundamental. Hoje o Brasil dispõe de uma matriz energética de origem predominantemente renovável, sendo 61,61% de origem hidráulica (que corresponde a 65,2% da oferta interna no ano base de 2014). As fontes renováveis representam 74,6% da oferta interna de eletricidade no Brasil (BEN, 2015). É importante lembrar que toda geração de fontes renováveis está sujeita a oscilações eventuais, como o regime de chuvas desfavorável, menor intensidade dos ventos e radiação solar, ou safra abaixo do esperado. Dessa forma, dada a atual forma de consumo da sociedade e a sua dependência de recursos energéticos, é essencial que haja não apenas um aumento, mas também uma diversificação das formas de produção de energia elétrica possibilitando-se uma estrutura de compensação de energia.

É nesse contexto que se torna necessário refletir a respeito da importância da utilização da biomassa como fonte energética. Como será tratado posteriormente, o Brasil possui vantagens que o tornam capaz de ser um ator importante na comercialização e produção de mercadorias agrícolas e agroindustriais. A partir dessa produção são obtidos resíduos, também denominados biomassa, os quais podem ser aproveitados para a geração de energia elétrica. Assim, essa grande produção agrícola brasileira permite que o país apresente grande potencial para a produção de energia elétrica a partir da biomassa. O aproveitamento dos resíduos de origem agrícola permitiria que o país pudesse aumentar a oferta e diversificação interna de energia, preservar o meio ambiente e a possibilidade de instalação de usinas próximas aos consumidores, reduzindo a necessidade de investimentos em linhas de transmissão e seus impactos associados (CASTRO, 2009).

Dessa forma, construiu-se uma base de dados das estimativas dos montantes de resíduos orgânicos gerados pelas atividades de agricultura (IBGE, 2014) e, do potencial energético destes resíduos, foram avaliadas as principais culturas agrícolas brasileiras. Os resultados servem de base para a avaliação proposta por este projeto, por meio de uma análise de otimização linear, realizada através do software GAMS, da logística de produção de biocombustíveis sólidos a partir de resíduos agrícolas no estado de Mato Grosso. Será levado em consideração as possibilidades econômicas de utilização desses biocombustíveis para a produção de energia por meio de reaproveitamento da biomassa (IPEA, 2012), bem como sua sazonalidade, oscilações das commodities, distâncias entre os produtores e consumidores dos biocombustíveis sólidos.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO BRASILEIRO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA AGRICULTURA E O POTENCIAL DE ENERGIA

Nesta seção, serão apresentados os estudos referentes à matriz energética brasileira, ao panorama da produção agrícola brasileira e a geração de resíduos sólidos, bem como seu potencial como fonte de matéria-prima para produção de energia em usinas termoeletricas.

MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA

O número total de usinas instaladas no Brasil que estão em operação é de 4.331. Destas, 512 usinas têm como fonte de geração de energia elétrica a biomassa que corresponde a 8,93% (ou 13,8 GW) da Capacidade Instalada. Desse total, o bagaço de cana-de-açúcar representa 7,10% (ou 10,9 GW) da capacidade total instalada e, os outros 1,83%, têm como fontes o biogás, o capim elefante (~65,7 MW), a casca de arroz (~39,7 MW), os óleos vegetais, o carvão vegetal, o gás de alto forno, o licor negro e os resíduos florestais. Assim, será excluída a possibilidade de geração de energia pelos resíduos da cana-de-açúcar, pois esta representa 79,48% da capacidade instalada quanto a biomassa como fonte de energia e este trabalho deseja buscar novas fontes de energia renovável (Banco de Geração de Informação – ANEEL - 2015).

PANORAMA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA BRASILEIRA

O Brasil é um dos países com maior expressão quanto a produção agrícola. A agroindústria é o segmento da indústria que cuida do processamento da produção primária de alimentos, constituindo um dos principais segmentos da economia brasileira. Este setor possui grande impacto na geração do produto interno bruto (PIB). O baixo valor agregado compensado pelo alto volume de comercialização nas exportações e a sua contribuição para o controle da inflação (alguns produtos primários constituem parte da cesta básica, como o trigo) são pontos de relevância para o desempenho da economia brasileira (PESSÔA, 2009), bem como para o setor elétrico brasileiro.

A agricultura contribui com a geração de empregos, riqueza, desenvolvimento social e alimentos. Segundo a projeção realizada pelo Ministério da Agricultura, Fazenda e Pecuária – MAPA (Brasil, 2010c), a taxa anual média de crescimento da produção de lavouras, entre 2010 e 2020, poderá ser da ordem de 2,67%. Esta projeção indica que o Brasil terá, em 2021, uma produção de grãos superior a 195 milhões de toneladas (t), numa área superior a 50,7 milhões de hectares (ha) (Rossi, 2011). Porém, a medida em que ocorre essa expansão, também aumentam os níveis de impacto ambiental e geração de resíduos. Este último, um fator importante para as

análises deste trabalho, é uma das preocupações do setor e do governo devido à preocupação com o destino e/ou tratamento, sendo o reaproveitamento uma solução alternativa.

Assim, o uso da biomassa presente nesses resíduos provenientes da agroindústria, além de contribuir positivamente para a saúde pública e preservação do meio ambiente, contribuem para o desenvolvimento econômico do setor agroindustrial e elétrico, como fonte de energia renovável (IPEA, 2010).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – realiza mensalmente o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA, no qual a unidade de investigação é o município, que compõe as análises da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2014). A Tabela 1 apresenta os principais produtos, em ordem decrescente de quantidade produzida (t), da agricultura brasileira em 2014.

Tabela 1 - Quantidade produzida, em toneladas, segundo os principais produtos - Brasil - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.

Principais produtos	Quantidade produzida (t)
Cana-de-açúcar	737.155.724
Soja (em grão)	86.760.520
Milho (em grão)	79.877.714
Mandioca	23.242.064
Laranja	16.927.637
Arroz (em casca)	12.175.602
Banana (cachos)	6.946.567
Trigo (em grão)	6.261.895
Tomate	4.302.777
Algodão herbáceo (em caroço)	4.236.763
Batata-inglesa	3.689.836
Feijão (em grão)	3.294.586
Café (em grão) Total	2.804.070
Melancia	2.171.288

Café (em grão) arábica	2.012.172
Coco-da-baía	1.946.073
Abacaxi	1.762.938
Cebola	1.646.498
Mamão	1.603.351
Uva (total)	1.453.889
Maçã	1.378.617
Manga	1.132.449
Limão	1.101.762
Tangerina	965.139
Fumo (em folha)	862.396
Maracujá	823.284
Café (em grão) canephora	791.898
Erva-mate (folha verde)	620.484
Melão	589.939
Borracha (látex coagulado)	320.649
Cacau (em amêndoa)	273.973
Pimenta-do-reino	42.339

A safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas (grãos) totalizou 194,6 milhões de toneladas em 2014, valor 3,5% superior ao de 2013. Em 2014, a soja bateu novo recorde de produção com mais de 86,8 milhões de toneladas produzidas e se apresenta como potencial candidata a geração de resíduos pela agricultura, seguida pelo milho, para geração de energia a partir dos resíduos dessas culturas agrícolas (IBGE, 2014).

Da Tabela 2, conclui-se que o Centro-Oeste, com 83 milhões de toneladas (42,7%) é o maior representante no volume da produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas. Já o Estado

de Mato Grosso, foi o líder em produção nacional com participação de 24,3% e, por este motivo, será o estado alvo de estudo deste trabalho, a nível municipal.

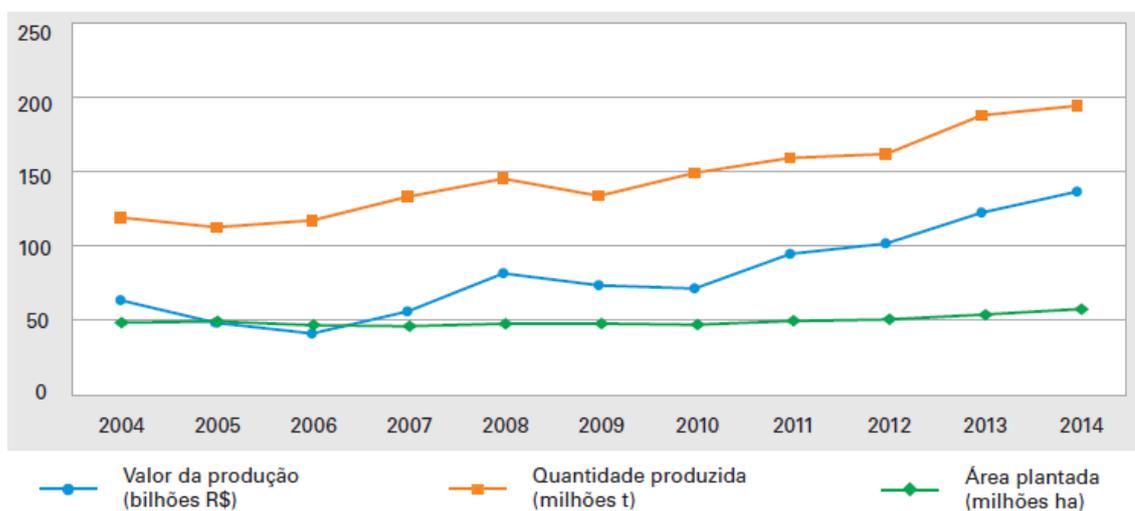
Tabela 2 - Quantidade produzida de cereais, leguminosas e oleaginosas, em ordem decrescente, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e os principais produtos - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.

Grandes Regiões, Unidades da Federação e principais produtos	Quantidade produzida (t)
Brasil (Total)	194.572.586
Mato Grosso	47.369.203
Paraná	35.900.112
Rio Grande do Sul	28.799.468
Goiás	19.742.503
Mato Grosso do Sul	14.971.983
Minas Gerais	11.707.393
Demais Unidades da Federação	36.081.924
Grandes Regiões	
Centro-Oeste	82.991.297
Sul	71.037.697
Nordeste	71.037.697
Sudeste	16.226.750
Norte	17.976.422
Principais produtos	
Soja (em grão)	86.760.520
Milho (em grão)	79.877.714
Arroz(em casca)	12.175.602
Algodão Herbáceo (caroço)	2.584.425
Feijão (em grão)	3.294.586
Trigo (em grão)	6.261.895

Sorgo granífero (em grão)	2.279.114
Amendoim (em casca)	402.626
Aveia (em grão)	432.136
Cevada (em grão)	251.539
Girassol (em grão)	158.563
Mamona (em baga)	37.582
Triticale (em grão)	51.832
Centeio (em grão)	4.452

A soja é a principal cultura encontrada com participação de 44,6% na produção. O milho ocupa o segundo lugar com 27,6% de participação, procedido pelo arroz com 4,1%. Essas três culturas, juntas, representam 91,9% da produção. Para fins de análise, o arroz será excluído devido a sua baixa representatividade perante as culturas da soja e do milho. Salienta-se que entre os anos de 2004 e 2014, esse grupo de culturas cresceu, com maior ênfase a partir do ano de 2010, conforme o Gráfico 1, reforçando a escolha dessas culturas para o estudo.

Gráfico 1 - Quantidade produzida, área plantada e valor da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas - Brasil - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.



De acordo com o Anuário Estatístico do Agronegócio (Brasil, 2010c), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho. A cultura do milho teve seu plantio em 5.165 municípios brasileiros e compreende a maior abrangência nacional dentre as culturas analisadas. A Tabela 3, apresenta as principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de milho, em ordem decrescente de quantidade produzida (t).

Tabela 3 - Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de milho, em ordem decrescente de quantidade produzida (t) - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.

Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de milho	Quantidade Produzida (t)	Participação no total da produção nacional (%)
Brasil	79.877.714	100
Mato Grosso	18.071.316	22,6
Paraná	15.823.241	19,8
Goiás	9.088.029	11,4
Mato Grosso do Sul	8.251.121	10,3
Minas Gerais	6.966.931	8,7
Rio Grande do Sul	5.389.520	6,7
Demais Unidades da Federação	16.287.556	20,4
20 municípios com as maiores produções de milho		
TOTAL	17.682.370	22,1
Sorriso - MT	2.007.720	2,5
Jataí - GO	1.476.000	1,8
Rio Verde - GO	1.234.500	1,5
Maracaju - MS	1.082.940	1,4
Nova Mutum - MT	997.860	1,2
Cristalina - GO	993.000	1,2
Nova Ubiratã - MT	943.200	1,2
Sapezal - MT	863.700	1,1
Campo Novo do Parecis - MT	805.200	1,0
Sidrolândia - MS	799.440	1,0
Lucas do Rio Verde - MT	765.600	1,0
Ponta Porã - MS	723.600	0,9
Primavera do Leste - MT	704.652	0,9
Brasília - DF	666.390	0,8
São Desidério - BA	657.275	0,8
Dourados - MS	650.600	0,8
Montividiu - GO	627.300	0,8
Campos de Júlio - MT	581.713	0,7
Campo Verde - MT	581.580	0,7
São Gabriel do Oeste - MS	520.100	0,7
Demais municípios	62.195.344	77,9

Dos 20 municípios mais representativos quanto a produção de milho, 9 estão localizados no Estado de Mato Grosso (Tabela 3) e, juntos, produziram 8.622.613 toneladas de milho no ano de 2014 (ou 10,79% da produção nacional de milho). Por esta razão, irão compor a base dos municípios de estudo deste trabalho quanto a geração de resíduos pela cultura do milho.

A soja, com produção recorde, totalizou o valor de 86,8 milhões de toneladas produzidas em 2014. Destas, mais de 26,4 milhões foram produzidas no Estado de Mato Grosso, o estado com maior produção dessa cultura, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de soja, em ordem decrescente de quantidade produzida, em toneladas - 2014. FONTE: Produção Agrícola Municipal, IBGE, 2014.

Principais Unidades da Federação e os 20 municípios com as maiores produções de soja	Quantidade Produzida (t)	Participação no total da produção nacional (%)
Brasil	86.760.520	100,0
Mato Grosso	26.495.884	30,5
Paraná	14.913.173	17,2
Rio Grande do Sul	13.041.720	15,0
Goiás	8.939.560	10,3
Mato Grosso do Sul	6.339.396	7,3
Minas Gerais	3.345.549	3,9
Demais Unidades da Federação	13.686.248	15,8
Os 20 municípios com as maiores produções de soja		
Total	17.808.392	20,5
Sorriso - MT	1.981.800	2,3
Nova Mutum - MT	1.209.330	1,4
Sapezal - MT	1.196.244	1,4
Campo Novo do Parecis - MT	1.194.288	1,4
Nova Ubiratã - MT	1.018.890	1,2
Querência - MT	970.536	1,1
Formosa do Rio Preto - BA	959.812	1,1
Diamantino - MT	958.594	1,1
Primavera do Leste - MT	784.680	0,9
Jataí - GO	767.280	0,9
Rio Verde - GO	750.000	0,9

São Desiderio - BA	720.228	0,8
Lucas do Rio Verde - MT	718.903	0,8
Maracaju - MS	696.600	0,8
Canarana - MT	678.640	0,8
Cristalina - GO	657.277	0,8
Campo Verde - MT	652.080	0,8
Brasnorte - MT	650.220	0,7
Paranatinga - MT	638.400	0,7
Campos de Júlio - MT	604.300	0,7
Demais municípios	68.952.128	79,5

Com relação as principais Unidade da Federação, dos 20 municípios com as maiores produções de soja, 14 estão localizados no Estado de Mato Grosso e, juntos, produziram 13.256.905 toneladas de soja no ano de 2014 (ou 15,27% da produção nacional de soja) (Tabela 4). A produção desses 14 municípios é maior que toda a produção do Estado do Rio Grande do Sul. Assim, esses municípios também serão utilizados como parâmetros deste estudo.

GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PELO SETOR AGROINDUSTRIAL

Os resíduos agrícolas compreendem o material resultante das colheitas das culturas e produções agrícolas. Sua utilização para outros fins, quando destinados ao descarte, irão contribuir de maneira positiva em seu impacto no meio ambiente e na sociedade. São constituídos por cascas, folhas e hastes das plantas. Seu potencial energético é referenciado por parâmetros como o poder calorífico, densidade energética e composição química (RODRIGUES, 2009). Devido a menor umidade contida no material, apresenta maior potencial energético que o contido no material colhido.

Conforme já tratado, foram levantados os dados sobre a produção agrícola brasileira com o objetivo de, nas próximas etapas deste trabalho, estimar as quantidades aproximadas de resíduos sólidos gerados pela atividade do setor. Durante este levantamento de dados, não foi possível quantificar a porcentagem de resíduos gerados nas etapas de cultivo e colheita das culturas, pois não foram encontrados estudos consistentes sobre o tema. Os dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), revelam os dados da produção das diferentes culturas agrícolas no Brasil, que possibilitam realizar uma estimativa da geração de resíduos. Matos (2005) afirma que a produção de resíduos agrícolas é dependente do tipo de espécie cultivada, da fertilidade do solo, condições climáticas, disponibilidade de águas e chuvas, entre outros. As ausências destas estimativas não representam um problema para o estudo, uma

vez que os resíduos referentes a etapa da colheita são amplamente utilizados nas próprias áreas de produção como complemento nutricional (composto orgânico), incorporado novamente os nutrientes no solo.

Entretanto, a Associação Brasileira de Industrias de Biomassa – ABIB (2011), em seu estudo, revela um fator residual de 58% com relação ao processamento do milho. Ou seja, os 9 municípios mais representativos localizados no Estado de Mato Grosso geraram estimados 5.001.115 toneladas de resíduos relacionados a essa cultura em 2014.

Matos (2005) estima que a cultura da soja produza 2.700 toneladas de resíduos para cada 1.000 toneladas de grãos colhidos. O fator residual de processamento dessa cultura é então da ordem de 73%. Assim, no ano de 2014, estima-se que os 14 municípios com as maiores produções de soja para o Estado do Mato Grosso foram responsáveis por gerar o montante de 9.677.540 toneladas de resíduos provenientes da soja.

Para se ter uma estimativa inicial, iremos assumir que os resíduos totais, ou 14.678.655 toneladas, são homogêneos e possuem poder calorífico de 3.500 kcal/kg. Este valor, em termos médios, representa um potencial de geração de 1.037 MW médios de energia, para uma usina operando 24 horas durante um ano inteiro e 15% de eficiência de conversão energética.

1.2 OBJETIVO

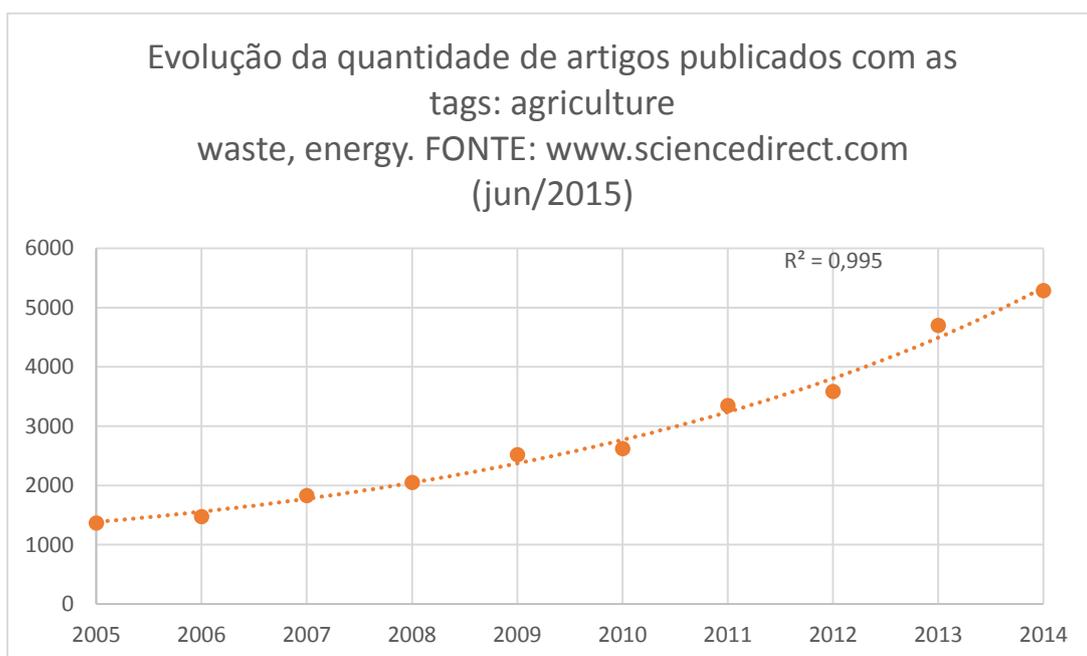
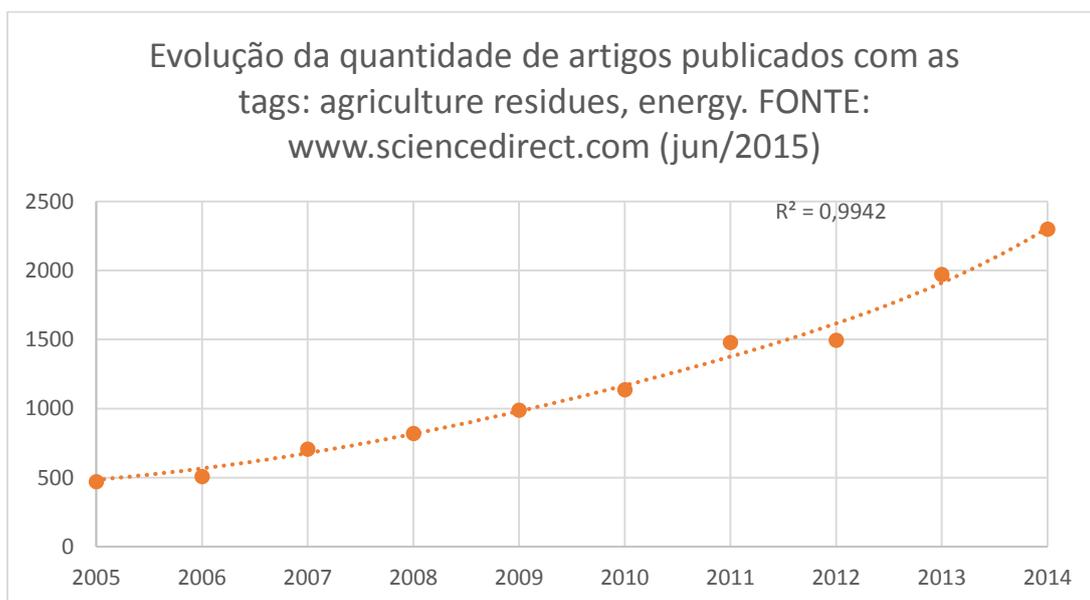
Portanto, este projeto tem por objetivo principal definir opções de viabilidade para uma solução ótima da localização e quantidade de biomassa processada por plantas termoelétricas de combustão direta, pirólise e gaseificação pela utilização de resíduos sólidos resultantes de processos das culturas do setor agroindustrial no Estado de Mato Grosso.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Caracterizar o cenário brasileiro, em específico a região Centro-Oeste, quanto à geração de resíduos agroindustriais;
- ii. Quantificar as culturas mais expressivas com maiores potenciais de geração de resíduos sólidos gerados pelo setor agroindustrial;
- iii. Quantificar o potencial total de geração de energia a partir da biomassa potencial resultante do levantamento anterior;
- iv. Otimizar a cadeia logística de densificação da biomassa para produção de energia elétrica em plantas termoelétricas.

2 ESTADO DA ARTE CIENTÍFICO

Este projeto irá abordar potenciais fontes de biomassa sólida e suas respectivas rotas tecnológicas aplicadas a processos de densificação e conversão térmica dessa biomassa. Entretanto, realizou-se um levantamento sobre estudos que envolvam estes temas. Os gráficos a seguir demonstram a evolução dos estudos sobre o tema nos últimos 20 anos, momento em que a busca por fontes renováveis de energia se aqueceu nas últimas décadas e o preço do barril de petróleo e seus derivados encareceram.



Pela evolução de publicações sobre resíduos agrícolas e energia considera-se que o evolui substancialmente nos últimos 5 anos. E, entende-se que assunto é importante para a sociedade, pois visa buscar soluções alternativas para o destino de resíduos como rota de fornecimento de energia, geração de subprodutos com valor agregado, potencial substituto dos combustíveis fósseis e de contribuição a solução de problemas ambientais. No entanto, até o momento, foi identificado apenas um artigo “ *A fuzzy multiple-objective approach to the optimization of bioenergy system footprints* “, de Raymond R. Tan publicado no ano de 2009 (Science Direct) que combina as palavras chaves otimização, multiobjetivo e bioenergia. Assim, a otimização multiobjetivo será introduzida como o processo de busca pela melhor solução possível (solução ótima) para o problema em estudo com intuito de atender critérios previamente estabelecidos. Adisa Azapagic, “*Linear Programmin as a Tool in Life Cycle Assessmetn*” (1988), e Roland Crift, “*The Chemical Engineer, A Plea for Common Sense (and Biomass)*” são nomes importantes nas discussões de questões científicas sobre a compreensão do conceito de sustentabilidade. Isto é, como a ciência e a tecnologia podem ser utilizadas para o desenvolvimento sustentável de uma sociedade, utilizando ferramentas de otimização multiobjetivo, para influenciar políticas que irão moldar um futuro sustentável.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA

3.1 BIOMASSA

O termo biomassa está relacionado a matéria orgânica gerada a partir da fotossíntese com potencial de conversão em outras formas de energia. São considerados biomassa os produtos, resíduos e subprodutos advindos das atividades rurais, urbanas e industriais como, por exemplo, resíduos florestais, resíduos agrícolas, dejetos de animais e a matéria orgânica presente nos descartes industriais e urbanos. Essa matéria orgânica possui a energia química adquirida através da transformação da radiação solar em matéria orgânica. Esta energia pode ser liberada diretamente através da combustão ou pode ser transformada, a partir de distintos processos, em distintos produtos energéticos como carvão vegetal, óleos vegetais combustíveis, etanol, gases combustíveis e de sínteses, entre outros. Portanto, como pode-se observar, há uma vasta quantidade e variedade de formas de biomassa em todo o mundo.

Em seu livro, *Wood Energy: principles and applications*, Nogueira e Lora (2002) afirmam que os recursos energéticos de biomassa podem ser classificados em 3 grandes grupos, de acordo com a origem da matéria pela qual são constituídos: a biomassa energética florestal (biocombustíveis originário da madeira)(nota: optou-se aqui por não se traduzir *ipsis litteris* as expressões apresentadas no livros, mas sim utilizadas no Plano Nacional de Energia do MME) , a biomassa energética agrícola (biocombustíveis de plantações não florestais) e os rejeitos urbanos.

1. Biomassa energética florestal: abrange os biocombustíveis originados de recursos florestais. Podem ser produzidos e obtidos, de maneira sustentável, através da cultivacão ou de florestas nativas, a partir do desflorestamento do espaço destinado a áreas de agropecuária ou de atividades que utilizam ou processam madeira para fins não energéticos, como indústrias de papel e celulose. A energia obtida desse tipo de biomassa é basicamente associada à celulose e à lignina contidas nessas matérias orgânicas. Preferencialmente, adota-se rotas tecnológicas de transformação termoquímica simples, como a combustão direta e a carbonização. No entanto também são aplicadas rotas mais complexas como carvão vegetal, licor negro (produto obtido a partir da indústria de celulose), metanol, etanol, entre outros;
2. Biomassa energética agrícola: Esses biocombustíveis são constituídos pelos restos de plantas não aproveitados comercialmente nas colheitas anuais (MATOS, 2005). Assim, há vários tipos de produtos que são obtidos de atividades relacionadas à produção e processamento de produtos agrícolas, mas que, muitas vezes, são

erroneamente denominados de resíduos. Podem ser divididos em duas subcategorias devido à rota tecnológica:

- a. Culturas agroenergéticas: utilizam principalmente rotas de transformações biológicas físico-químicas utilizadas na produção de combustíveis líquidos. Como biodiesel, etanol e outros óleos vegetais diversos. Exemplos dessas culturas são a cana-de-açúcar, o milho, a beterraba, o amendoim, a soja, entre outros.
 - b. Subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal: Esses subprodutos são derivados das atividades agrícolas, da produção de produtos de origem animais e agroindustriais. Muitas vezes estes são tratados como material residual mas possuem grande potencial energético. As rotas tecnológicas utilizadas são variadas: transformação termoquímica, através da combustão direta, pirólise ou gaseificação; até mesmo transformações biológicas e físico-químicas. Como exemplo, há a casca de arroz, a castanha de caju e esterco animal.
3. Rejeitos urbanos: Os biocombustíveis dessa categoria podem apresentar diversas origens, como os resíduos das podas de árvores. O uso desses resíduos com finalidade energética pode ter também um viés ambiental benéfico. O seu processo de conversão em outros produtos energéticos é definido a partir do grau de umidade. Pode utilizar a combustão direta, a gaseificação, transformação termoquímica e digestão anaeróbica.

3.2 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

Para gerar energia elétrica a partir da biomassa, esta passa por alguns processos de transformações variados. Para entender como acontece a geração de energia, é importante compreender os possíveis processos e tecnologias envolvidas na transformação da biomassa, ou seja, conhecer as rotas tecnológicas utilizadas, além da análise econômico-financeira do empreendimento e dos impactos ambientais das atividades envolvidas (MAFFIOLETTI, 2013).

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta, de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (ANEEL, 2005). A Figura 2 apresenta os principais processos de conversão da biomassa em energéticos.

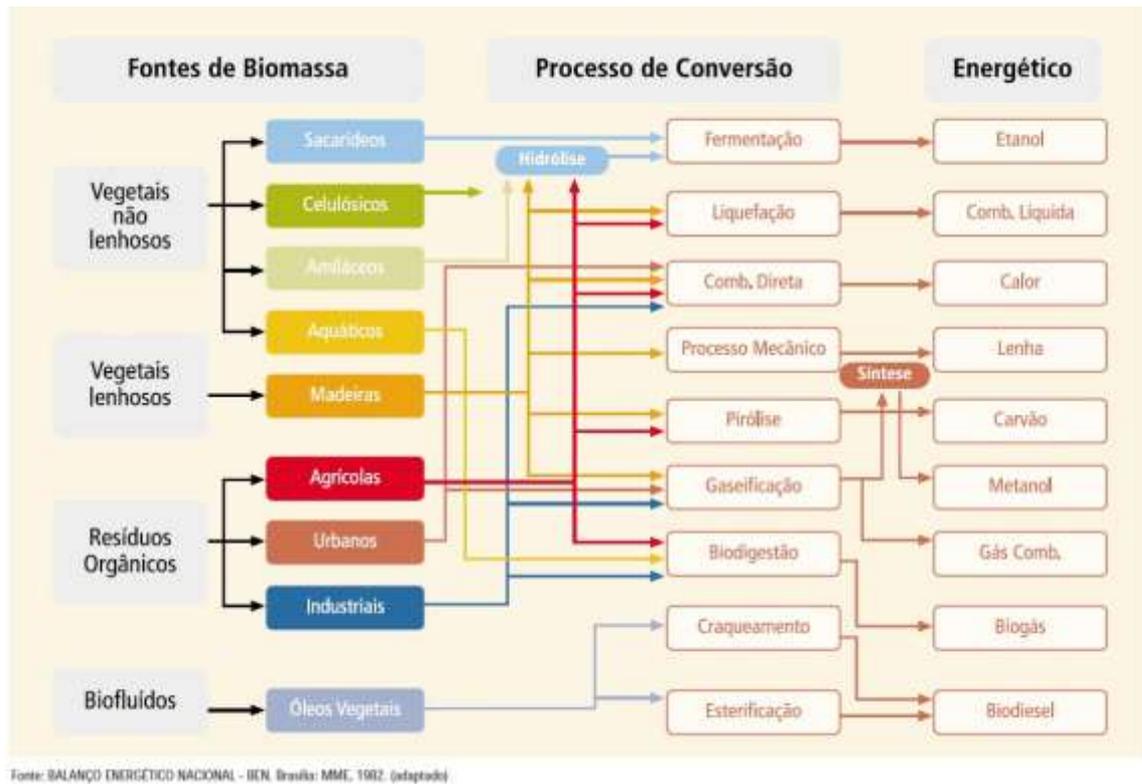


Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.
 Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2003 – ANEEL

A conversão do tipo termoquímica compreende a combustão direta, carvoejamento, torrefação, pirólise e gaseificação. A conversão físico-química compreende a prensagem, extração e esterificação. Já a conversão biológica consiste da digestão anaeróbica, fermentação e hidrólise. A biomassa pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos, gasosos e na forma de calor. 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 podem ser utilizados em turbinas a gás para geração de eletricidade, como pode ser visto na Figura 1.

A ERB (Energias Renováveis do Brasil) indica que, a partir de uma avaliação logística inicial, a compactação da biomassa melhora a relação da eficiência energética em função da distância percorrida entre fornecedor e consumidor. Assim, a transformação da biomassa em pellets é indicada, principalmente, as usinas cuja operação ocorre a grandes distâncias da área de coleta dos resíduos sólidos da agricultura, pois o pellet possui maior densidade energética (ERB, 2015). Assim, para potencializar o uso da biomassa é interessante analisar se há necessidade de densificação da matéria orgânica antes que seja feita a conversão termoquímica, bioquímica ou físico-química.

3.3 TECNOLOGIAS DE DENSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA

O processo de densificação é comumente realizado antes da biomassa ser transformada. O processo de densificação mecânico, as vezes aliado a aquecimento, promove a densificação de matéria, uniformizando-a quanto à forma, e reduz o teor de umidade. O efeito é o aumento da densidade energética e poder calorífico, e redução de custos quanto ao manejo e transporte devido a facilidade de manuseio e armazenamento da biomassa. Esse processo também torna mais eficiente o uso da biomassa como combustível, uma vez que quanto menor a umidade presente, melhor a eficiência energética do sistema, pois menor é a energia necessária para se evaporar a água contida na biomassa. Os métodos de densificação mais utilizados para fins de geração de energia são: peletização, briquetagem e torrefação.

3.3.1 Peletização



Figura 2 - Pellets. FONTE: Site Balkangrain

A peletização consiste na compactação da biomassa a altas pressões para obtenção dos "pellets". Os "pellets" são cilindros (Figura 2) que se apresentam em pequenas dimensões (diâmetro de 5 a 18 mm) e comprimento (até 40 mm) (Bezzon, 2006).

Antes que a biomassa seja inserida no processo de peletização, é necessário a secagem da biomassa, exigindo umidade entre 15 e 20% b.u.¹. Há três tipos de prensa que podem ser utilizadas quanto a acionamento e matriz: prensa de pistão com acionamento mecânico ou hidráulico, a prensa com matriz anular ou em forma de disco, e a prensa de extrusão. A prensa mais utilizada é a de matriz anular. Nela, a biomassa é comprimida entre um cilindro e um anel com furos radiais. (Bezzon, 2006)

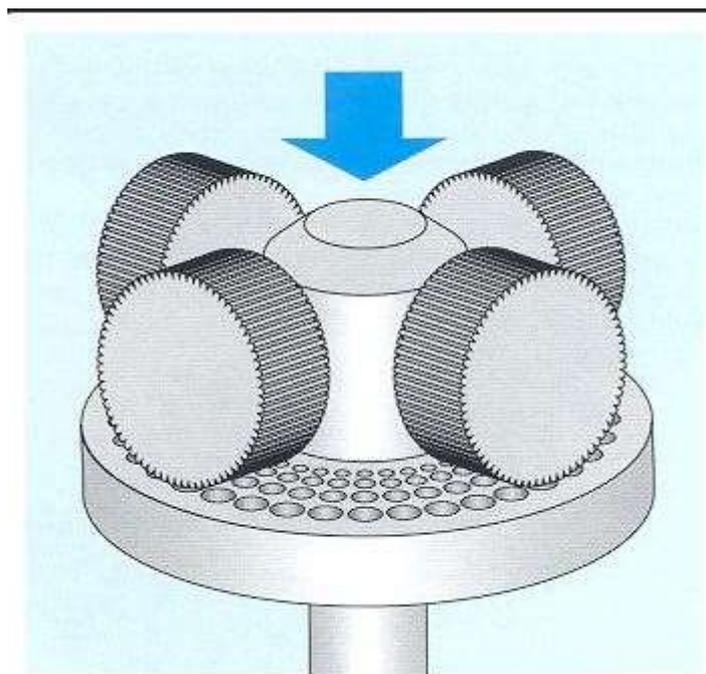


Figura 3 - Prensa de matriz anular. FONTE: Site Akahl

3.3.2 Briquetagem

A briquetagem é o processo mais difundido na densificação de biomassa para obtenção de combustíveis sólidos. Nesse processo, a biomassa é comprimida em cilindros com 4 a 10 cm de diâmetro e comprimento variando 10 a 40 cm, conhecidos por “briquetes” (Bezzon, 2006).

O processo de prensagem utiliza muita energia devido ao trabalho de compressão pelo equipamento e, por isso, é realizado o pré-aquecimento da biomassa, reduzindo a umidade e o esforço na prensagem, uma vez que ela é viscoelástica e o equipamento tem maior facilidade para

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

trabalhar a matéria orgânica. O produto obtido é o briquete (pré-pirolisado) com teores de voláteis e carbono fixos próximos aos do insumo original, e poder calorífico ligeiramente superior (Zhanbin, 2003).

Os briquetes a quente podem substituir a lenha em suas diversas aplicações. Este, quando de origem vegetal, através de pirólise, pode ser transformado em um coque vegetal consistente, de formas e dimensões variadas, com a possibilidade de substituir em parte o carvão vegetal e o coque metalúrgico importado em siderurgias e em outras aplicações energéticas. (Bezzon, 2006)

A briquetagem pode ser realizada com ou sem aglutinante. O aglutinante é um recurso utilizado no material não deformável (fino de carvão vegetal) sem qualquer mecanismo de ligação quando compactado e, após a compactação, resulta na maior adesão das partículas, promovendo maior resistência mecânica ao briquete, uma vez que o transporte e manejo exige tal característica (OLIVEIRA, 2013).

Os três principais tipos de processos de briquetagem são:

- Briquetagem em prensas de rolos: o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície, de tamanho e forma adequados, girando com a mesma velocidade de rotação, porém com sentidos opostos, para que não haja deslizamento ou acúmulo de material;
- Briquetagem por extrusão contínua (Figura 4): possui acionamento por parafuso sem-fim, no qual, à medida que o eixo gira, o material é comprimido, saindo por uma abertura menor que a de entrada. Ao fim, há uma guilhotina que, de acordo com o fluxo de material, possui uma velocidade de corte para garantir a uniformidade dos comprimentos dos briquetes; (Carvalho & Brinck, 2004)
- Briquetagem em prensas hidráulicas: os moldes são preenchidos de forma intermitente, e por afastamento e aproximação das superfícies de pistões, o material é compactado em uma cavidade.

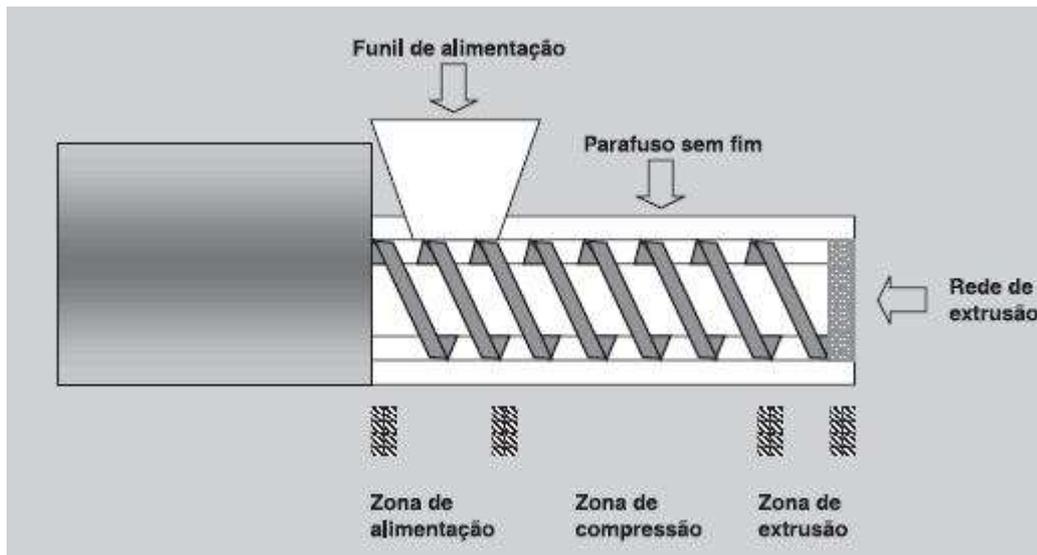


Figura 4 - Processo de briquetagem por extrusão contínua.

A briquetagem pode ser feita a quente, a temperaturas de pré-pirólise – 200 a 270⁰C – para que a pressão exercida para conseguir uma consistência satisfatória seja menor. Esse processo reduz a umidade do material. É recomendável que a torrefação seja realizada em atmosfera inerte ou redutora para evitar oxidação ou ignição 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.

3.3.3 Torrefação

A torrefação da biomassa consiste no seu aquecimento a temperaturas entre 200⁰C a 280⁰C (DAHLQUIST, 2013), que remove a umidade e degradando a hemicelulose e resulta na liberação de compostos de baixo poder calorífico. O objetivo da torrefação é produzir um material de alta densidade energética (retenção de voláteis de maior poder calorífico), hidrofóbico (transformações físico-químicas fazem com que o material torrefado absorva menos 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, sofre, assim, menos perdas na forma de finos) em curto tempo, com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas. Noronha (2010) aponta que o material torrefado tem características intermediárias entre a biomassa original e o carvão vegetal.

O rendimento gravimétrico 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.

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 (baixa emissão de material particulado), como redutor na indústria metalúrgica ou utilizado para gaseificação.

Várias tecnologias de torrefação são citadas na literatura. A Figura 6 apresenta algumas dessas tecnologias.

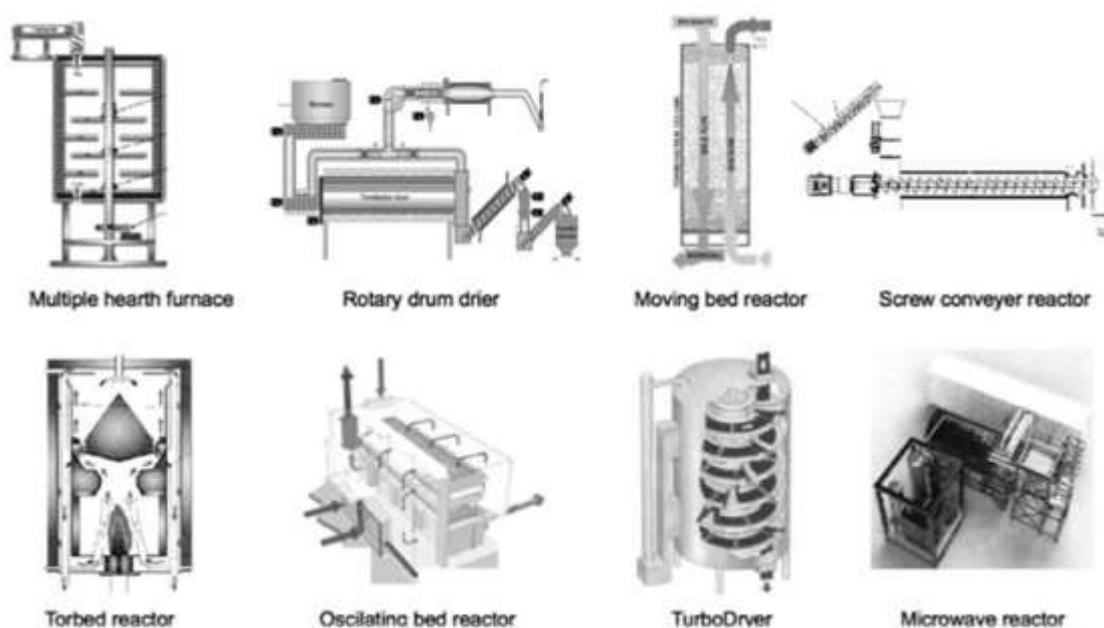


Figura 5 - Ilustração de algumas das tecnologias de reator utilizados para a torrefação.
FONTE: Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: COMBUSTION, GASIFICATION, PYROLYSIS, TORREFACTION AND FERMENTATION, 2013.

3.4 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA EM BIOENERGIA

Como visto anteriormente, são três os principais tipos de classificações de processos de conversão de biomassa: termoquímica, bioquímica e físico-química. Estes processos de conversão resultam em amplas variedades de produtos energéticos para geração de calor, energia elétrica e combustível (BEN, 2015).

3.4.1 Conversão termoquímica

A conversão termoquímica é, em princípio, a conversão da biomassa em calor por meio da combustão, onde ocorre a decomposição térmica da biomassa e posterior combustão dos produtos resultantes do processo primário. A diferença entre os processos termoquímicos é associada à quantidade de oxigênio fornecido ao processo, analisado pelo cálculo estequiométrico, sendo classificado em combustão direta, pirólise e gaseificação, explicitadas a seguir (DINKELBACH, 2000).

Como visto anteriormente, são várias as fontes de biomassa sólida (palha e sabugo de milho, casca de arroz, etc.) empregadas em termoelétricas para a geração de vapor ou em ciclos de cogeração. Porém, sua viabilidade econômica está diretamente ligada à proximidade das unidades de processamento de biomassa à fonte de produção, devido a custos de transporte, manuseio, teor de umidade e eficiência das tecnologias das máquinas térmicas. A queima da matéria orgânica ocorre em câmaras de combustão devido à grande diferença em relação a biomassa líquida e gasosa.

Para a produção de energia útil em unidades de processamento de média e grande escala, o ciclo Rankine, representado por caldeiras e turbinas a vapor; o ciclo Brayton, representado por turbinas a gás e ciclos combinados, são os principais ciclos termodinâmicos e tecnologias aplicadas.

A biomassa sólida é constituída por partículas de formas variadas e dimensões específicas caracterizadas pela análise granulométrica, esfericidade e combustão. A reação química do oxigênio com materiais combustíveis, a qual resulta em luz e rápida produção de calor, pode ser realizada em equipamentos onde o sólido permanece em um leito fixo, ou em um leito fluidizado, onde permanece em suspensão, ou alguma combinação dessas, de acordo com o comportamento dinâmico das partículas sujeitas ao fluxo gasoso no interior da câmara de combustão. (BEN, 2015)

A biomassa também pode ser pré-processada por meio da gaseificação ante a combustão, pois converte a matéria orgânica sólida em um gás energético pela oxidação parcial a alta temperatura em gaseificadores (Figura 6).

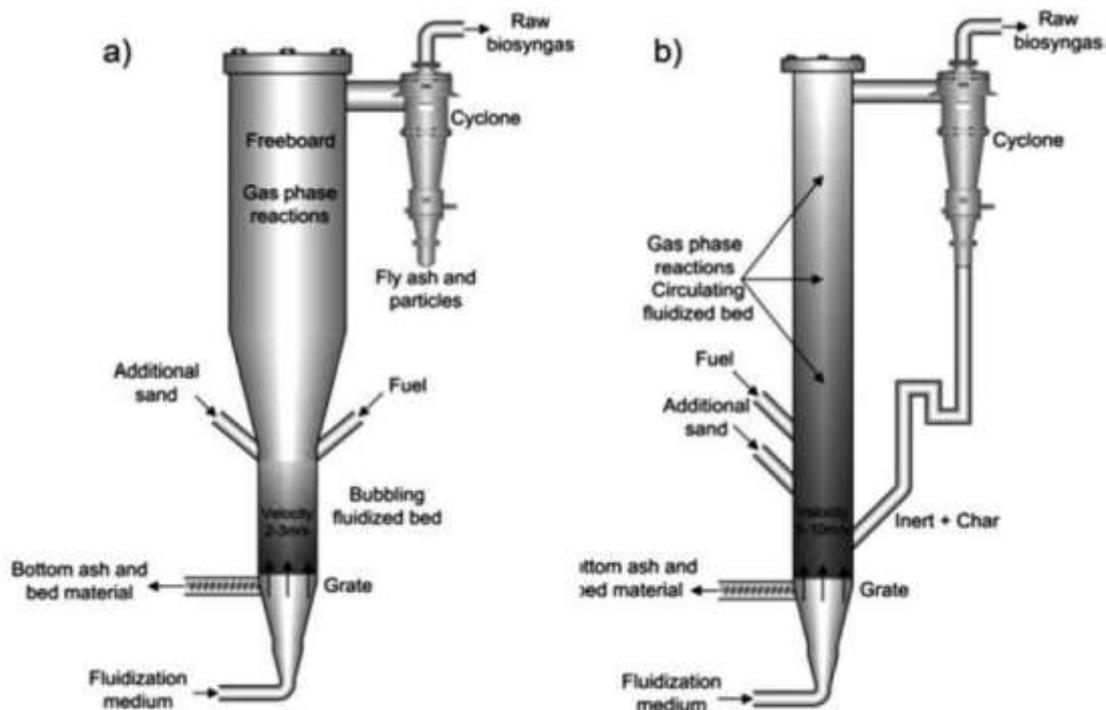


Figura 6 - Esquema de gaseificadores de leito fluidizado: (a) fluidizado borbulhante e (b) de leito fluidizado circulante. FONTE: Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: COMBUSTION, GASIFICATION, PYROLYSIS, TORREFACTION AND FERMENTATION

3.4.1.1 Combustão direta

Combustão direta é o processo no qual a decomposição da biomassa e a combustão ocorrem no mesmo reator. O oxigênio fornecido ao processo é o suficiente para a combustão completa da biomassa. Os principais produtos são dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e nitrogênio (N_2). Normalmente, é realizada em caldeiras e fornos para geração de vapor. Possui baixa eficiência termodinâmica causada pela alta umidade (em torno de 20%) dos combustíveis (lenha, palha, resíduos agrícolas) utilizados no processo (MME, 2013).

3.4.1.2 Gaseificação

Gaseificação é o processo no qual a decomposição ocorre em um ambiente separado da combustão, onde os produtos da decomposição são utilizados em caldeiras, motores ou turbinas a gás. O oxigênio fornecido ao processo não é o suficiente para a queima completa da biomassa. Os principais produtos do processo são: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e o metano (CH_4). A quantidade de ar ou oxigênio utilizado no processo irá determinar as quantidades em proporção dos produtos (MME, 2013).

3.4.1.3 Pirólise

Pirólise, conhecida também por carbonização, é o processo no qual a biomassa é decomposta em um ambiente com baixa quantidade ou ausência de oxigênio e consiste basicamente em aquecer a biomassa (entre 300°C e 500°C) até que o material volátil seja extraído. Como resultado deste processo, as proporções dos produtos da decomposição variam conforme a temperatura e o tempo de residência da biomassa no reator. Estes produtos finais são: o carvão, com densidade energética (quantidade de energia por quilo de biomassa) 25% maior que a biomassa na entrada do processo (devido a queima da biomassa em temperaturas entre 500°C e 1.000°C); e, o gás pirolítico (gases voláteis), com 5% a mais energia que a biomassa no início do processo. O teor de umidade da biomassa de origem e a retirada de material volátil irão influenciar substancialmente a proporção entre biomassa e carvão e gás (DAHLQUIST, 2013).

3.4.2 Conversão bioquímica

A conversão bioquímica é feita através de processos biológicos e bioquímicos (digestão anaeróbica e fermentação) gerando produtos nos estados sólido, líquido e gasoso. O biogás é o produto da digestão anaeróbica e o combustível líquido, como o etanol, é o produto da fermentação da biomassa (DAHLQUIST, 2013).

3.4.2.1 Digestão anaeróbica

Digestão anaeróbica é o processo no qual ocorre a produção de metano (CH₄), ou biogás, em biodigestores através da degradação natural da matéria orgânica (biomassa), por meio da ação de bactérias na ausência de oxigênio, de dióxido de carbono (CO₂), com proporção de 60-35% respectivamente, e de uma mistura de H₂, N₂, NH₃, CO e H₂S com proporção de 5%. O poder calorífico desse gás é da ordem de 22,35 MJ/m³ com a mistura na razão de proporção de 60:35:5 (DAHLQUIST, 2013).

3.4.2.2 Fermentação alcoólica

A biomassa também pode ser fermentada para produção de etanol. Se, por hipótese, for assumido que 50% da biomassa é celulose e que toda celulose pode ser convertida por hidrólise em glicose, então para cada quilograma (kg), pode ser produzido 0,77 kg de etanol pela razão estequiométrica $C_6H_{12}O_6 + 3 H_2O [L] = 3C_2H_5OH + 3O_2$ (ou 1 kg de celulose + 0,3 kg de H₂O = 0,77 kg de etanol + 0,53 de O₂) (DAHLQUIST, 2013).

3.4.3 Conversão físico-química

A conversão físico-química utiliza técnicas de compressão para extração de óleo vegetal, visando a transformação química posterior por meio da transesterificação. Após este processo, o óleo fica apto a ser utilizado em motores de combustão interna baseados no ciclo diesel, embora a utilização de óleos puros também possa ser feita, a elevada viscosidade e o baixo número de octanas diminuem o rendimento dos equipamentos. A presença de álcool e de um catalisador eliminam as glicerinas (VERINGA, 2000).

Assim, explicitados as tecnologias de conversão de biomassa em energia útil (por exemplo, na forma de calor e biocombustíveis), é possível utilizar essas formas de energia para o acionamento de equipamentos (turbinas à vapor e a gás) com vistas a produção de energia elétrica.

3.5 GERAÇÃO DE ENERGIA

Neste tópico serão abordados os equipamentos (turbinas a vapor e a gás) que quando combinados as tecnologias e processos de conversão da biomassa, podem produzir eletricidade.

O calor gerado pela queima da biomassa em caldeiras pode ser utilizado para produção de vapor d'água por meio de trocadores de calor. Já os biocombustíveis gasosos resultantes dos processos de conversão podem ser utilizados como combustível de turbinas a gás. E, independentemente do tipo de turbina, esta irá produzir potência em um eixo (grupo gerador) para produção de energia elétrica.

3.5.1 Turbinas a vapor

A geração de energia elétrica em termoelétricas é realizada por meio da produção de vapor e possui quatro principais componentes do sistema:

- Caldeira;
- Turbina;
- Condensador;
- Bomba.

O fluido de trabalho em máquinas térmicas a vapor trabalha confinado e isolado do ar e do combustível. Este fluido, comumente a água, absorve calor na caldeira, devido ao calor gerado pela combustão da biomassa e muda para o estado de vapor. O vapor sob alta pressão e temperatura é conduzido até a turbina, onde expande, produzindo trabalho, e volta ao estado inicial no condensador, rejeitando calor ao ambiente. Uma bomba, adicionada no sistema após o condensador, conduz o vapor novamente à caldeira, reiniciando o ciclo. A Figura 7 apresenta uma planta termoelétrica composta por caldeira (para geração de vapor), turbina à vapor para acionamento do gerador e gerador elétrico para produção de eletricidade.

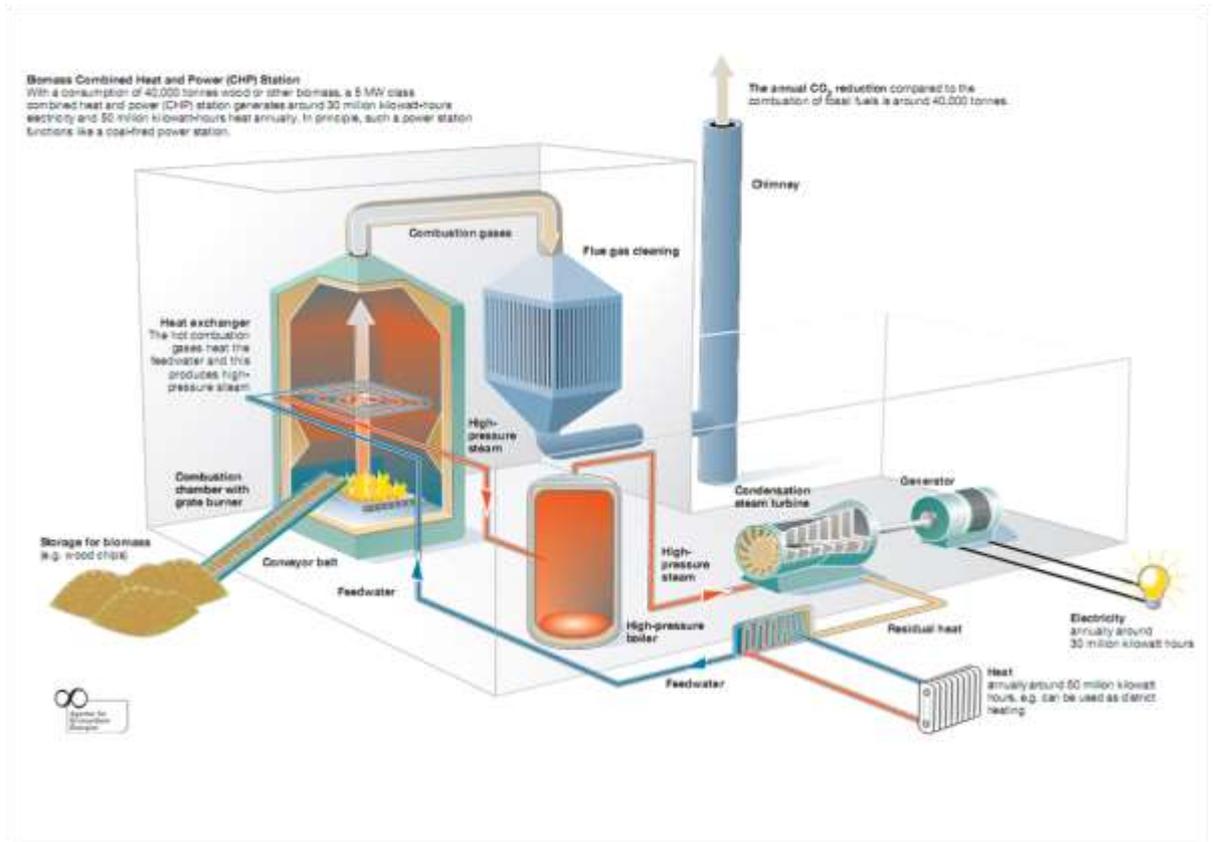


Figura 7 – Exemplo de uma planta de geração de energia por biomassa com turbina movida a vapor de água. FONTE: site <http://www.seropedicaonline.com/wp-content/uploads/2014/02/cental-biomassa-calor-e-electricidade.png>

3.5.2 Turbinas a gás

Turbina a gás é denominado o conjunto de três equipamentos: compressor, câmara de combustão e turbina. Esta configuração (Figura 8) permite o uso do Ciclo de Brayton, que opera em um ciclo aberto. Ou seja, o fluido de trabalho, normalmente o ar atmosférico, é admitido pelo compressor, tem sua pressão elevada, mistura-se a um combustível, como o gás de síntese ou gás natural, na câmara de combustão e realiza trabalho na turbina por meio da expansão dos gases de combustão, resultando em potência no eixo para a geração de energia elétrica. O compressor está ligado à turbina por meio de um eixo e utiliza parte do trabalho para compressão do ar que entra no conjunto.

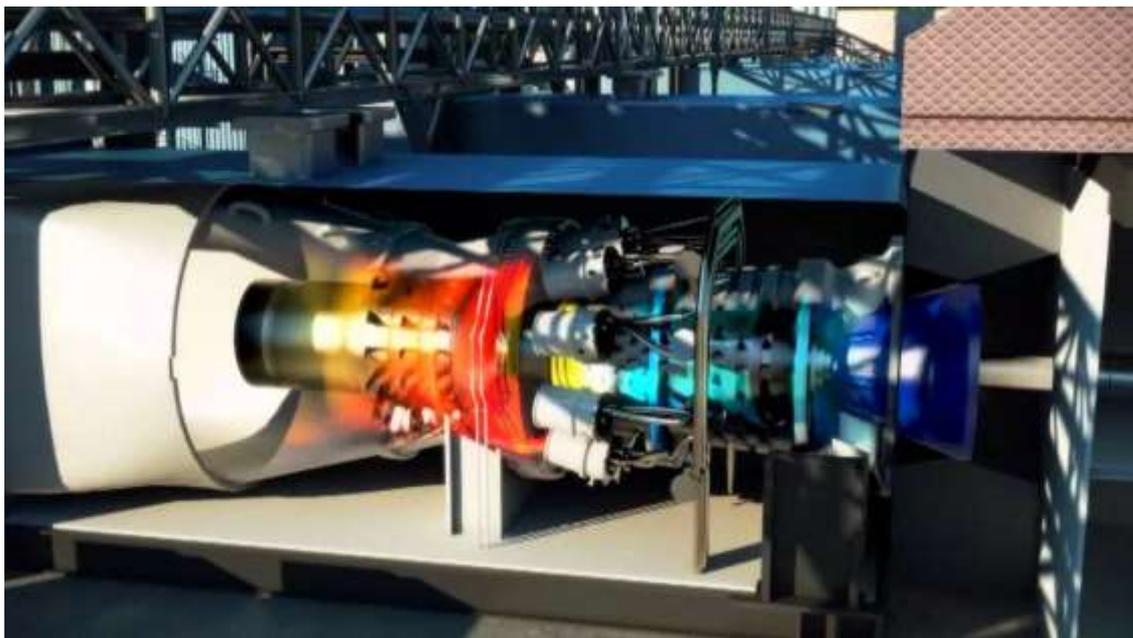


Figura 8 - Turbina a gás da EBX Parnaíba. FONTE: <
<http://i.ytimg.com/vi/k2Y24gzaAmc/maxresdefault.jpg>>

Assim, essa energia elétrica produzida por fonte renovável pode contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira quanto a fontes de energia exploradas. Se negociada em leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica, o empreendimento pode gerar receitas, rendas, empregos, movimentar a economia local, etc. Aliado a todos esses fatores, por se tratar de fonte renovável, existe a possibilidade de incrementar a receita com a venda de créditos de carbono gerados, contribuindo para que o país reduza as emissões gases do efeito estufa e atinja as metas dos protocolos e acordos ambientais firmados com outros países (por exemplo, o Protocolo de Quioto). Logo, faz necessário entender o que é o crédito de carbono e como este pode ser negociado.

3.6 MERCADO DE CARBONO

Um crédito de carbono, ou compensação de carbono, é um instrumento financeiro ou uma unidade comercial, com objetivos monetários, que representa uma tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e). A tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e) é o total emitido em gases que contribuem para o efeito estufa multiplicado pelo seu potencial de aquecimento global. O valor desse crédito varia diariamente, pois sua atribuição de valor é dada por vários fatores externos. A variação é semelhante a que ocorre em uma bolsa de valores.

Assim, o Mercado de Carbono é um campo de trocas, regulado pelo Conselho de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite a países com altas emissões de carbono comprar o “excedente” das cotas de países que produzem menos tCO₂e. O MDL emite, para cada tCO₂e reduzido ou removido do meio ambiente, a Redução Certificada de Emissão (RCE) e também

promove projetos que visam o crescimento econômico de um país sem causar prejuízos ao meio ambiente.

Uma expressão bastante comum no Mercado de Carbono é a *cap and trade*, utilizada para nomear o processo que limita as emissões de gases. Por meio desse modelo é criada a estrutura do mercado de carbono, pois faz com que as empresas que são grandes emissoras de gases comprem os créditos excedentes de companhias que emitem menos. O mercado europeu utiliza a metodologia “*cap and trade*”, que compreende 31 países do continente, cobrindo 45% das emissões de gases causadores do efeito estufa na Europa. Aos participantes europeus é concedida a permissão de compra de créditos internacionais, porém limitado a um valor máximo.

Os principais gases que agravam o Efeito Estufa são:

- i. Dióxido de Carbono (C₂O₂), com aproximadamente 63% de contribuição (IPCC, 2007);
- ii. Metano (CH₄);
- iii. Óxido Nitroso (N₂O);
- iv. Hexafluoreto de Enxofre (SF₆);
- v. Famílias de gases, hidrofluorcarbonos (CFC's) e perfluorcarbonoas (PFC's).

No Brasil, devido a regras sobre valores mobiliários, a compra e venda de créditos ocorre por meio de leilões promovidos pela BM&FBOBESPA (Bolsa de Mercadorias e Futuros e, Valores de São Paulo) a pedido de entidades públicas e privadas. As transações são realizadas em ambiente eletrônico, via internet. Os leilões são modelados conforme as características específicas da oferta. As regras adotadas em cada leilão são divulgadas por meio de anúncios públicos ou editais. Podem participar dessas operações corretoras associadas à BM&FBOBESPA, representando seus clientes, participantes do mercado de carbono global credenciados pela BM&FBOBESPA, incluindo: traders do mercado de RCE e do mercado de emissões europeu, fundos de carbono, organismos multilaterais de financiamento e entidades governamentais.

Nos Estados Unidos, existem algumas instituições que se propuseram a organizar a realização das compras e vendas de créditos de carbono, por exemplo, a Chicago Climate Exchange – CCX (em tradução, Bolsa do Clima de Chicago), a Regional Greenhouse Gas Initiative – RGGI (em tradução, Iniciativa Global de Gases do Efeito Estufa) e a Western Climate Initiative – WCI (em tradução, Iniciativa Climática do Oeste).

O CCX operou no modo *cap and trade* entre dezembro de 2003 e 2010 e, em 2011, lançou o Programa de Registro de Compensações. Os membros assumiram voluntariamente o compromisso de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, as quais passavam a ser controladas através de um acordo jurídico. Os membros que reduzissem as emissões abaixo das metas e

possuíssem permissões em excesso poderiam vendê-las ou poupa-las àqueles que não alcançassem as metas. A RGGI foi formada pelos estados de Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New York, Rhode Island e Vermont. A instituição utiliza o sistema “*cap and trade*” e implementou, para 2014, a meta de capturar 90 milhões de tCO₂e. A WCI é composta pelo estado da Califórnia e pelas províncias canadenses de Columbia Britânica e Quebec. A iniciativa não possui fins lucrativos e busca oferecer serviços técnicos e administrativos para a realização do comércio referentes às emissões de gases do efeito estufa. (Portal Brasil, 2012)

Parte deste trabalho é calcular os custos ambientais inclusos a 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 varia com o dia. Esse cálculo servirá de subsídio para que países desenvolvidos integrantes do Protocolo de Quioto (Anexo I) possam alcançar suas metas de redução das emissões de gases do efeito estufa pela geração de créditos de carbono, além de movimentar a economia de grandes países.

O MDL pode ser utilizado como uma ferramenta para o desenvolvimento sustentável da agroindústria em termos de políticas de saneamento, uma vez que irá auxiliar na gestão dos resíduos sólidos gerados por este setor. Esta ferramenta possibilita que, através de projetos de gestão de resíduos orgânicos agroindustriais, haja uma diminuição de emissões de gases (metano, monóxido de carbono, gás carbônico, etc.) a atmosfera e, conseqüentemente, redução do efeito estufa. A produção de energia elétrica no Brasil a partir de fontes renováveis, como a biomassa, pode beneficiar o país com créditos de carbono. Um exemplo marcante é a atual produção de energia elétrica pela indústria do açúcar que possui alta eficiência na gestão do resíduo de bagaço (IPEA, 2011).

4 OTIMIZAÇÃO LINEAR

Dentre os objetivos deste trabalho, um dos principais é propor um sistema a fim de se otimizar a localização geográfica de usinas termoelétricas as quais utilizarão como combustível os resíduos da agricultura das plantações de soja e milho, caracterizada por uma otimização linear. Por tanto, faz-se necessário entender o conceito de otimização linear e a lógica por trás desta, com o objetivo de encontrar soluções ótimas sobre o problema proposto.

A otimização é uma área da Pesquisa Operacional que utiliza um método científico para apoiar a tomada de decisões, procurando determinar como melhor projetar e operar um sistema, sob condições que requerem alocações de recursos escassos. Esse campo de estudos trabalha com modelos determinísticos onde informações relevantes são assumidas como conhecidas, isentas de incertezas. Algumas aplicações típicas são o planejamento da produção e a roteirização do trabalho. Assim, a otimização linear é uma técnica que visa a melhor solução possível sobre problemas em análises. Porém, é importante definir critérios de avaliação das soluções para identificação da melhor solução, uma vez que os *inputs* apresentam um intervalo de valores, como a quantidade da produção de resíduos, de modo a ser passível de execução as soluções indicando a presença de restrições a serem respeitadas. Este critério é chamado de função de objetivo, que busca maximizar ou minimizar (PEREIRA, 2009).

O modelo de otimização linear consistirá na programação para a otimização de uma função linear sujeita a restrições lineares das variáveis, tendo uma função f , função objetivo, definida pelo conjunto de soluções alternativas Ω . O problema de otimização matemática é definido por: $\min f(x), x \in \Omega$ (SANTOS, 2010).

4.1 REPRESENTAÇÃO DE PROBLEMAS

Equações ou inequações podem apresentar as restrições da programação linear. Barreto (2010) define que estas restrições são representadas pela forma padrão ou canônica, respectivamente, podendo, ainda, serem representadas por uma forma reduzida. (Tabela 5)

Tabela 5 – Representação de problemas na forma canônica e na forma reduzida

Forma canônica	Forma reduzida
<p>Otimizar $z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$</p> <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>	<p>Otimizar</p> $z = \sum_{j=1}^n c_jx_j$ <p>Sujeito a:</p> $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq b_i$ <p>Onde: $i = 1, 2, \dots, m$ $x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$</p>
<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 	

4.2 TEORIA FUNDAMENTAL DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Modelos de programação linear, com no máximo três variáveis, podem ser resolvidos graficamente de maneira mais simplista, porém não é aplicável na prática devido a problemas do mundo real, onde há inúmeras variáveis. Assim, a solução gráfica nos ajuda a entender os princípios básicos do método analítico usado para resolver os modelos de Programação Linear. Esse método, conhecido por Simplex foi criado por George Dantzig, e foi aplicado no controle da força aérea americana.

Santos (2010) apresenta o problema da mistura de uma ração, onde materiais disponíveis são combinados para gerar novos produtos com características convenientes. É necessário saber quais as quantidades ideais de cada ingrediente para fazer uma quantidade de ração, com as necessidades nutricionais atendidas e o custo total dos ingredientes seja o menor possível. Temos como ingredientes o milho (A_1) e a farinha de ossos (A_2), a um custo de R\$65/kg e R\$30/kg, respectivamente. Para fazer certa quantidade de ração para aves, é preciso uma certa quantidade de nutrientes como vitamina A (V_a), vitamina B (V_b) e proteína (V_c). Os ingredientes apresentam esses nutrientes em determinadas unidades (un.). Deseja-se preparar uma ração que contenha no mínimo 7 unidades de V_a , 9 unidades de V_b e 1 unidade de V_c , e determinar a quantidade dos alimentos necessária para satisfazer as necessidades da ração. (Tab. 3)

Tabela 6 - Dados do exemplo: Mistura para ração

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

Define-se x_1 a quantidade de ingrediente do tipo 1 presente na mistura (un.), x_2 a quantidade de ingrediente do tipo 2 presentes na mistura (un.) e f a função objetivo. O custo mínimo seria nulo se não houvesse quantidades mínimas de nutrientes a serem atendidas (Vitaminas A e B e Proteína). O objetivo do problema é minimizar o custo total da mistura.

O modelo matemático para a solução do problema adotado propõe que

$$f(x_1, x_2) = 65 \cdot x_1 + 30 \cdot x_2 \quad (1)$$

Devemos determinar x_1 e x_2 tal que $f(x_1, x_2)$ seja o menor possível.

$$\text{mín } f(x_1, x_2) = 65 \cdot x_1 + 30 \cdot x_2 \quad (2)$$

Considere que as composições sejam satisfeitas:

$$2x_1 + 3x_2 \geq 7 \quad (3)$$

$$3x_1 + 2x_2 \geq 9 \quad (4)$$

$$1x_1 + 0x_2 \geq 1 \quad (5)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \quad (6)$$

Como x_1 e x_2 precisam ser maiores ou iguais a zero, o ponto que maximiza o valor de f estará no primeiro quadrante. Traça-se a reta referente a primeira restrição. Assim, tem-se um conjunto de possibilidades correspondente aos pontos acima da reta da primeira restrição, resultando em um conjunto de possibilidades para o problema. Esse conjunto de soluções é o espaço solução.

Para encontrar o ponto ótimo, observa-se a função objetivo: $f(x_1, x_2) = 65 \cdot x_1 + 30 \cdot x_2$. 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 (Figura 9) (Nogueira, 2009).

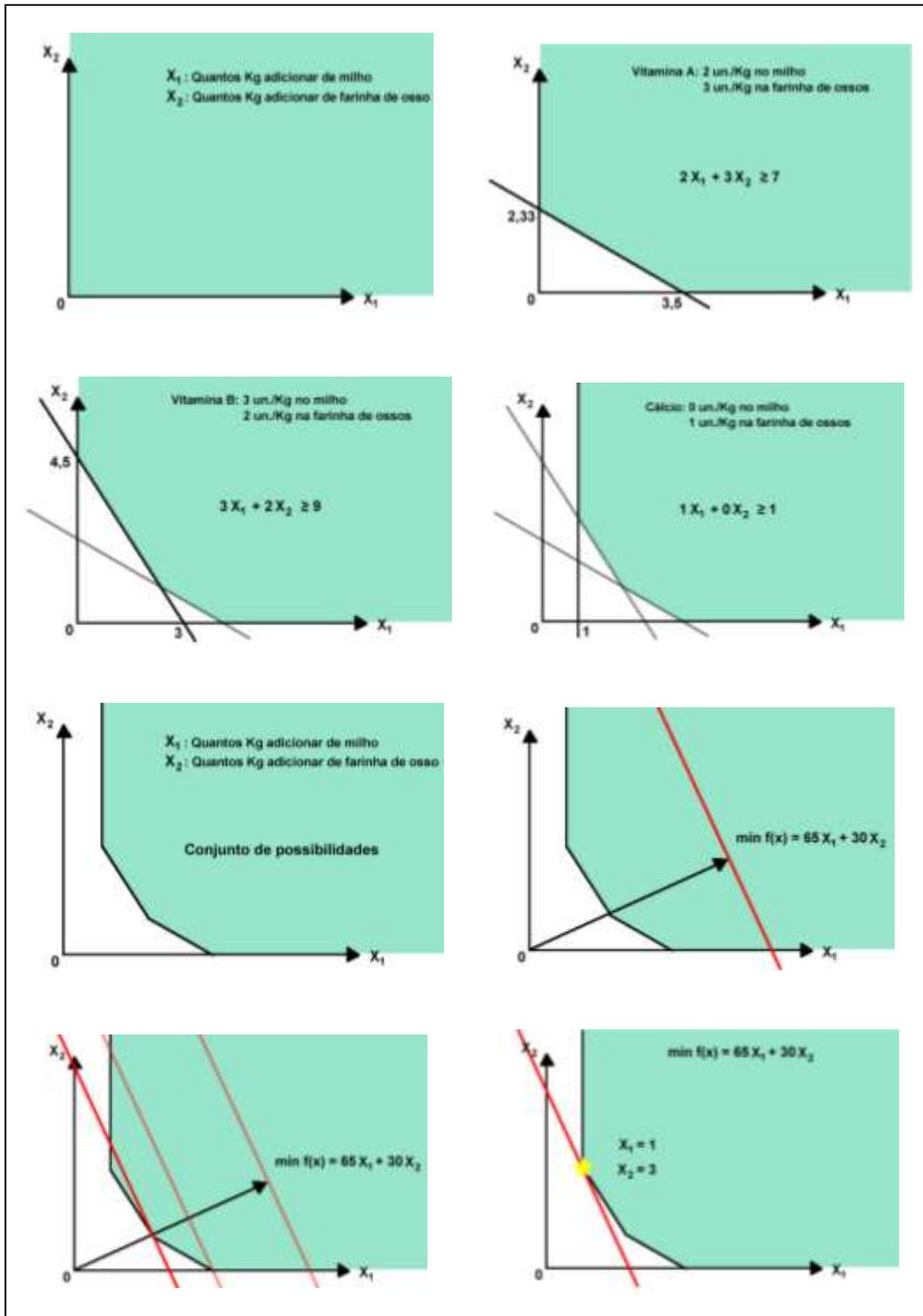


Figura 9 - Solução gráfica do problema em questão. Fonte: Santos, 2010.

4.3 DUALIDADE

Dualidade se refere ao fato de o Modelo de Programação Linear possuir duas formas de ser compreendido. A primeira forma, ou original, é chamada de primal e, a segunda forma, de dual. As propriedades das formas são linearmente dependentes. Como resultado, dada a solução ótima de uma das formas do modelo, encontra a solução ótima da outra forma devido a dependência entre si.

A solução do chamado modelo dual fornece informações significativas sobre questões econômicas presentes no Modelo de Programação Linear.

4.3.1 Modelo primal e dual

Consideramos o seguinte par de modelos de Programação Linear (Tabela 7):

Tabela 7 - Modelos Primal e Dual

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

O primeiro modelo será chamado de Primal e o segundo de Dual. O inverso também pode ser adotado sem prejudicar o fim. Analisando superficialmente os dois modelos, pode-se observar a dependência entre si. Assim, as constantes da coluna do modelo Primal são os coeficientes da função objetivo do modelo Dual. Os coeficientes da primeira linha do modelo Primal (1,1,2) são os coeficientes da primeira coluna do modelo dual e, assim, por diante. Portanto, dado um modelo, podemos construir outro. Mais à frente, será mostrado como construir novos modelos.

4.3.2 Teorema dual

Considerando ainda o par de modelos apresentado no capítulo anterior, suponha que as variáveis x_1 , x_2 e x_3 sejam valores aplicados ao modelo Primal e y_1 e y_2 valores aplicados ao modelo dual. Se multiplicarmos a primeira restrição do modelo primal por y_1 e a segunda restrição por y_2 , e somar as duas equações, temos:

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

Da mesma forma, se multiplicarmos a i -ésima restrição do modelo dual por x_i e somarmos 3, teremos:

$$x_1y_1 + 7y_2x_1 + y_1x_2 + 5y_2x_2 + 2y_1x_3 + 3y_2x_3 \geq 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 \quad (8)$$

Observando a equação resultante, os lados esquerdos das duas inequações são iguais. Assim, podemos escrever da seguinte forma:

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

O resultado explica que o valor da função objetivo de uma solução praticável de um dos modelos impõe um limite para qualquer outra solução praticável do outro modelo. Qualquer solução praticável para o modelo Primal será menor ou igual a 75 e, qualquer solução praticável para o dual, será maior ou igual a 32. A solução ótima será aquela em que

$$Y = Z \quad (10)$$

A partir da solução, o Teorema Dual denota que tanto o modelo Primal, quanto o modelo Dual, possuem soluções praticáveis em que

$$Y^* = Z^* \quad (11)$$

Ou seja, os valores ótimos dos dois modelos são iguais.

Um corolário deste Teorema mostra 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, se um dos modelos tem solução ótima ilimitada (Z^* ou $Y^* = \pm\infty$), então o outro modelo não tem solução praticável.

4.3.3 Relação entre o modelo primal e dual

O quadro a seguir estabelece a relação direta entre as propriedades relativas aos problemas Primal e Dual (Tabela 8):

Tabela 8 - Relação entre modelo Primal e Dual

Primal (Min.)	→	Dual (Max.)
restrição k é \leq		$w_k \leq 0$
restrição k é $=$		w_k é qualquer
restrição k é \geq		$w_k \geq 0$
$x_k \geq$		restrição k é \leq
x_k é qualquer		restrição k é $=$
$x_k \leq$		restrição k é \geq
Dual (min.)	←	Primal (max.)

4.3.4 Valor ótimo do modelo dual em termos de economia

O significado de valor ótimo das variáveis duais pode ser interpretado como sendo os preços (“*Shadow Prices*”, dual, valor incremental, “*efficiency price*”, valor implícito, etc.) que alguém estaria disposto a pagar por unidades adicionais dos recursos envolvidos nas restrições do Modelo Primal.

O *shadow price* é a utilidade marginal de relaxar a restrição ou, de forma equivalente, o custo marginal de reforçar a restrição, obtida através do relaxamento de uma restrição por uma unidade, demonstra a variação do valor objetivo (mínimo ou máximo de f) da solução ótima de um problema de otimização. Uma vantagem dessa interpretação é cercar a solução ótima.

4.3.5 Imposto de Pigou

Imposto de Pigou, ou Taxa de Pigou, foi proposto por Arthur C. Pigou que, em 1920, no seu livro “*Economics of Welfare*” propôs um imposto como meio idôneo para se chegar ao equilíbrio entre o custo social e o custo privado. A internalização fiscal, de tipo Pigouviano, consiste em fazer através do agente emissor de gases do efeito estufa, no caso em estudo as usinas produtoras de energia por biomassa, uma taxa igual ao montante da deseconomia devido a sua atividade, de forma que o lucro marginal diminua.

O modelo de otimização linear utilizado permite definir o Imposto Pigouviano Ótimo igual ao custo externo marginal, isto é, igual ao dano causado por uma unidade marginal devido a poluição, no nível ótimo desta, levando as forças de mercado a atingirem uma alocação eficientes dos recursos.

4.4 EXEMPLO APLICADO A UM PROBLEMA DE 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 (Tabela 9).

Tabela 9 - Dados do problema de transporte

Plantas	Distâncias (x1000 km)			Oferta (caixas)
	Mercados			
	Nova York	Chicago	Topeka	
<i>Seattle</i>	2,5	1,7	1,8	350
<i>San Diego</i>	2,5	1,8	1,4	600
<i>Demanda</i>	325	300	275	

Para solucionar o problema, determinam-se equações para o custo por caixa transportada (distâncias de i a j multiplicadas pelo frete) e o custo total (custo por caixa multiplicado pelas quantidades de caixas) e 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.

Com a introdução de dados no problema, as equações (11), (12), (13) e (14) o resolvem.

$$c_{ij} = \frac{f * d_{ij}}{1000} \quad (12)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq a_i \quad (13)$$

$$\sum_i x_{ij} \geq b_j \quad (14)$$

$$\text{Minimizar } z = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

Os termos das equações são explicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados e variáveis do problema

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

A função objetivo do problema é a função z, as equações (11), (12) e (13) são funções de restrição. A partir da formulação acima do problema, e utilizando os dados da Tabela 6, chega-se a um resultado ideal (Tabela 11), isto é, de menor custo dentro das restrições existentes.

Tabela 11 - 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 Tabela 12. Esta 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 12 - Custos marginais

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

4.5 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 realizada a representação matemática do problema no programa.

O *software* Generalized Algebraic Modeling System – GAMS – em português, “Sistema Algébrico de Modelagem Geral” foi projetado especificamente para modelagem linear, não linear e problemas de otimização inteira mista. O sistema é, especialmente, útil com problemas complexos. Permite também ao usuário se concentrar no problema de modelagem, realizando uma simples configuração. O sistema cuida dos detalhes mais demorados de implementação específica de software da máquina e do sistema. Também é útil para o tratamento de tarefas grandes e complexas, problemas *one-of-a-kind* que podem exigir muitas revisões para estabelecer um modelo exato. O sistema modela problemas de uma forma altamente compacta e natural. Outro recurso é a possibilidade de o usuário alterar a formulação rápida e mudar de um *solver* para outro, e, até mesmo, converter de linear para não-linear com pouca dificuldade.

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);

5 MODELO TECNOLÓGICO A SER ANALISADO

Será proposto neste projeto um modelo tecnológico de gerenciamento da cadeia de suprimentos (*Supply Chain Management - SCM*) para tratar o planejamento integrado da cadeia de suprimentos, no caso, a biomassa.

No artigo “Modelos de Previsão no Supply Chain Management” (2006), Oliva e Albano propõem que a modelagem multiobjetivo é especificada quando há interesse em avaliar objetivos conflitantes e as respectivas trocas compensatórias. Essa modelagem tem como foco de interesse a avaliação de objetivos conflitantes e as respectivas trocas compensatórias, como o Imposto de Pigou, tratados por meio da modelagem multiobjetivo. Oliva e Albano (2006) apresentam, na Figura 10, a taxionomia dos modelos de previsão utilizados no *SCM*.

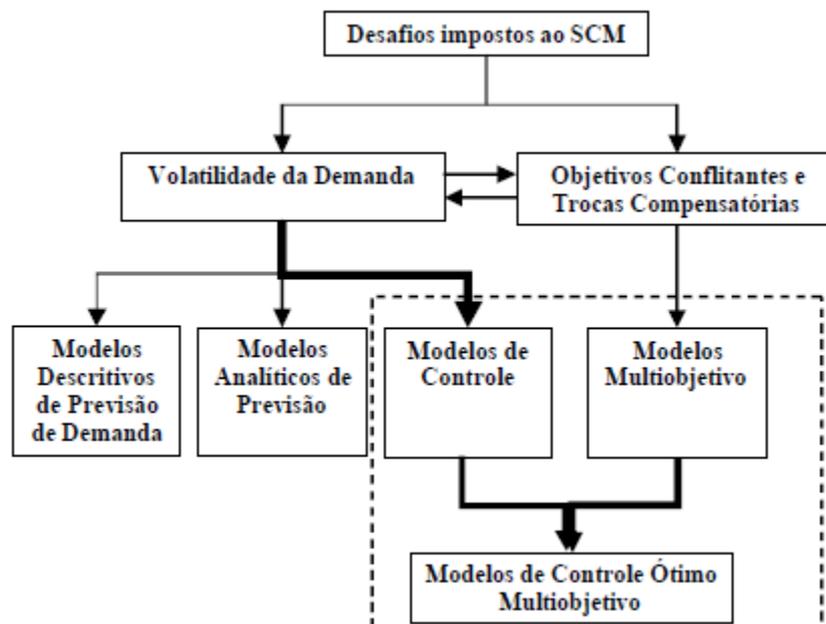


Figura 10- Principais desafios impostos ao SCM e a modelagem utilizada. FONTE: Modelos de previsão no supply chain management. (2006)

5.1 MODELOS DE PREVISÃO

Os autores consideram, quanto aos modelos de previsão, o seguinte:

- ✓ O fato de ser de dois tipos: modelo descritivo e modelo analítico.
- ✓ Consideram também quando a intenção com que uma previsão é realizada ou se são realizadas previsões para que os agentes interessados se adaptem aos acontecimentos ou para que eles decidam sobre que atitude tomar, de modo a exercer influência sobre eventos futuros.

O gerenciamento das trocas compensatórias está estreitamente correlacionado com a tomada de decisão na cadeia de suprimentos. Para melhor gerenciamento dos objetivos conflitantes é fundamental levar em consideração a intensidade das trocas compensatórias advindos deles e a necessidade de reclassificação das prioridades competitivas. Agentes da logística de produção tem por objetivo minimizar os custos de produção e atingir alta produtividade através da eficiência da produção. Espera-se que os níveis de estoque reduzam os prejuízos sobre o sistema de produção afetado pela volatilidade da demanda.

5.2 VOLATILIDADE DA DEMANDA

A propagação da volatilidade da demanda, efeito chicote, é mais sensivelmente percebida pela indústria, que pela flutuação efetiva da demanda final, no caso o consumidor. Esse efeito leva os fornecedores a enfrentarem situações de superprodução e de ociosidade. (Oliva e Albano,2006)

Assim, torna-se importante o gerenciamento de estoques e as políticas de pedidos a serem realizados em cadeia uma vez que, as exigências de transporte para clientes e fornecedores estão ligadas entre si. Caso haja aumento dos custos provocados por oscilações das exigências, a capacidade excedente de transporte precisa ser mantida para atendimento dos períodos de alta demanda.

A estratégia da proposta deste projeto é trilhar a otimização entre as unidades produtoras de energia e os níveis de estoques de resíduos a montante da cadeia. Logo, as decisões de produção, distribuição e entregas serão tomadas com base nas informações sobre a necessidade de geração de energia. Estas informações devem ser compartilhadas entre todos os agentes envolvidos nesta cadeia produtiva.

5.3 OBJETIVOS CONFLITANTES E TROCAS COMPENSATÓRIAS

O gerenciamento das trocas compensatórias está correlacionado com a tomada de decisão na cadeia de suprimentos. Deve-se se levar em consideração a intensidade das trocas compensatórias e a necessidade de reclassificação das prioridades competitivas.

A Logística de Distribuição exige a minimização dos custos de transporte, biomassa posta porta de fábrica, tendo vantagens quanto a descontos e rapidez no reabastecimento. Porém, quanto maior a rapidez no reabastecimento, maiores os custos e, quanto maior o intervalo de entregas, maior a economia de escala. Esse fator analisado pela responsividade da cadeia.

Manter os níveis de estoque adequados, atender metas de produção e satisfazer os níveis de serviço ao consumidor consistem o dilema no tratamento das trocas compensatórias. Muitas tomadas de decisão envolvem a seleção de um número limitado de alternativas, esperando atender múltiplos objetivos de conflito. (Oliva e Albano, 2006)

5.4 MODELO MULTIOBJETIVOS

Modelos multiobjetivos, como visto anteriormente, são especificados para considerar múltiplos critérios de avaliação de desempenho, constantemente sujeitos a análise crítica dos coadjuvantes da cadeia produtiva, capaz de ajudar a cada intervenção moldar suas preferências e encontra argumentos para sustentabilidade do processo, em concordância com múltiplos objetivos pretendidos. (Oliva e Albano, 2006)

Essa modelagem permite a avaliação de desempenho, quando vários objetivos são considerados simultaneamente, sob diferentes hipóteses de futuro e critérios de decisão, bem como a ordenação quanto a prioridades. Esta modelagem se concentra em duas áreas de tomada de decisão: uma primeira é dada quanto a localização das plantas das usinas termoelétricas e os produtores de biomassa; e, uma segunda, quanto a seleção de fornecedores, a partir de um número limitado de alternativas. O modelo multiobjetivo facilita a tomada de decisão quando fatores qualitativos e quantitativos precisam ser considerados no processo de decisão. Por exemplo, um fator quantitativo pode ser a quantidade em toneladas e o fator qualitativo, o teor de umidade e poder calorífico da biomassa disponível.

5.5 JUSTIFICATIVA DO MODELO TECNOLÓGICO ADOTADO

Assim, o método da otimização linear permitirá encontrar pontos ótimos para a localização ótima das plantas de usinas termoelétricas, considerando a disponibilidade de biomassa e critérios para produção de energia. Medidas de desempenho da cadeia de suprimentos, planejamentos estratégico e operacional poderão ser avaliados a partir desse modelo multiobjetivo, uma vez que inclui o custo total da cadeia, nível de serviço e volume de entrega de pedidos. (Oliva e Albano, 2006)

Oliva e Albano (2006) observam que existe uma escassez de trabalhos que consideram custos de transporte como variável relevante para a determinação de políticas de pedidos e entregas, quando o foco da análise é o desempenho global da cadeia de suprimentos, inserida no processo

de planejamento conjunto e colaborativo. Este custo pode influenciar significativamente as decisões e relações entre os agentes.

O método de otimização linear permitirá encontrar um plano ótimo de intervenção na cadeia para otimizar o objetivo deste projeto, encurtando a cadeia de suprimentos. Um problema que este modelo pode trazer, é devido à dificuldade em se obter dados dos agentes participantes da cadeia de suprimentos real, pois não prevê todas as relações entre as variáveis envolvidas no gerenciamento da cadeia, sendo limitado a um modelo analítico.

6 OTIMIZAÇÃO

Este trabalho tem por objetivo encontrar soluções ótimas para a localização de plantas termoelétricas, a partir de dados da geração de resíduos sólidos provenientes da agricultura, das origens desses resíduos e dos custos relativos ao seu manuseio e transporte, bem como avaliar a necessidade ou não da densificação da biomassa antes de ser processada nas usinas.

6.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

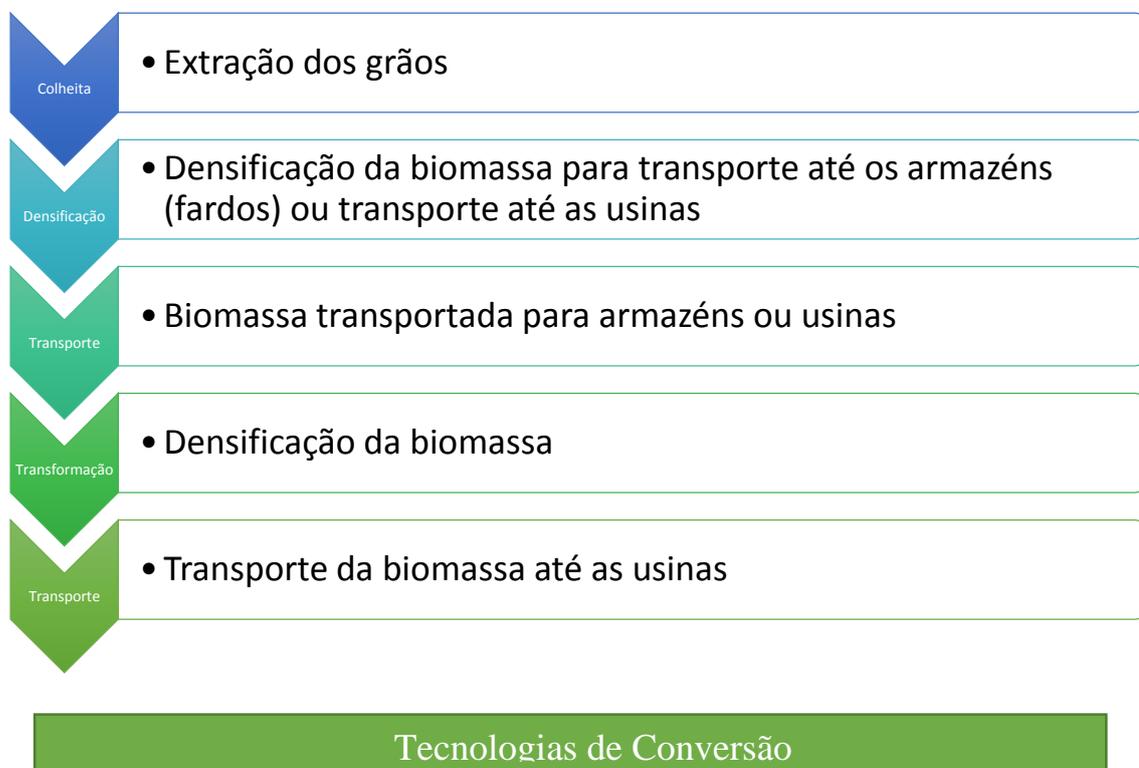
A otimização linear é utilizada no problema proposto para se determinar as demandas de resíduos para um determinado número de usinas termoelétricas localizadas nos municípios do Estado de Mato Grosso. Este determinado número é obtido em função da largura de escala de produção e a oferta dos resíduos disponíveis. A localização geográfica será pré-determinada nos Municípios onde já existe linhas de distribuição de energia para reduzir efeito dos custos relacionados a ligação das usinas a rede básica de energia elétrica brasileira. Os resultados da otimização revelam os municípios com maiores potenciais, entre os pré-determinados, para instalação de usinas de processamento de biomassa sólida proveniente da agricultura, bem como as quantidades ótimas destinadas a cada usina tendo como relevância parâmetros de otimização o custo de transporte.

Foram realizados cenários de 20%, 50% e 80% de aproveitamento, ou rendimento, dos resíduos sólidos provenientes da agricultura e suas avaliações, pois não é possível coletar 100% desses resíduos gerados uma vez que as máquinas e equipamentos utilizados na agricultura não são capazes de tal eficiência, pois alguns produtores optam por devolver ao solo, parte da matéria orgânica como forma de adubar o solo durante a colheita das culturas. Para cada cenário, foram analisados dois tipos de conversão termoquímica da biomassa: gaseificação e combustão direta.

Os custos relativos a densificação, transporte e consumo foram calculados posteriormente, levando em conta custos ambientes referentes a emissão de gases do efeito estufa.

Os resíduos das colheitas de soja e milho serão considerados com base nas quantidades produzidas obtidas pelo Produção Municipal Agrícola (IBGE, 2014) e nas porcentagens de aproveitamento dos cenários. No processo de colheita da soja e do milho são gerados resíduos como a palha e resíduos da soja e a palha, sabugo e resíduos do milho. Este processo normalmente é feito por colhedoras onde os grãos são separados dos resíduos que, seguidamente, serão densificados, transportados e transformados para geração de energia ou produção de biocombustíveis.

Após a colheita, normalmente a palha e o sabugo deixados no solo das fazendas são densificados (fardos) para facilitar o transporte até armazéns de transformação ou usinas termoeletricas. Este trabalho irá avaliar se é vantajoso ou não uma nova densificação da biomassa após o primeiro transporte. O esquema a seguir representa o mapeamento dos processos da biomassa desde a colheita até a porta das usinas.



No entanto, não existe tecnologia disponível economicamente viável para geração de energia a partir dos resíduos da cultura da soja (IPEA, 2012), assim serão assumidos parâmetros para tal. Já as usinas de álcool (de milho) existem e processam a biomassa em caldeiras semelhante ao processo utilizado nas usinas de cana-de-açúcar (MAUÉS, 2007).

Quanto a densificação da biomassa, será escolhida a briquetagem para a densificação pois é a tecnologia mais indicada quando se deseja densificar resíduos sólidos agrícolas. O briquete pode substituir a lenha ou, quando de origem vegetal, substitui em parte o carvão vegetal.

Em cada município produtor de milho e soja será localizada uma briquetadeira para facilitar e reduzir custos de transporte dos resíduos das culturas e será assumido que não há distância entre os geradores de resíduos e as briquetadeiras do mesmo município, pois não há dados para determinação destes valores.

Após a briquetagem dos resíduos agrícolas, os briquetes serão transportados até as usinas termoeletricas. Está será constituída de tecnologias de combustão direta, gaseificação ou pirólise integradas a sistemas termomecânicos, como turbinas à vapor, para geração de energia.

6.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO NO ESTADO DE MATO GROSSO

De posse dos dados das quantidades produzidas pelas culturas da soja nos principais municípios do Estado de Mato Grosso (Tabelas 3 e 4), gerou-se um panorama dos resíduos (palha e resíduos para a soja; e, para o milho, palha, sabugo e resíduos) gerados por essas culturas (Tabela 13).

Tabela 13 - Quantidade de resíduos gerados pelas culturas da soja e do milho nos principais municípios do Estado de Mato Grosso, em toneladas, em ordem decrescente - 2014.

Municípios	Soja (t)	Milho (t)	TOTAL
Sorriso	1.446.714	1.146.478	2.593.192
Nova Mutum	882.811	578.759	1.461.570
Sapezal	873.258	500.946	1.374.231
Campo Novo do Parecis	871.830	467.016	1.338.846
Nova Ubiratã	743.790	547.056	1.290.846
Querência	708.491		708.491
Diamantino	699.774		699.774
Primavera do Leste	572.816	408.698	981.514
Lucas do Rio Verde	524.799	444.048	968.847
Canarana	495.407		495.407
Campo Verde	476.018	337.394	813.412
Brasnorte	474.661		474.661
Paranatinga	466.032		466.032
Campos de Júlio	441.139	337.394	778.533
Subtotal	9.677.541	4.785.711	14.463.252
TOTAL	14.463.252		

O Panorama do Potencial de Biomassa do Brasil (CENBIO, 2012), utiliza o seguinte cálculo para estimar o potencial energético dos resíduos agrícolas.

$$Potencial = \frac{(Resíduos) \times PCI \times \eta}{860 \times func.} \quad (15)$$

Onde:

Potencial – potencial energético gerado a partir de resíduos no ano (MW);

Resíduos – montante de resíduos gerados pela cultura (toneladas);

PCI – poder calorífico inferior (kcal/kg);

η – eficiência de conversão (%);

860 - fator de conversão (kcal/kg para kWh/kg); e

func. – tempo de operação do sistema (horas de operação/ano).

Para essa estimativa, foram utilizados os dados das gerações de resíduos das culturas da soja e do milho com base seca (Tabela 13). O Poder Calorífico Inferior (PCI) foi obtido por meio da literatura (Tabela 14). O valor de 860 refere-se a conversão da unidade kcal/kg para kWh/kg. Considerou-se que o sistema opere com os resíduos gerados 330 dias do ano, 24 horas por dia, que resulta em 7.920 horas de operação/ano, pois normalmente essas usinas param a operação durante um mês ao ano para realização de manutenção dos equipamentos. A eficiência de conversão (η) adotada para os resíduos foi de 15% de baixo rendimento termodinâmico composto por caldeira de 20 bar de pressão de operação e turbina com condensador atmosférico (CENBIO, 2012). Os resultados dos potenciais energéticos distribuídos entre os municípios mais produtores de soja e milho no Estado de Mato Grosso são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14 - Poder Calorífico dos resíduos das culturas da soja e do milho. FONTE: ¹ABIB (2010) e ²CENBIO (2012).

Cultura	Poder Calorífico (kcal/kg)
Soja (palha e resíduos) ²	3.300
Milho (palha, sabugo e resíduos) ¹	3.570

Tabela 15 - Potencial energético dos resíduos gerados na agroindústria das principais culturas brasileiras em MW/ano - 2014.

Municípios	Soja (MW)	Milho (MW)
Sorriso	105,13	91,55
Nova Mutum	64,15	45,50
Sapezal	63,46	39,38
Campo Novo do Parecis	63,35	36,71
Nova Ubiratã	54,05	43,00
Querência	51,48	
Diamantino	50,85	
Primavera do Leste	41,62	32,13
Lucas do Rio Verde	38,13	34,91
Canarana	36,00	
Campo Verde	34,59	26,51
Brasnorte	34,49	
Paranatinga	33,86	
Campos de Júlio	32,05	26,52
Subtotal	703,30	376,25
TOTAL	1.079,56	

Pode-se observar dos resultados que alguns municípios têm representação em ambas as culturas. Isso se deve pelo fato de serem culturas temporárias e muitos produtores alternarem o plantio entre as duas culturas (rotação de culturas) a fim de evitar a degradação física, química e biológica do solo e a queda da produtividade (EMBRAPA, 2004).

O Estado de Mato Grosso compõe 14 municípios e, cada um deste, irá dispor de uma briquetadeira.

Como *input* no programa, serão utilizadas as quantidades dos resíduos em toneladas (t). Também serão utilizados os três cenários (20%, 50% e 80%) de aproveitamento dos resíduos agroindustriais como dito anteriormente, conforme a equação a seguir:

$$O_i[t] = Oferta [t] * \%A [\%] \quad (16)$$

Onde:

O_i - oferta de biomassa densificada das colheitas às usinas, em toneladas;

Oferta – oferta de resíduos, em toneladas;

$\%A$ – cenário de aproveitamento.

A Tabela 16 apresenta os três cenários das quantidades de resíduos aproveitados (t) para cada uma das culturas nos principais municípios do Estado de Mato Grosso.

Tabela 16 - Cenários de aproveitamento dos resíduos das culturas da soja e milho nos principais municípios produtores do Estado de Mato Grosso, em toneladas.

Municípios	Cenário 1 (20%)		Cenário 2 (50%)		Cenário 3 (80%)	
	Soja (t)	Milho (t)	Soja (t)	Milho (t)	Soja (t)	Milho (t)
Sorriso	289.343	232.896	723.357	582.239	1.157.371	931.582
Nova Mutum	176.562	115.752	441.405	115.752	706.249	289.379
Sapezal	174.652	100.189	436.629	250.476	698.606	400.757
Campo Novo do Parecis	174.366	93.403	435.915	233.508	697.464	373.613
Nova Ubiratã	148.758	109.411	371.895	273.528	595.032	437.645
Querência	141.698		354.246		566.793	
Diamantino	139.955		349.887		559.819	
Primavera do Leste	114.563		286.408		458.253	
Lucas do Rio Verde	104.960	88.810	262.400	222.024	419.839	355.238
Canarana	99.081		247.704		396.326	
Campo Verde	95.204	67.463	238.009	168.658	380.815	269.853
Brasnorte	94.932		237.330		379.728	
Paranatinga	93.206		233.016		372.826	
Campos de Júlio	88.228	67.479	220.570	168.697	352.911	269.915
TOTAL	1.935.508	957.142	4.838.771	2.392.856	7.742.033	3.828.569

Observa-se que alguns municípios não possuem produção de milho que possam produzir resíduos significativos para este estudo. Com base nos dados da Tabela 16, pode-se avaliar os prováveis municípios para recebimento de usinas termoelétricas para o processamento da biomassa.

6.3 PROVÁVEIS LOCALIZAÇÕES DAS USINAS TERMOELÉTRICAS

Atualmente, a CELG Distribuição S.A. – CELG-D é a distribuidora de energia elétrica do Estado de Mato Grosso e, de acordo com o Mapa de Localização das Centrais Geradoras e Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Estado de Mato Grosso (ANEEL, 2014), os únicos municípios que já possuem rede de distribuição de energia elétrica devido a presença de usinas (hidrelétricas ou termoelétricas) para possibilidade de conexão são: Sorriso, Sapezal, Campo Novo do Parecis, Primavera do Leste e Paranatinga. E, com isto, são estimados as distâncias entre os

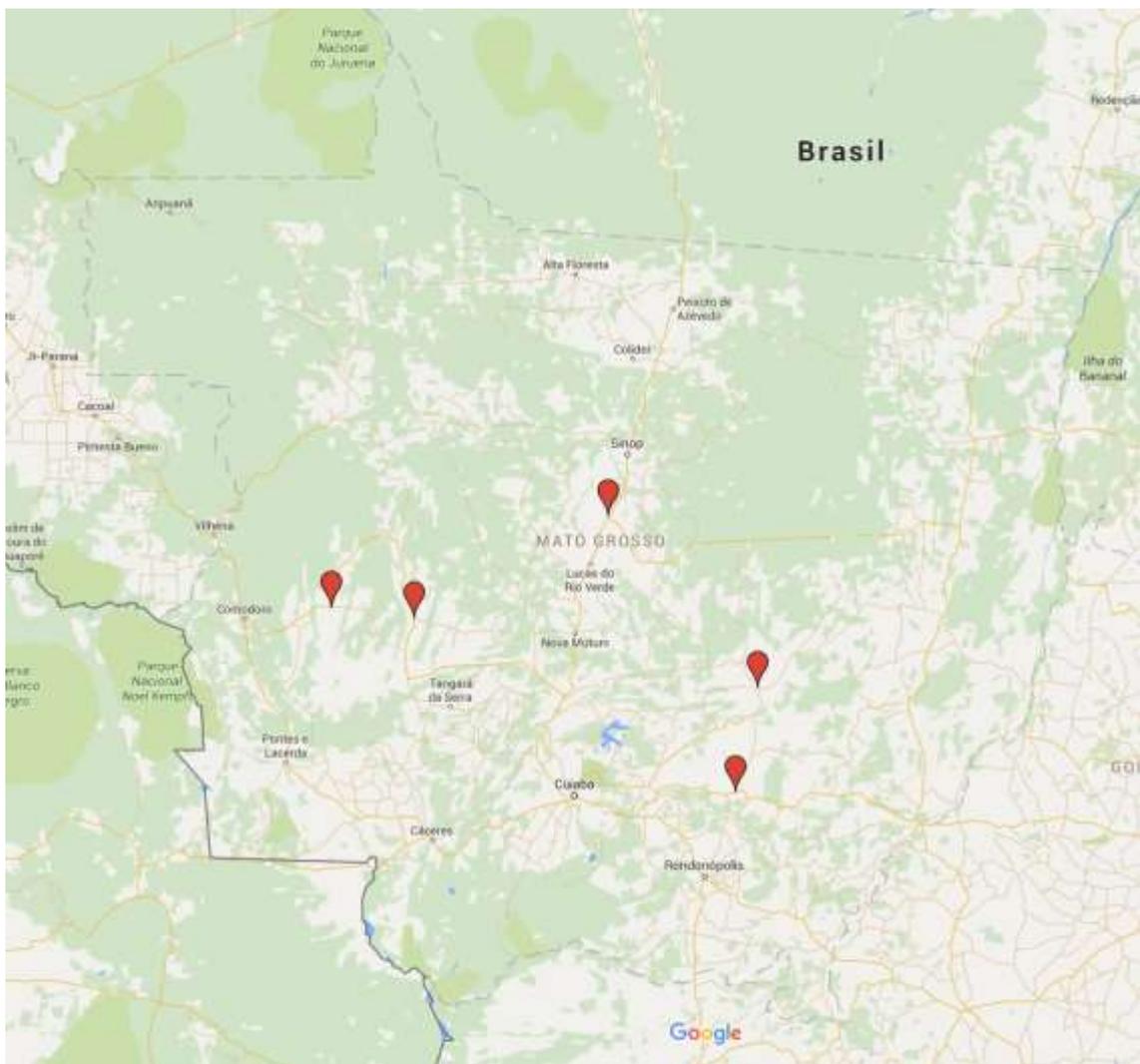


Figura 12 - Municípios alvos para o recebimento de usinas de processamento de biomassa para geração de energia elétrica. FONTE: Google Maps.

A Tabela 17 apresenta os valores das distâncias entre os municípios alvos para o recebimento de usinas de processamento de biomassa e os municípios produtores de biomassa. As distâncias calculadas são baseadas em rotas rodoviárias sem a possibilidade de saber se a pavimentação possibilita a passagem de transportes terrestres, pois esta variável encarece e, muitas vezes, impossibilita o transporte de mercadorias.

Tabela 17 - Distâncias entre municípios alvos para recebimento de biomassa e potenciais municípios geradores de biomassa sólida, em quilômetros, no Estado de Mato Grosso. FONTE: Google Maps.

Municípios geradores de biomassa sólida	Municípios alvos para recebimento da biomassa				
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso		497	388	510	367
Nova Mutum	159	340	232	475	341
Sapezal	497		108	712	680
Campo Novo do Parecis	389	108		634	571
Nova Ubitatã	87	577	468	423	280
Querência	749	1.062	954	525	383
Diamantino	283	355	246	417	357
Primavera do Leste	626	708	630		143
Lucas do Rio Verde	66	432	324	567	430
Canarana	636	950	841	412	270
Campo Verde	523	605	527	103	246
Brasnorte	553	200	164	798	735
Paranatinga	367	680	571	143	
Campos de Júlio	553	58	164	768	736

Os custos relacionados transporte (frete) da biomassa densificada, tem por base as distâncias entre a origem e o destino da carga.

6.5 CUSTOS RELACIONADOS AO TRANSPORTE

Os custos aqui estudados estarão relacionados exclusivamente aos custos do frete em si e aos custos ambientais por estar diretamente ligados as emissões de gases do efeito estufa. Pedágios rodoviários, serviços de despacho, ICMS/ISS, paletização, coleta em zona rural, prazo para entrega ou necessidade de movimentação especial de cargas, são fatores que podem encarecer os custos do transporte.

6.5.1 Custos dos fretes dos briquetes

Para estimar os custos será levado em conta somente o transporte terrestre realizado por caminhões de eixo duplo, normalmente utilizados em usinas de cana-de-açúcar e para o escoamento da produção da soja para exportação, com capacidade média de carga de 17 toneladas, dentro dos limites legais impostos pelo CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito).

A Tabela 18 foi utilizada para calcular os custos relacionado ao frete.

Tabela 18 - Tabela base de preços mínimos de frete no Estado de Mato Grosso. FONTE: Secretaria de Fazenda do Estado de Mato Grosso (2014).

Ordem	Distância em	Carga:		Transporte de Carga:			
		Seca Não Fracionada	Frigorífica	Grãos a Granel	Farelo a Granel	Óleo Vegetal	Algodão Pluma
Numérica	Km	Frete	Frete	Frete	Frete	Frete	Frete
		R\$ / Ton.	R\$ / Ton.	R\$ / Ton.	R\$ / Ton.	R\$ / Ton.	R\$ / Ton.
1	0001 a 0050	34,08	48,54	30,43	33,48	35,91	44,12
2	0051 a 0100	41,04	58,45	36,64	40,31	43,23	53,12
3	0101 a 0150	44,06	62,75	39,34	43,28	46,42	57,04
4	0151 a 0200	47,53	67,70	42,44	46,69	50,07	61,53
5	0201 a 0250	52,43	74,66	46,81	51,49	55,23	67,86
6	0251 a 0300	68,17	97,08	60,86	66,96	71,81	88,24
7	0301 a 0350	70,77	100,78	63,18	69,51	74,55	91,60
8	0351 a 0400	75,99	108,22	67,84	74,63	80,05	98,36
9	0401 a 0450	93,03	132,49	83,06	91,37	98,00	120,42
10	0451 a 0500	103,24	147,03	92,17	101,40	108,75	133,63
11	0501 a 0550	108,60	154,67	96,96	106,67	114,40	140,58
12	0551 a 0600	113,09	161,06	100,97	111,08	119,13	146,39
13	0601 a 0650	116,25	165,56	103,79	114,18	122,46	150,48
14	0651 a 0700	122,59	174,58	109,45	120,40	129,13	158,68
15	0701 a 0750	126,36	179,96	112,82	124,11	133,11	163,57
16	0751 a 0800	133,67	190,36	119,34	131,29	140,81	173,02
17	0801 a 0850	137,04	195,17	122,36	134,60	144,36	177,39
18	0851 a 0900	142,10	202,38	126,88	139,57	149,69	183,94
19	0901 a 0950	151,85	216,26	135,58	149,15	159,96	196,56
20	0951 a 1000	161,43	229,90	144,13	158,55	170,05	208,96
21	1001 a 1100	191,13	272,20	170,66	187,72	201,37	247,45

Como parâmetro da programação de otimização, foi utilizado o valor do transporte de carga farelo a granel por quilômetro (km). E, assim, com a capacidade de carga do caminhão de 17 (t), é possível determinar os valores em reais (R\$) para as distâncias estipuladas anteriormente.

O preço total será resultado da multiplicação do valor médio para o frete, em R\$/km, vezes a distância percorrida. Para se obter o valor médio do frete, foram encontrados os valores mínimos e máximos para o frete em cada faixa de distância da Tabela 18.

A seguir, foi calculado o valor médio do frete com base nos dados dos cálculos dos custos máximos e mínimos das faixas de distâncias para até 1.100 km, uma vez que a maior distância entre municípios é de 1.062, entre Sapezal e Querência (Tabela 17). O valor mínimo correspondeu a capacidade total do caminhão, multiplicado pelo valor do frete da faixa de distância, dividido pela distância mínima da mesma. O valor máximo correspondeu a capacidade total do caminhão, multiplicado pelo valor do frete da faixa de distância, dividido pela distância máxima da mesma. E, para os valores máximos e mínimos, foi calculada a média de 31,10 R\$/km e 3,78 R\$/km, respectivamente. A discrepância do valor mínimo se deve ao primeiro valor referente a distância de 1 km e será somente utilizado o valor médio do frete máximo 3,78R\$/km (Tabela 19) como valor médio do frete, restando calcular os custos ambientais referentes ao transporte.

Tabela 19 - Custos relacionados ao frete.

Distâncias (km)		Farelo/Granel(R\$/t)	17(t)*R\$	Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)
1	50	33,48	569,16	569,16	11,38
51	100	40,31	685,27	13,44	6,85
101	150	43,28	735,76	7,28	4,91
151	200	46,69	793,73	5,26	3,97
201	250	51,49	875,33	4,35	3,50
251	300	66,96	1.138,32	4,54	3,79
301	350	69,51	1.181,67	3,93	3,38
351	400	74,63	1.268,71	3,61	3,17
401	450	91,37	1.553,29	3,87	3,45
451	500	101,40	1.723,80	3,82	3,45
501	550	106,67	1.813,39	3,62	3,30
551	600	111,08	1.888,36	3,43	3,15
601	650	114,18	1.941,06	3,23	2,99
651	700	120,40	2.046,80	3,14	2,92
701	750	124,11	2.109,87	3,01	2,81
751	800	131,29	2.231,93	2,97	2,79
801	850	134,60	2.288,20	2,86	2,69
851	900	139,57	2.372,69	2,79	2,64
901	950	149,15	2.535,55	2,81	2,67
951	1000	158,55	2.695,35	2,83	2,70
1001	1100	187,72	3.191,24	3,19	2,90
MÉDIA				31,10	3,78

6.5.2 Custos ambientais relacionados ao transporte

Os custos ambientais relacionados ao transporte são aqueles associados a emissão de gases do efeito estufa pelos agentes envolvidos no processo. No Brasil, os caminhões rodoviários são

fabricados com motores diesel e, apesar da mistura de biodiesel no combustível para minimizar os danos ao meio ambiente, emitem pelo escapamento Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Hidrocarbonetos (HC's), Monóxido de Carbono e material particulado. (VOLVOTRUCKS, 2011).

Para contabilizar estes custos ambientais em tonelada de Gás Carbônico equivalente (tCO_{2e}), será utilizado como referência os cálculos dos fatores de emissão de CO₂ elaborados pela Gerência de Qualidade do Ar do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2011). Este inventário leva em consideração o atual Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), fase P7, que entrou em vigor em 2014, que fornece valores médios do consumo específico de veículos do ciclo Diesel e o fator de emissão de CO₂ (Tabelas 20 e 21).

Tabela 20 - Valor médio de litros por quilometragem para veículos do ciclo Diesel. FONTE: MMA, 2011.

Categoria	Consumo específico de diesel (km/L diesel)
Caminhões Pesados	3,17

Tabela 21 - Fatores de emissão de CO₂. FONTE: MMA, 2011.

Diesel (kg/L)
2,671

Das Tabelas 20 e 21, pode se inferir que para cada 1.000 litros de diesel consumidos pelos caminhões, serão emitidas 2.671 tCO_{2e} à atmosfera. E, para cada quilômetro de briquete transportado pelos caminhões até as usinas, serão emitidos $8,42 \times 10^{-4}$ tCO_{2e}.

De acordo com o último Leilão de Crédito de Carbono realizado pela BM&F BOVESPA em 2012, o preço negociado ao final do leilão foi de 3,30 €/tCO_{2e}. Na cotação do mês de novembro de 2015, o Euro teve valor médio de R\$4,09, de acordo com o boletim mensal do Banco Central do Brasil do mesmo período, ou seja, 13,49 R\$/tCO_{2e} emitido.

Assim, o custo ambiental devido ao transporte até as usinas tem o valor de 0,011 R\$/km.

6.6 CUSTOS DE DENSIFICAÇÃO DA BIOMASSA BRIQUETAGEM

O custo de briquetagem será composto pelo custo com a energia consumida pelas briquetadeiras e os custos ambientais devido a esse consumo.

Para efeito de cálculo, será considerado a briquetadeira modelo BL 95 da fabricante LIPPEL, com produção média de 1.2t/h de briquete e consumo médio de 55.92 kWh (dados de acordo com o fabricante), para compor a base do estudo.

O custo com a energia consumida pelas briquetadeiras será composto pela tarifa B1, classe Rural, de 0,32563 R\$/kWh (ENERGISA) e potência consumida de 46,6 kWh/t.

Assim, o custo de densificação é de 15,17R\$/t de briquete produzido.

6.6.1 Custos ambientais relacionados a densificação da biomassa

Novamente, o custo ambiental estará relacionado aos custos devido as emissões de gases do efeito estufa pelo consumo de energia pelas briquetadeiras e terá como base o Fator de Emissão Anual (2014) de 0,1355 tCO_{2e}/MWh (MCT).

Do Capítulo 6.5.2, o custo ambiental devido as emissões é de 13,49 R\$/tCO_{2e}. Então, nas briquetadeiras, como são consumidos 0,0466 MWh/t, o custo ambiental relacionado a densificação da biomassa é de 0,085 R\$/t de briquete produzido.

6.7 CUSTOS TOTAIS

Os custos totais são os resultados das somas dos custos energéticos e ambiental do transporte, dos custos energéticos e ambientais da densificação da biomassa, e a Tabela 22 mostra a representação das variáveis envolvidas nos cálculos.

$$Cdens_i = \sum O_i (CustEnerg + CustAmbd) \quad (17)$$

$$Ctransp_{ij} = \sum D_{ij} (Frete + CustAmbt) \quad (18)$$

$$Dtot = D_{ij} * \frac{O_i}{CapCam} \quad (19)$$

Onde:

Tabela 22 - Representação das variáveis.

Processo	Termo	Significado	Unidade
Densificação	$Cdens_i$	Custo de densificação	R\$
	O_i	Oferta de biomassa já densificada	kg
	$CustEnerg$	Custo Energético do Processo	R\$/kg
	$CustAmbd$	Custo Ambiental de Densificação	R\$/kg
Transporte Densificação - Usina	$Ctransp_{ij}$	Custo de transporte	R\$
	$Frete$	Frete	R\$/km

	$CustAmbt$	Custo das emissões de CO ₂ pelo transp.	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\$

A equação de custos de densificação da biomassa, será multiplicada por 2 (dois), pois deve se levar em conta que o caminhão vai carregado até as usinas e retorna vazio até as unidades de briquetagem. O índice i e j referem-se as unidades de briquetagem e as usinas termoelétricas, respectivamente. E, a equação de distâncias total percorrida, considera o número mínimo de viagens realizadas para o transporte da completa disponibilidade de biomassa (briquetes), e depende da quantidade de carga a ser transportada e da capacidade do caminhão utilizado.

6.8 POTÊNCIA INSTALADA DAS USINAS

Capacidade instalada pode ser entendida como o limite ou capacidade máxima de produção de uma fábrica, ou seja, o que poderia ser produzido se o equipamento estiver operando a plena capacidade. Neste estudo, capacidade instalada se traduz como a potência máxima gerada pelo grupo turbina-a-vapor/gerador das usinas termoelétricas para geração de energia elétrica (NIGEL, 2011).

Para cada tecnologia de conversão, combustão direta e gaseificação, será elaborado um programa específico, pois essas tecnologias possuem eficiências distintas. Assim, pode-se avaliar melhor e maximizar a produção de energia baseado na geração de resíduos dos municípios do Estado de Mato Grosso em estudo. A energia específica dos briquetes será considerada o valor de 46 kWh/t (DAHLQUIST, 2013).

Para caracterizar a usina termoelétrica de base, foi realizada a média das capacidades instaladas das usinas do tipo Biomassa em operação no Brasil (ANEEL, 2015). O valor médio calculado foi de 25,78 MW de potência e será utilizado na otimização.

Como dito anteriormente, será considerado 90% do ano para operação devido a parada para manutenção entre safras, ou seja, 7.920 horas em operação.

A potência instalada em função das produções de resíduos da soja e do milho pode ser calculada para combustão direta e gaseificação pela fórmula a seguir.

$$PotInst_{comb} = O_i * 4,6 * \frac{1}{7920} * \eta_{comb} \quad (20)$$

$$PotInst_{gaseif} = O_i * 4,6 * \frac{1}{7920} * \eta_{gaseif} \quad (21)$$

Onde:

PotInstcomb – Potência instalada para combustão direta, em MW/ano;

Potinstgaseif – Potência instalada para gaseificação, em MW/ano;

η_{comb} – Eficiência da combustão direta, em %;

η_{gaseif} - Eficiência da gaseificação, em %; e

O_i – Oferta de biomassa (em briquetes), em kg.

Uma vez calculada a potência instalada e o potencial de energia a ser gerada, podem ser levantados os dados referentes ao faturamento com a venda dessa energia.

6.9 RECEITA GERADA

O faturamento obtido com a produção de energia é resultado da potência instalada, multiplicada pelas horas em funcionamento de cada usina e pela tarifa de venda de energia elétrica do mercado. Uma vez que a usina foi caracterizada (Capítulo 6.8), a fórmula a seguir calcula o faturamento.

$$F = (PotInst * 7796 * Pr) + (PrCarbEvit * FatorMed * PotInst * 7796) \quad (22)$$

Onde:

PotInst – Potência instalada, em MWh;

Pr – Preço de venda da energia, em R\$/MWh;

PrCarbEvit – Preço do crédito de carbono, em R\$/tCO₂e;

FatorMed – Fator Médio Anual, em tCO₂/MWh.

Para o valor pago pela energia gerada, única variável ainda não definida, será adotado o preço médio R\$ 209,91 por MWh do último Leilão FA 2015 realizado pela ANEEL (EPE, 2015). A segunda parcela da equação envolve ganhos pela venda dos créditos de carbonos.

6.10 AVERIGUAÇÃO DA NECESSIDADE DA OTIMIZAÇÃO

Antes de realizar a otimização, é importante avaliar ser necessário fazê-la, pois alguns equipamentos que compõe o processo de logística podem consumir a energia elétrica gerada a partir da biomassa.

Foi visto no Capítulo 6.6 que cada briquetadeira demanda 55.92 kWh em plena operação. Considerando uma operação de 8 (oito) horas diárias, a demanda diária por energia será de 447,36kW (ou 0,447 MW) com produção de 9,6 toneladas de briquetes.

Para fins de investigação será assumido 100% de aproveitamento dos resíduos e 7.920 horas de operação das usinas.

A quantidade de energia demandada por cada município produtor de resíduos das culturas de soja e milho, será calculado através da equação a seguir.

$$Energia\ Demandada\ [MWh] = 0,447\ [MW] * \frac{Oferta\ de\ resíduos[t]}{1,2\ [t]} * 8[h] \quad (23)$$

Já a energia anual ser gerada, em MWh, será calculada por:

$$Energia\ anual\ Gerada[MWh] = 0,447\ [MW] * Oferta\ de\ resíduos[t] \quad (24)$$

Tabela 23 - Geração de Energia, Demanda de energia e variação percentual entre ambas.

Municípios	Geração de Energia (MWh)		Energia Demanda (MWh)		Percentual (%)	
	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho
Sorriso	66.549	52.738	68	54	0,1	0,1
Nova Mutum	40.609	26.623	42	27	0,1	0,1
Sapezal	40.170	23.044	41	24	0,1	0,1
Campo Novo do Parecis	40.104	21.483	41	22	0,1	0,1
Nova Ubiratã	34.214	25.165	35	26	0,1	0,1
Querência	32.591		33		0,1	
Diamantino	32.190		33		0,1	
Primavera do Leste	26.350	18.800	27	19	0,1	0,1
Lucas do Rio Verde	24.141	20.426	25	21	0,1	0,1
Canarana	22.789		23		0,1	0,1

Campo Verde	21.897	15.520	22	16	0,1	0,1
Brasnorte	21.834		22		0,1	
Paranatinga	21.437		22		0,1	
Campos de Júlio	20.292	15.520	21	16	0,001	0,001
Subtotal	445.167	220.143	455	225	0,001	0,001
TOTAL	665.310		680		0,001	

Da Tabela 23, percebe-se que toda energia gerada por ambas as culturas, mesmo naqueles municípios que somente possuem representação quanto a soja, a energia demandada equivale a aproximadamente 0,001% da energia elétrica gerada pela biomassa.

6.11 PROGRAMAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

Para compor a programação, foi confeccionada a tabela 24, com as definições de cada variável e seu símbolo.

Tabela 24 - Definições e símbolos a serem utilizados na programação.

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

A equação abaixo, será utilizada para a otimização do sistema, onde c_{ij} determina o custo de transporte por viagem de 1 (um) caminhão, a variável f representa o custo por quilômetro rodado para somente viagem de ida e d_{ij} é a distância entre o município i com unidade de briquetagem e j município alvo com usina termoeletrica.

$$c_{ij} = f * d_{ij} \quad (26)$$

Será imposta duas restrições a otimização, com intuito de que toda biomassa que será transportada deve ser igual a mesma quantidade de briquetes produzidos.

$$\sum_j x_{ij} = a_i \quad (27)$$

$$\sum_i x_{ij} \geq 0 \quad (28)$$

Tem-se por objetivo maior, otimizar a função z , que corresponde ao custo do total dos transportes realizados. Entretanto, por z não estar dividido pela capacidade máxima de cada caminhão (números de viagens), não representa ainda os custos adequados dos transportes. A função a ser minimizada ficará da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (29)$$

Como a função z a ser otimizada foi definida, passamos agora a incorporar os outros custos envolvidos no cálculo, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Novas variáveis envolvidas no custo do transporte.

Definição	Símbolo
Frete (R\$/km)	f
Quantidades de briquetes transportadas (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 briquetagem por tonelada (R\$/t)	$p1$
Custo ambiental de briquetagem por tonelada (R\$/t)	$p2$
Distância entre municípios (km)	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 briquetagem (R\$)	cp_i
Custo ambiental de briquetagem (R\$)	$cp2_i$
Custo total de briquetagem (R\$)	ctp_i
Custo total (R\$)	ct_{ij}

O custo calculado de transporte ($c1_{ij}$), somente o frete, é

$$c1_{ij} = \frac{f * x_{ij} * d_{ij}}{cap} \quad (30)$$

Entretanto, necessita-se saber a quantidade de viagens necessárias para escoar toda biomassa

$$c2_{ij} = \frac{f2 * x_{ij} * d_{ij}}{cap} \quad (31)$$

$$ctr_{ij} = c1_{ij} + c2_{ij} \quad (32)$$

$$cp_i = p1 * a_i \quad (33)$$

$$cp2_i = p2 * a_i \quad (34)$$

$$ctp_i = cp_i + cp2_i \quad (35)$$

$$ct_{ij} = ctr_{ij} + ctp_i \quad (36)$$

A otimização foi trabalhada em ambientes GAMS. Foram realizadas três iterações variando-se a quantidade de resíduos aproveitados em 20%, 50% e 80%, a fim de analisar se a quantidade de resíduos de municípios produtores e a quantidade de distâncias das usinas termoelétricas seriam viáveis, do ponto de vista financeiro.

6.12 RESULTADOS

Foram realizados 3 cenários e otimizações, variando as porcentagens de aproveitamento dos resíduos das culturas de soja e milho do Estado de Mato Grosso em 80%, 50% e 20%. A cada nova iteração, foram avaliados os municípios alvos para recebimento de biomassa com menor custo de transporte associado.

CENÁRIO 1 – 80% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os dados são apresentados no Anexo II.

Com 80% aproveitamento dos resíduos agrícolas da soja e milho, todos os municípios alvos têm potencial para recebimento de biomassa para geração energia. Cada município com usina instalada, tem potencial para receber biomassa de pelos menos 1 outro município além da sua própria geração.

O custo total devido ao transporte e briquetagem da biomassa foi de R\$176.290.795,10, onde o transporte teve participação de 54,82% e o custo com briquetagem 44,91%.

A média das capacidades instaladas das potenciais usinas de combustão direta foi de 712,6 MW/ano. Já a média para usinas com gaseificação foi de 950,13 MWh médios. Entretanto, 2 possíveis usinas apresentaram valores para capacidade acima de 400 MW/ano. Estas, podem ser utilizadas para integrarem a rede básica de eletricidade brasileira devido a significância em suas potências instaladas. Já os 8 casos restantes podem ser avaliados para autoprodução ou abastecimento de pequenas cidades próximas as usinas, uma vez que as usinas com capacidades menores que 1 MW são classificadas como Centrais Elétricas Geradoras (ou CGH's).

Quanto ao faturamento devido a venda da produção da energia elétricas do estado, das 10 possibilidades de geração, nenhuma teria o faturamento menor que 690 milhões de reais. O maior faturamento e geração de energia foi para a tecnologia de gaseificação na Usina localizada em Sorriso – MT, com R\$ 3.482.443.113,83 para tecnologia de gaseificação. A média de faturamento entre as duas tecnologias seria de mais de 1,3 bilhões de reais.

CENÁRIO 2 – 50% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os dados serão apresentados no Anexo III.

Com 50% aproveitamento dos resíduos agrícolas da soja e milho, todos os municípios alvos têm potencial para recebimento de biomassa para geração energia com duas fontes ou mais de biomassa.

O custo total devido ao transporte e briquetagem da biomassa foi de R\$243.917.704,04, onde o transporte teve participação de 54,82% e o custo com briquetagem 44,91%.

A média das capacidades instaladas das potenciais usinas de combustão direta foi de 445,37 MWh. Já a média para usinas com gaseificação foi de 593,82 MWh médios. Porém, observando os dados quando capacidade de casa usina nos diferentes casos, a tecnologia de gaseificação, por ser mais eficiente, tem as melhores possibilidades de geração.

Quanto ao faturamento devido a venda da produção da energia elétricas do estado, a média foi de 871 milhões de reais. Das 10 possibilidades de faturamento, 5 ficaram abaixo de 500 milhões de reais. O maior faturamento e geração de energia, novamente, foi para a tecnologia de gaseificação na Usina localizada em Sorriso – MT, com 2,1 bilhões de reais.

CENÁRIO 3 – 20% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os resultados serão apresentados no Anexo IV.

Com 20% aproveitamento dos resíduos agrícolas da soja e milho, todos os municípios alvos têm potencial para recebimento de biomassa para geração energia. Cada município com usina instalada, tem potencial para receber biomassa de pelos menos 1 outro município além da sua própria geração.

O custo total devido ao transporte e briquetagem da biomassa foi de R\$97.567.188.60, onde o transporte teve participação de 54,82% e o custo com briquetagem de 44,91%.

A média das capacidades instaladas das potenciais usinas de combustão direta foi de 178,15 MWh. Já a média para usinas com gaseificação foi de 237,53 MWh médios. Devido a isso, estes empreendimentos podem ser direcionados para autoprodução de energia elétrica, no caso deste cenário ser próximo do real.

Quanto ao faturamento devido a venda da produção da energia elétricas do estado, das 10 possibilidades de geração, 8 ficaram abaixo de meio bilhão de reais. O maior faturamento e geração de energia foi, mais uma vez, para a tecnologia de gaseificação na Usina localizada em Sorriso – MT, com 870 milhões de reais. A média de faturamento entre duas tecnologias foi de mais de 348 milhões de reais.

6.12.1 Taxa de Pigou

A tributação, ou Taxa de Pigou, às atividades aos agentes poluidores devido suas atividades danosas ao meio ambiente, trata do princípio que quem polui, deve ressarcir o meio poluído e os agentes danificados. A emissão dos gases do efeito estufa produzidas pelo transporte e briquetagem da biomassa foram identificados através dos custos ambientais dos mesmos. A quantificação monetária desses custos ambientais pode ser realizada pela equivalência em Créditos de Carbono, negociados nas principais bolsas de valores do mundo.

Por parte do governo, entidade interessada neste caso, caso fosse realizada uma estimativa percentual para internalização dos custos de transporte e briquetagem de biomassa provenientes das culturas da soja e do milho no Estado de Mato Grosso, estes seriam de 0,56% para o custo com energia para briquetagem e 0,29% em cima dos custos energéticos totais do transporte.

6.12.2 Tecnologias empregadas

As tecnologias de transformação da biomassa utilizadas no estudo foram a briquetagem para densificação dos resíduos vegetais das lavouras e a combustão direta e gaseificação como tecnologias de conversão térmica para geração de energia elétrica e potenciais subprodutos.

Para a otimização, a eficiência energética obteve valores diferentes pois a tecnologia de gaseificação é mais eficiente termicamente que a combustão direta. Entretanto, esses parâmetros só influenciam a geração de energia e as receitas geradas pela venda da mesma (Anexos II, III e IV). Foram utilizados os valores de eficiência de 60% para combustão direta e 80% para gaseificação, dados da literatura (DAHLQUIST, 2013).

A diferença das tecnologias de conversão, proporcionou um faturamento de até 34% maior para a tecnologia de gaseificação.

6.12.3 Custos Marginais

Os custos marginais equivalem os custos mínimos relacionados ao transporte da biomassa. Estes apontam que, qualquer aumento na distância entre os municípios, serão acrescentados custos ao valor base.

A programação em Ambiente GAMS possibilitou apresentar os resultados no que se refere os custos marginais quanto ao frete e custos ambientais. Esses valores são dependentes das eficiências dos caminhões e da quantidade de carga transportada. Assim, esse custo é apresentado por tonelada. Os zeros equivalem aos municípios onde a briquetadeira está localizada juntamente da usina, reduzindo o transporte a zero (Tabela 26).

Tabela 26 - Custos marginais de transporte de biomassa para o Estado de Mato Grosso (R\$).

Custos marginais de transporte de biomassa para o Estado de Mato Grosso (R\$)					
Municípios	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0	1878,66	1466,64	1927,8	1387,26
Nova Mutum	601,02	1285,2	876,96	1795,5	1288,98
Sapezal	1878,66	0	408,24	2691,36	2570,4
Campo Novo do Parecis	1470,42	408,24	0	2396,52	2158,38
Nova Ubiratã	328,86	2181,06	1769,04	1598,94	1058,4
Querência	2831,22	4014,36	3606,12	1984,5	1447,74
Diamantino	1069,74	1341,9	929,88	1576,26	1349,46
Primavera do Leste	2366,28	2676,24	2381,4	0	540,54
Lucas do Rio Verde	249,48	1632,96	1224,72	2143,26	1625,4
Canarana	2404,08	3591	3178,98	1557,36	1020,6
Campo Verde	1976,94	2286,9	1992,06	389,34	929,88
Brasnorte	2090,34	756	619,92	3016,44	2778,3
Paranatinga	1387,26	2570,4	2158,38	540,54	3,78

Campos de Júlio	2090,34	219,24	619,92	2903,04	2782,08
------------------------	---------	--------	--------	---------	---------

7 CONCLUSÃO

O Brasil se apresenta como um dos maiores produtores de grãos, cereais e leguminosas do mundo. Porém, essa mesma produção gera grande quantidade de resíduos agroindustriais. A soja, maior produção agrícola brasileira, tem grande parte dos seus resíduos aproveitados para produção de farelos, rações de animais e adubos. O milho, segunda maior produção agrícola brasileira, possui grande potencial para aproveitamento de parte dos resíduos. Mas, devido a essas culturas serem muito expressivas, por mais que uma pequena parcela não seja aproveitada, a quantidade de toneladas de resíduos é muito grande e, destinar corretamente ou reaproveitá-los para possível geração de energia elétrica ou produção de biocombustíveis, se faz necessário. Assim, também é necessário calcular os custos logísticos dessa biomassa em potencial.

Através dos estudos desenvolvidos neste trabalho e com o auxílio do *software* GAMS, foram elaboradas otimizações para tratar do problema relacionados a logística de produção, transporte e operação de unidades de densificação e processamento de biomassa proveniente de resíduos sólidos da agricultura do Estado de Mato Grosso. Foram estimadas e determinadas as localizações geográficas de unidades de briquetagem e usinas termoelétricas para geração de energia elétrica e/ou subprodutos, envolvendo custos relacionados ao transporte, briquetagem e impactos ambientais compreendidos pelo processo.

Para alcançar a meta de estudo, foi elaborado um levantamento sobre as principais tecnologias de densificação de biomassa sólida, apresentação das potenciais tecnologias de conversão para essa biomassa, estudo da teoria de otimização com foco em modelos multiobjetivos, programação linear em ambiente GAMS, coleta de dados de referência para transporte, densificação, emissão de carbono, energia elétrica, eficiências térmicas e preço da energia. Após, foi realizada a modelagem matemática do problema e sua posterior programação.

Na primeira parte do trabalho, foi realizado um levantamento sobre as culturas agrícolas brasileiras mais representativas a nível municipal (soja e milho). Feito isso, identificou-se o Estado de Mato Grosso como alvo de estudo, por ser o maior produtor de grãos do Brasil. Nota-se que muitos produtores rurais alternam o plantio entre essas duas culturas temporárias e, devido a isso, a grande produção das culturas terem sido encontrados nos mesmo locais. Assim, este estado foi classificado como potencial gerador de biomassa (aproximadamente 14 milhões de toneladas de resíduos gerados em 2014).

Numa segunda etapa, foi feita uma pesquisa sobre o estado-da-arte científico, de maneira que este trabalho pode contribuir de maneira inovadora a comunidade científica, dado a proposta do mesmo. Notou-se que, comparativamente, existem poucos trabalhos com esta proposta de análise.

E, assim, este trabalho é mais uma ferramenta de suporte a decisões quanto a otimização da logística de produção e uso de biocombustíveis e a viabilidade de empreendimentos.

Na terceira etapa, foram contextualizadas as tecnologias de densificação e conversão de biomassa. Atualmente, para compactação de resíduos sólidos provenientes da agricultura, briquetadeiras são amplamente utilizadas pelos benefícios que estas agregam a biomassa como a aumento da densidade final do produto, aumento da resistência (manuseio), redução de custos de transporte, uniformização do material e facilidade de estocagem. Entretanto, existem tecnologias de pelletização em uso no mercado que, dada as características regionais, se tornam mais atrativos comercialmente. Quanto as tecnologias de conversão, a gaseificação e a pirólise estão em fase de desenvolvimento e ajustes, não sendo encontradas muitas plantas industriais com estas tecnologias. Portanto, a combustão direta serviu de base para os estudos deste trabalho. Levantou-se, também, dados quanto a geração de energia elétrica por fontes de biomassa e sobre emissões gases do efeito estufa e os créditos associados a estes. Foram revelados que existem uma boa participação no mercado de geração de energia elétrica quanto a fonte por biomassa e comercialização de créditos de carbono, sendo que a emissão em tonelada equivalente de CO₂ pelo transporte e densificação da biomassa são mitigados pela conversão da mesma.

Na quarta etapa, foi apresentada a teoria de otimização linear e dualidade, onde sistemas lineares e verificado como esta ferramenta de decisão quanto ao gerenciamento da logística de produção.

Dentro do contexto de otimização, os modelos tecnológicos de previsão de demanda, trocas compensatórias com enfoque multiobjetivos, foram introduzidos para que, com a modelagem matemática do problema, pudessem ser previstas as ofertas de biomassa (matéria-prima), demandas e localizações de mercado (usinas termoeletricas) e, assim, calculados os custos por densificação, transporte, impactos ambientais associados, taxas compensatórias, emissões de carbono, bem como o faturamento pela venda dos créditos de carbono e energia elétrica geradas.

Da otimização, 5 municípios do Estado (Sorriso, Sapezal, Campo Novo do Parecis, Primavera do Leste e Paranatinga) são potenciais candidatos para o recebimento de usinas termoeletricas de processamento de biomassa sólida. As potências variam conforme o cenário de aproveitamento dos resíduos, mas em todos eles há possibilidade de geração expressiva, pois as culturas possuem, em termos quantitativos, números elevados de geração de resíduos.

Em todos os cenários, observou-se que os custos com transporte (~54%) são próximos aos custos de briquetagem (~45%) da biomassa. Os custos ambientais de ambos os processos são menores que 1% quanto aos custos de energia. A receita gerada no pior cenário, Cenário 3, para tecnologia de menor eficiência energética foi de 3 bilhões de reais. O valor mais alto para este

parâmetro calculado foi de R\$357.538.521,66 no Cenário 3, para usina com tecnologia de gaseificação localizada no município de Sorriso – MT.

Do ponto de vista de faturamento, a tecnologia de gaseificação de biomassa se apresenta mais atraente que a de combustão direta. Porém, recomenda-se analisar se a instalação, operação e manutenção de tipo de empreendimento, bem como a análise da taxa de retorno de investimento corroboram para este apontamento.

Quanto ao transporte recomenda-se analisar se as rotas de transporte são viáveis no sentido de infraestrutura viária, se há cobrança de pedágios, se existem outros modais de transporte na região entre os municípios e se os custos que foram desconsiderados neste trabalho tornam inviável o transporte da biomassa.

Quanto a densificação da biomassa, foram investigados que na região sul do país são utilizados tecnologia de pelletização de cascas de arroz. Entretanto, não foram encontrados dados que identificam esta tecnologia a melhor para a densificação de resíduos da soja e do milho até a presente confecção deste trabalho.

Quanto a tecnologias de conversão, até o presente momento usinas de queima direta (combustão direta) da biomassa ainda são a maioria quando se investiga a conversão da biomassa sólida agrícola.

Quanto ao potencial total de geração de energia a partir dessa biomassa potencial, o Estado de Mato Grosso é o estado com maior potencial para geração de biomassa provenientes das culturas da soja e do milho com valores da ordem de 890 MW/ano para o pior cenário de aproveitamento da biomassa estudada.

E, da otimização, foram encontradas as melhores rotas da biomassa que levam em consideração o menor custo de transporte e densificação da biomassa. Nenhuma usina deixou de receber uma quantidade significativa de quantidade de briquetes para geração de energia, ou seja, todas elas, pela otimização, se confirmaram como potenciais para geração de energia elétrica.

Finalizando, no pior cenário de aproveitamento (Cenário 3 – 20% de aproveitamento dos resíduos gerados), as quantidades de energia útil disponível, potência gerada, créditos de carbono, emissão de CO₂ evitada e receita gerada pela venda da energia elétrica ainda são muito expressivos, revelando assim o grande potencial reaproveitamento, destino e uso destes resíduos como fonte de energia alternativa e solução de problemas ambientais.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

_____._____. **Anuário Estatístico do Agronegócio – Secretaria de Produção e Agroenergia**. Brasília: Mapa, 2010c. 78 p.

_____._____. **Arquivos dos Fatores de Emissão - MCT**. Disponível em <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>>. Acessado em 12/11/2015.

_____._____. **Banco de Geração de Informação – ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em 01/11/2015).

_____._____. **Cotação e boletins de moedas**. Banco Central do Brasil. Disponível em <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao>>. Acessado em 12/11/2015.

_____._____. **Entenda como funciona o mercado de crédito de carbono**. Portal Brasil. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acesso em: 01/06/2015.

_____._____. **Resultado do Leilão FA 2015 – EPE**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Fontes%20Alternativas%202015/Leil%C3%A3oFA2015negociaenergiade11usinascomdes%C3%A1giode1,96.aspx?CategoriaID=6976>. Acessado em 12/11/2015.

_____._____. - **Mapa de Localização das Centrais Geradoras e Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Estado de Mato Grosso - ANEEL**. Disponível em http://www.sindenergia.com.br/arquivos/095_mapa2014_bacias_detalhada.pdf. Acesso em 10/11/2015.

_____._____. - **Levantamento Sistemático de preços**. ANP. Disponível em http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp. Acessado em 12/11/2015.

_____._____. - **Modalidade Tarifária Convencional – Baixa Tensão**. ENERGISA. Disponível em <<http://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acessado em 12/11/2015.

_____._____. - **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2004**. Disponível em <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/rotacao.htm>>. Acesso em 06/11/2015.

_____._____. - **INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS – Ministério do Meio Ambiente – MMA – 2011**. Disponível em <

http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf>.

Acesso em 06/11/2015.

ABIB – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIAS DA BIOMASSA. **Inventário residual Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://pt.calameo.com/accounts/200968>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Biomassa**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa \(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa%20(2).pdf). Acesso em: 18 de maio de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 269/2009-SRE/ANEEL**, junho de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/nreh2009857.pdf>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração: BIG**. Disponível em: <www.aneel.gov.br/15.htm>. Acesso em: 31 maio 2015.

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 19/05/2015.

BEZZON G. **Capítulo V - Compactação de Biomassa**. Biomassa para Energia, 2006

BARRETO, L. **Programação Linear – Introdução**, 2010. Disponível em: <http://sites.google.com/site/leonardbarreto/pesquisaoperacional> Acesso em 15/05/2015.

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

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional - BEN**. Brasília: MME, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional - BEN**. Brasília: MME, 2014.

CASTRO, Nivalde José; BRANDÃO, Roberto; DANTAS, Guilherme de A. **Alternativas de Complementação do Parque Hídrico**. Mimeo. GESEL/IE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

CAPUTO, A.C., Palumbo, M., Pelagagge, P.M. & Scacchia, F.: **Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables**. Biomass Bioenergy 28 (2005), pp. 35–51.

CARVALHO E. A., BRINCK V., **Briquetagem**. Capítulo 15. Livro de Tratamento de Minérios, Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2004

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA (CENBIO). **Levantamento do potencial real de excedentes de cogeração no setor sucro alcooleiro: relatório técnico**. Brasília: ANEEL, 2012.

CHANKONG, V. e HAIMES, Y. Y., **Multiobjective Decision Making Theory and Methodology**, Elsevier Science. New York, 1983.

COELHO, Suani Teixeira et. al. **Panorama do potencial de biomassa no Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 75 p

COELHO, S. T, PALETTA, C. E. M. e FREITAS, M. A. V. **Medidas Mitigadoras para a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Geração Termelétrica**. Brasília: Dupligráfica, 2000

CORTEZ, L. A. B., LORA E. S., AYARZA J. A. C. **Capítulo I – Biomassa no Brasil e no Mundo**. Biomassa para Energia, 2006.

DAHLQUIST, ERIK. **Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation**. University of Southern Queensland (USQ), Toowoomba, Australia. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2013.

DINKELBACH, L., 2000, **Thermochemical Conversion of Willow from Short Rotation Forestry**. In: ECNC--00-028 REGROW Guide, Energy research Centre of the Netherlands – ECN, Petten, the Netherlands.

DAHLQUIST, Erik. **Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: COMBUSTION, GASIFICATION, PYROLYSIS, TORREFACTION AND FERMENTATION**. CRC Press, 2013.

ENERGIAS RENOVÁVEIS DO BRASIL. **Avaliação da logística inicial de cadeias produtivas**. Disponível em: <http://www.erbrasil.com.br/modelo/modelo-4.php>. Acessado em 01/06/2015

FELFLI F. F., **Melhoramento das características energéticas de resíduos de biomassa através da torrefação**. Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica, UNICAMP, 1999

GRIVE I, NASH S. G., SOFER A. **Linear and Nonlinear Optimization**. Second Edition. George Mason University, Fairfax, Virginia, 2009.

IBGE, **Produção Agropecuária Municipal**, 2014, disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo2.asp?e=v&p=PA&z=t&o=11>

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Reference Manual (v. 3) e Workbook (v. 2)**, 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>>.

IPEA – Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano. **Utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (COMUNICADO)**. Brasil, 23 de fevereiro de 2011.

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 29/05/2015.

LUENGO C. A., BEZZON G., FELFLI F. E. F., Capítulo X - Pirólise e Torrefação de Biomassa. **Biomassa para Energia**, 2006.

MAFFIOLETTI, J.; MOTA N., J., **Geração de energia elétrica com uso de casca de arroz**. Revista Brasileira de Energia, Vol. 19, nº1, pp. 49-59, 2013.

MANUEL C. de SOUSA DIAS, **Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Embrapa Agroenergia, Brasília, 2012.

MATOS, A. T. **Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais**. [s.l.]:[s.n.], 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAYNoAL/tratamento-residuosagroindustriais>>.

MAUÉS, J. ARONE. **Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usinas de açúcar e álcool**. Revista Engenharia, 2007.

NIGEL S. **“Administração da Produção “** Revisão técnica Henrique Correia, Irineu Gianesi-1.ed.-14.reimpr- São Paulo: Atlas 2011.

NOGUEIRA, F. **Programação Linear**. 2009. Disponível em <http://www.inf.ufpr.br/ess07/Meus_Programas/PO/4shared/programa%25E7%25E3o_linear.pdf>, acesso em 01/06/2015. >

OLIVA, G.M. 2005. Tese de Doutorado. Engenharia de Produção. **Planejamento Conjunto e Colaborativo da Cadeia de Suprimentos: Modelo de Controle Ótimo Multiobjetivo com Custo de Transporte**. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

OLIVEIRA, R. R. L. de, **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com parafina: caracterização de algumas propriedades**. Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*, 2013.

PESSÔA, A. **Agricultura**. Brasília: MRE, 2009. Disponível em: <<http://www.brazil.guide.com.br/port/economia/agric/apresent/index.php>>. Acesso em: 28 maio. 2015.

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.

ROSENTHAL, R. E., **A Gams Tutorial**. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2010.

ROSSI, W. **A sustentabilidade da agricultura brasileira**. [s.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.brasilagro.com.br/index.php?noticias/visualizar_impressao/14/34714>. Acesso em: 27 maio. 2015.

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 08/06/2015.

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 08/06/2015.

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.

SCHNEIDER, V. E.; PERESIN, D.; TRENTIN, A. C.; BORTOLIN, T. A.; SAMBUICHI, R. H. R. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas, Relatório de pesquisa**. Brasília, DF: IPEA, 2012. Disponível em: < http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=18253>. Acesso em: maio. 2012.

SILBERSTEIN, E. **UnB mapeia matérias primas para a fabricação de briquetes**. UnB Ciência, 19 dez. 2011. Disponível em: <http://www.unbciencia.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=366:unb-apeia-materias-primas-paraa-fabricacao-de-briquetes&catid=41:florestal>. Acesso em: 20 maio.2015. Entrevista com o professor Luiz Vicente Gentil da Faculdade de Agronomia da Unb.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Global Warming Potentials.** Disponível em: <http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php>, acesso em 08/06/2015

VERINGA, H.J., 2000, **Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste, Energy research Centre of the Netherlands – ECN**, disponível em http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf, acessado em 14/04/2015.

WALTER, A. C. S.; NOGUEIRA, L. A. H. Produção de eletricidade a partir da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA, EFEI, 1997. cap. 11.

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.

9 ANEXOS

ANEXO I – Lista de países que ratificaram o Protocolo de Quioto

	Compromisso de redução ou limitação quantificada de emissões (porcentagem do ano base ou período)
Alemanha.....	92
Austrália.....	108
Áustria.....	92
Bélgica.....	92
Bulgária*.....	92
Canadá.....	94
Comunidade Europeia.....	92
Croácia*.....	95
Dinamarca.....	92
Eslováquia*.....	92
Eslovênia*.....	92
Espanha.....	92
Estados Unidos da América.....	93
Estônia*.....	92
Federação Russa*.....	100
Finlândia.....	92
França.....	92
Grécia.....	92
Hungria*.....	94
Irlanda.....	92
Islândia.....	110
Itália.....	92
Japão.....	94
Letônia*.....	92
Liechtenstein.....	92
Lituânia*.....	92
Luxemburgo.....	92
Mônaco.....	92
Noruega.....	101
Nova Zelândia.....	100
Países Baixos.....	92
Polônia*.....	94
Portugal.....	92
Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte.....	92
República Tcheca*.....	92
Romênia*.....	92
Suécia.....	92
Suíça.....	92
Ucrânia*.....	100

* Países em processo de transição para uma economia de mercado.

ANEXO II – CENÁRIO 1 – 80% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS

Distâncias entre municípios (km)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0	497	388	510	367
Nova Mutum	159	340	232	475	341
Sapezal	497	0	108	712	680
Campo Novo do Parecis	389	108	0	634	571
Nova Uiratã	87	577	468	423	280
Querência	749	1062	954	525	383
Diamantino	283	355	246	417	357
Primavera do Leste	626	708	630	0	143
Lucas do Rio Verde	66	432	324	567	430
Canarana	636	950	841	412	270
Campo Verde	523	605	527	103	246
Brasnorte	553	200	164	798	735
Paranatinga	367	680	571	143	1
Campos de Júlio	553	58	164	768	736

Quantidades Briquetes Transportadas (t)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	2.074.554	0	0	0	0
Nova Mutum	1.169.256	0	0	0	0
Sapezal	0	1.099.363	0	0	0
Campo Novo do Parecis	0	0	1.071.077	0	0
Nova Uiratã	1.032.677	0	0	0	0
Querência	0	0	0	0	566.793
Diamantino	0	0	559.819	0	0
Primavera do Leste	0	0	0	785.211	0

Lucas do Rio Verde	775.078	0	0	0	0
Canarana	0	0	0	0	396.326
Campo Verde	0	0	0	650.730	0
Brasnorte	0	0	379.729	0	0
Paranatinga	0	0	0	0	372.826
Campos de Júlio	0	622.826	0	0	0

Custo Calculado de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	41.338.014,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Ubiratã	19.976.828,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	48.268.741,66
Diamantino	0,00	0,00	30.621.451,63	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lucas do Rio Verde	11.374.491,74	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	23.793.523,96
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	14.903.238,97	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	13.847.145,75	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	82.898,87
Campos de Júlio	0,00	8.032.262,35	0,00	0,00	0,00

Custo ambiental de transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	120.295,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Ubiratã	58.133,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	140.464,59
Diamantino	0,00	0,00	89.110,04	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lucas do Rio Verde	33.100,37	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	69.240,41
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	43.369,21	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	40.295,93	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	241,24
Campos de Júlio	0,00	23.374,31	0,00	0,00	0,00

Custo Total de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	41.458.309,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Ubiratã	20.034.962,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	48.409.206,26
Diamantino	0,00	0,00	30.710.561,67	0,00	0,00

Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lucas do Rio Verde	11.407.592,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	23.862.764,38
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	14.946.608,18	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	13.887.441,67	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	83.140,11
Campos de Júlio	0,00	8.055.636,66	0,00	0,00	0,00

Custos Marginais de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0,00	1.878,66	1.466,64	1.927,80	1.387,26
Nova Mutum	601,02	1.285,20	876,96	1.795,50	1.288,98
Sapezal	1.878,66	0,00	408,24	2.691,36	2.570,40
Campo Novo do Parecis	1.470,42	408,24	0,00	2.396,52	2.158,38
Nova Ubiratã	328,86	2.181,06	1.769,04	1.598,94	1.058,40
Querência	2.831,22	4.014,36	3.606,12	1.984,50	1.447,74
Diamantino	1.069,74	1.341,90	929,88	1.576,26	1.349,46
Primavera do Leste	2.366,28	2.676,24	2.381,40	0,00	540,54
Lucas do Rio Verde	249,48	1.632,96	1.224,72	2.143,26	1.625,40
Canarana	2.404,08	3.591,00	3.178,98	1.557,36	1.020,60
Campo Verde	1.976,94	2.286,90	1.992,06	389,34	929,88
Brasnorte	2.090,34	756,00	619,92	3.016,44	2.778,30
Paranatinga	1.387,26	2.570,40	2.158,38	540,54	3,78
Campos de Júlio	2.090,34	219,24	619,92	2.903,04	2.782,08

Capacidade da Usina Instalada - Combustão Direta (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	639,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	360,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	338,95	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	330,23	0,00	0,00
Nova Ubiratã	318,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	174,75
Diamantino	0,00	0,00	172,60	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	242,09	0,00
Lucas do Rio Verde	238,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	122,19
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	200,63	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	117,08	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	114,95
Campos de Júlio	0,00	192,03	0,00	0,00	0,00

Capacidade da Usina Instalada -Gaseificação (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	852,82	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	480,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	451,93	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	440,31	0,00	0,00
Nova Ubiratã	424,52	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	233,00
Diamantino	0,00	0,00	230,13	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	322,79	0,00
Lucas do Rio Verde	318,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	162,92
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	267,51	0,00

Brasnorte	0,00	0,00	156,10	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	153,26
Campos de Júlio	0,00	256,04	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Combustão Direta (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	1.072.615.564,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	604.545.568,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	568.408.586,74	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	553.783.545,04	0,00	0,00
Nova Ubiratã	533.929.424,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	293.051.372,31
Diamantino	0,00	0,00	289.445.781,25	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	405.981.197,56	0,00
Lucas do Rio Verde	400.741.777,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	204.913.966,73
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	336.449.584,89	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	196.332.850,28	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	192.763.658,45
Campos de Júlio	0,00	322.022.670,77	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Gaseificação (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	1.430.154.086,65	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	806.060.757,72	0,00	0,00	0,00	0,00

Sapezal	0,00	757.878.115,66	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	738.378.060,05	0,00	0,00
Nova Ubiratã	711.905.899,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	390.735.163,08
Diamantino	0,00	0,00	385.927.708,33	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	541.308.263,41	0,00
Lucas do Rio Verde	534.322.370,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	273.218.622,30
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	448.599.446,52	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	261.777.133,71	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	257.018.211,27
Campos de Júlio	0,00	429.363.561,03	0,00	0,00	0,00

Tabela de Custos Totais (R\$)	
Custo ambiental de transporte	R\$ 617.625,55
Custo Total de Transporte	R\$ 212.856.223,63
Custo energético de briquetagem	R\$ 175.308.512,74
Custo total de briquetagem	R\$ 982.282,37
Custo total	R\$ 389.147.018,75

ANEXO III – CENÁRIO 2 – 50% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS

Distâncias entre municípios (km)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0	497	388	510	367
Nova Mutum	159	340	232	475	341
Sapezal	497	0	108	712	680
Campo Novo do Parecis	389	108	0	634	571
Nova Ubitatã	87	577	468	423	280
Querência	749	1062	954	525	383
Diamantino	283	355	246	417	357
Primavera do Leste	626	708	630	0	143
Lucas do Rio Verde	66	432	324	567	430
Canarana	636	950	841	412	270
Campo Verde	523	605	527	103	246
Brasnorte	553	200	164	798	735
Paranatinga	367	680	571	143	1
Campos de Júlio	553	58	164	768	736

Quantidades Briquetes Transportadas (t)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	1.296.593	0	0	0	0
Nova Mutum	730.784	0	0	0	0
Sapezal	0	687.101	0	0	0
Campo Novo do Parecis	0	0	669.422	0	0
Nova Ubitatã	645.422	0	0	0	0
Querência	0	0	0	0	354.245
Diamantino	0	0	349.886	0	0
Primavera do Leste	0	0	0	490.756	0

Lucas do Rio Verde	484.423	0	0	0	0
Canarana	0	0	0	0	247.703
Campo Verde	0	0	0	406.705	0
Brasnorte	0	0	237.330	0	0
Paranatinga	0	0	0	0	233.016
Campos de Júlio	0	389.266	0	0	0

Custo Calculado de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	288.301,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	25.836.207,19	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	152.778,85	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	148.847,88	0,00	0,00
Nova Ubiratã	12.485.493,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	30.167.903,20
Diamantino	0,00	0,00	19.138.368,99	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	109.121,04	0,00
Lucas do Rio Verde	7.109.043,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	14.870.922,73
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	9.314.505,73	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	8.654.448,78	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	51.811,69
Campos de Júlio	0,00	5.020.153,93	0,00	0,00	0,00

Custo ambiental de transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	838,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	75.184,73	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	444,59	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	433,16	0,00	0,00
Nova Ubiratã	36.333,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	87.790,19
Diamantino	0,00	0,00	55.693,67	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	317,55	0,00
Lucas do Rio Verde	20.687,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	43.275,17
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	27.105,70	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	25.184,90	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	150,77
Campos de Júlio	0,00	14.608,91	0,00	0,00	0,00

Custo Total de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	289.140,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	25.911.391,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	153.223,44	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	149.281,03	0,00	0,00
Nova Ubiratã	12.521.826,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	30.255.693,40
Diamantino	0,00	0,00	19.194.062,66	0,00	0,00

Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	109.438,59	0,00
Lucas do Rio Verde	7.129.730,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	14.914.197,91
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	9.341.611,43	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	8.679.633,69	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	51.962,46
Campos de Júlio	0,00	5.034.762,84	0,00	0,00	0,00

Custos Marginais de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	3,78	1.878,66	1.466,64	1.927,80	1.387,26
Nova Mutum	601,02	1.285,20	876,96	1.795,50	1.288,98
Sapezal	1.878,66	3,78	408,24	2.691,36	2.570,40
Campo Novo do Parecis	1.470,42	408,24	3,78	2.396,52	2.158,38
Nova Ubiratã	328,86	2.181,06	1.769,04	1.598,94	1.058,40
Querência	2.831,22	4.014,36	3.606,12	1.984,50	1.447,74
Diamantino	1.069,74	1.341,90	929,88	1.576,26	1.349,46
Primavera do Leste	2.366,28	2.676,24	2.381,40	3,78	540,54
Lucas do Rio Verde	249,48	1.632,96	1.224,72	2.143,26	1.625,40
Canarana	2.404,08	3.591,00	3.178,98	1.557,36	1.020,60
Campo Verde	1.976,94	2.286,90	1.992,06	389,34	929,88
Brasnorte	2.090,34	756,00	619,92	3.016,44	2.778,30
Paranatinga	1.387,26	2.570,40	2.158,38	540,54	3,78
Campos de Júlio	2.090,34	219,24	619,92	2.903,04	2.782,08

Capacidade da Usina Instalada - Combustão Direta (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	399,76	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	225,31	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	211,84	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	206,39	0,00	0,00
Nova Ubiratã	198,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	109,22
Diamantino	0,00	0,00	107,88	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	151,31	0,00
Lucas do Rio Verde	149,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	76,37
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	125,39	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	73,17	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	71,84
Campos de Júlio	0,00	120,02	0,00	0,00	0,00

Capacidade da Usina Instalada -Gaseificação (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	533,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	300,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	282,46	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	275,19	0,00	0,00
Nova Ubiratã	265,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	145,63
Diamantino	0,00	0,00	143,83	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	201,74	0,00
Lucas do Rio Verde	199,14	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	101,83
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	167,19	0,00

Brasnorte	0,00	0,00	97,56	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	95,79
Campos de Júlio	0,00	160,02	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Combustão Direta (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	670.383.387,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	377.840.224,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	355.254.656,20	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	346.114.023,42	0,00	0,00
Nova Ubiratã	333.705.222,76	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	183.156.741,38
Diamantino	0,00	0,00	180.903.251,47	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	253.737.741,00	0,00
Lucas do Rio Verde	250.463.110,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	128.070.973,06
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	210.280.570,00	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	122.707.786,01	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	120.477.045,58
Campos de Júlio	0,00	201.263.766,70	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Gaseificação (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	893.844.516,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	503.786.966,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	473.672.874,94	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	461.485.364,56	0,00	0,00
Nova Ubiratã	444.940.297,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	244.208.988,50
Diamantino	0,00	0,00	241.204.335,30	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	338.316.988,00	0,00
Lucas do Rio Verde	333.950.813,61	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	170.761.297,42
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	280.374.093,33	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	163.610.381,35	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	160.636.060,77
Campos de Júlio	0,00	268.351.688,94	0,00	0,00	0,00

Tabela de Custos Totais (R\$)	
Custo ambiental de transporte	R\$ 388.049,47
Custo Total de Transporte	R\$ 133.735.957,09
Custo energético de briquetagem	R\$ 109.567.601,33
Custo total de briquetagem	R\$ 613.925,25
Custo total	R\$ 243.917.704,04

ANEXO IV – CENÁRIO 3 – 20% DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS

Distâncias entre municípios (km)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	0	497	388	510	367
Nova Mutum	159	340	232	475	341
Sapezal	497	0	108	712	680
Campo Novo do Parecis	389	108	0	634	571
Nova Ubitatã	87	577	468	423	280
Querência	749	1062	954	525	383
Diamantino	283	355	246	417	357
Primavera do Leste	626	708	630	0	143
Lucas do Rio Verde	66	432	324	567	430
Canarana	636	950	841	412	270
Campo Verde	523	605	527	103	246
Brasnorte	553	200	164	798	735
Paranatinga	367	680	571	143	1
Campos de Júlio	553	58	164	768	736

Quantidades Briquetes Transportadas (t)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	518.638	0	0	0	0
Nova Mutum	292.314	0	0	0	0
Sapezal	0	274.841	0	0	0
Campo Novo do Parecis	0	0	267.769	0	0
Nova Ubitatã	258.169	0	0	0	0
Querência	0	0	0	0	141.698
Diamantino	0	0	139.955	0	0
Primavera do Leste	0	0	0	196.303	0

Lucas do Rio Verde	193.769	0	0	0	0
Canarana	0	0	0	0	99.081
Campo Verde	0	0	0	162.682	0
Brasnorte	0	0	94.932	0	0
Paranatinga	0	0	0	0	93.206
Campos de Júlio	0	155.707	0	0	0

Custo Calculado de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	115.320,77	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	10.334.503,55	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	61.111,66	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	59.539,27	0,00	0,00
Nova Ubiratã	4.994.207,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	12.067.185,42
Diamantino	0,00	0,00	7.655.362,91	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	43.648,50	0,00
Lucas do Rio Verde	2.843.622,94	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	5.948.380,99
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	3.725.809,74	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	3.461.786,44	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	20.724,72
Campos de Júlio	0,00	2.008.065,59	0,00	0,00	0,00

Custo ambiental de transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	335,59	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	30.073,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	177,84	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	173,26	0,00	0,00
Nova Ubiratã	14.533,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	35.116,15
Diamantino	0,00	0,00	22.277,51	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	127,02	0,00
Lucas do Rio Verde	8.275,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	17.310,10
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	10.842,30	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	10.073,98	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	60,31
Campos de Júlio	0,00	5.843,58	0,00	0,00	0,00

Custo Total de Transporte (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	115.656,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	10.364.577,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	61.289,50	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	59.712,53	0,00	0,00
Nova Ubiratã	5.008.740,65	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	12.102.301,56
Diamantino	0,00	0,00	7.677.640,42	0,00	0,00

Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	43.775,52	0,00
Lucas do Rio Verde	2.851.898,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	5.965.691,09
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	3.736.652,05	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	3.471.860,42	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	20.785,03
Campos de Júlio	0,00	2.013.909,16	0,00	0,00	0,00

Custos Marginais de Transporte (R\$)

	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	3,78	1.878,66	1.466,64	1.927,80	1.387,26
Nova Mutum	601,02	1.285,20	876,96	1.795,50	1.288,98
Sapezal	1.878,66	3,78	408,24	2.691,36	2.570,40
Campo Novo do Parecis	1.470,42	408,24	3,78	2.396,52	2.158,38
Nova Ubiratã	328,86	2.181,06	1.769,04	1.598,94	1.058,40
Querência	2.831,22	4.014,36	3.606,12	1.984,50	1.447,74
Diamantino	1.069,74	1.341,90	929,88	1.576,26	1.349,46
Primavera do Leste	2.366,28	2.676,24	2.381,40	3,78	540,54
Lucas do Rio Verde	249,48	1.632,96	1.224,72	2.143,26	1.625,40
Canarana	2.404,08	3.591,00	3.178,98	1.557,36	1.020,60
Campo Verde	1.976,94	2.286,90	1.992,06	389,34	929,88
Brasnorte	2.090,34	756,00	619,92	3.016,44	2.778,30
Paranatinga	1.387,26	2.570,40	2.158,38	540,54	3,78
Campos de Júlio	2.090,34	219,24	619,92	2.903,04	2.782,08

Capacidade da Usina Instalada - Combustão Direta (MW/ano)

	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga

Sorriso	159,90	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	90,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	84,74	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	82,56	0,00	0,00
Nova Ubiratã	79,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	43,69
Diamantino	0,00	0,00	43,15	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	60,52	0,00
Lucas do Rio Verde	59,74	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	30,55
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	50,16	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	29,27	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	28,74
Campos de Júlio	0,00	48,01	0,00	0,00	0,00

Capacidade da Usina Instalada -Gaseificação (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	213,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	120,17	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	112,98	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	110,08	0,00	0,00
Nova Ubiratã	106,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	58,25
Diamantino	0,00	0,00	57,53	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	80,70	0,00
Lucas do Rio Verde	79,66	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	40,73
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	66,88	0,00

Brasnorte	0,00	0,00	39,03	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	38,32
Campos de Júlio	0,00	64,01	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Combustão Direta (R\$)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	268.153.891,25	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	151.136.392,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	142.102.146,69	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	138.445.886,26	0,00	0,00
Nova Ubiratã	133.482.356,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	73.262.843,08
Diamantino	0,00	0,00	72.361.445,31	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	101.495.299,39	0,00
Lucas do Rio Verde	100.185.444,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	51.228.491,68
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	84.112.396,22	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	49.083.212,57	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	48.190.914,61
Campos de Júlio	0,00	80.505.667,69	0,00	0,00	0,00

Faturamento pela produção de energia elétrica - Gaseificação (MW/ano)					
	Sorriso	Sapezal	Campo Novo do Parecis	Primavera do Leste	Paranatinga
Sorriso	357.538.521,66	0,00	0,00	0,00	0,00
Nova Mutum	201.515.189,43	0,00	0,00	0,00	0,00
Sapezal	0,00	189.469.528,91	0,00	0,00	0,00
Campo Novo do Parecis	0,00	0,00	184.594.515,01	0,00	0,00
Nova Ubiratã	177.976.474,76	0,00	0,00	0,00	0,00

Querência	0,00	0,00	0,00	0,00	97.683.790,77
Diamantino	0,00	0,00	96.481.927,08	0,00	0,00
Primavera do Leste	0,00	0,00	0,00	135.327.065,85	0,00
Lucas do Rio Verde	133.580.592,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Canarana	0,00	0,00	0,00	0,00	68.304.655,58
Campo Verde	0,00	0,00	0,00	112.149.861,63	0,00
Brasnorte	0,00	0,00	65.444.283,43	0,00	0,00
Paranatinga	0,00	0,00	0,00	0,00	64.254.552,82
Campos de Júlio	0,00	107.340.890,26	0,00	0,00	0,00

Tabela de Custos Totais (R\$)	
Custo ambiental de transporte	R\$ 155.220,10
Custo Total de Transporte	R\$ 53.494.489,83
Custo energético de briquetagem	R\$ 43.827.128,19
Custo total de briquetagem	R\$ 245.570,59
Custo total	R\$ 97.567.188,60

ANEXO V – PROGRAMAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO EM AMBIENTE GAMS

Sets

i produtores / sorriso, nova-mutum, sapezal, campo-parecis, nova-ubirata, querencia, diamantino, primavera, lucas, canarana, campo-verde, brasnorte, paranatinga, campos-julio /

j usinas / sorriso, sapezal, campo-parecis, primavera, paranatinga / ;

Parameters

a(i) quantidade de briquetes i transportados em toneladas

/ sorriso	2593192
nova-mutum	1461570
sapezal	1374231
campo-parecis	1338846
nova-ubirata	1290846
querencia	708491
diamantino	699774
primavera	981514
lucas	968847
canarana	495407
campo-verde	813412
brasnorte	474661
paranatinga	466032
campos-julio	778533 /

b(j) quantidade de briquetes j demandados pelas usinas em toneladas

/ sorriso	7397739
sapezal	7397739
campo-parecis	7397739
primavera	7397739
paranatinga	7397739 / ;

Table d(i,j) distance in thousands of miles

	sorriso	sapezal	campo-parecis	primavera	paratinga
sorriso	0	497	388	510	367
nova-mutum	159	340	232	475	341
sapezal	497	0	108	712	680
campo-parecis	389	87	0	634	571
nova-ubirata	87	577	468	423	280
querencia	749	1062	954	525	383
diamantino	283	355	246	417	357
primavera	626	708	630	0	143
lucas	66	432	324	567	430
canarana	636	950	841	412	270
campo-verde	523	605	527	103	246
brasnorte	553	200	164	798	735
paranatinga	367	680	571	143	0
campos-julio	553	58	164	768	736

Scalar f custo do frete em reais por quilometro /3.78/ ;

Scalar cap capacidade dos caminhoes /17/;

Parameter c1(i,j) custo calculado do transporte ;

$$c1(i,j) = (f * a(i) * d(i,j))/cap ;$$

Scalar f2 custo ambiental de transporte /0.011/ ;

Parameter c2(i,j) custo ambiental do transporte ;

$$c2(i,j) = (f2 * a(i) * d(i,j))/cap;$$

Parameter ctr(i,j) custo total de transporte ;

$$ctr(i,j) = c1(i,j) * c2(i,j);$$

Scalar p1 custo da energia para briquetagem por tonelada /15.17/ ;

Parameter cb(i) custo energético de briquetagem ;

$$cb(i) = p1 * a(i);$$

Scalar p2 custo ambiental de briquetagem por tonelada /0.085/ ;

Parameter cb2(i) custo energético de briquetagem ;

$$cb2(i) = p2 * a(i);$$

Parameter ctb(i) custo total de briquetagem ;

$$ctb(i) = cb(i) + cb2(i);$$

Parameter ct(i,j) custo total ;

$$ct(i,j) = ctr(i,j) * ctb(i);$$

\$ontext

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

s.t.

supply(i) .. sum(j, x(i,j)) =l= a(i)

demand(j) .. sum(i, x(i,j)) =g= b(j)

\$offtext

\$eval imax card(i)

\$eval jmax card(j)

\$eval xmax %imax%*%jmax%

Set n SDP variable space / x1*x%xmax% /

nmap(n,i,j) / #n:(#i.#j) /

m SDP constraints / #i,#j /

mi(m) / #i /

mj(m) / #j /

Parameter

mLE(m) SDP constraints with =l=

mGE(m) SDP constraints with =g=

c(m) right hand side

F0(n,n) cost coefficients

F(m,n,n) constraint matrix

Y(n,n) primal solution to transport problem

xvec(m) dual solution to transport problem;

* Objective

F0(n,n) = -sum(nmap(n,i,j), ct(i,j));

* supply

F(mi,n,n) = sum(nmap(n,i,j)\$sameas(mi,i), 1);

c(mi) = sum(i\$sameas(mi,i), a(i));

mLE(mi) = yes;

* demand

F(mj,n,n) = sum(nmap(n,i,j)\$sameas(mj,j), 1);

c(mj) = sum(j\$sameas(mj,j), b(j));

mGE(mj) = yes;

execute_unload 'csdpin.gdx' n, m, mLE, mGE, c, F, F0;

execute 'gams runcsdp.inc lo=%gams.lo% --strict=1';

abort\$errorlevel 'Problems running RunCSDP. Check listing file for details.'

```
execute_load 'csdpout.gdx', xvec, Y;
```

Parameter rep;

```
rep('ship', i, j) = sum(nmap(n,i,j), Y(n,n));
```

```
rep('price',j,") = sum(mj$sameas(mj,j), -xvec(mj));
```

```
rep('obj' ,",") = sum((i,j), ct(i,j)*rep('ship', i, j));
```

```
display rep;
```