UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

AIRES DUARTE DA FONSECA

DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS *BIOMASS-TO-LIQUIDS* PARA
PRODUÇÃO DE ÓLEO DIESEL SINTÉTICO NO BRASIL

SÃO PAULO
2013

AIRES DUARTE DA FONSECA

DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS *BIOMASS-TO-LIQUIDS* PARA
PRODUÇÃO DE ÓLEO DIESEL SINTÉTICO NO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Energia e Ambiente / Instituto de Física) para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Helena Lara dos Santos Matai.

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Duarte, Aires

Dimensionamento de plantas Biomass-to-Liquids para produção de óleo diesel sintético no Brasil./ Aires Duarte da Fonseca; orientadora : Patrícia Helena Lara dos Santos Matai. – São Paulo, 2013.

151 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia)
EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo.

1. Energia de Biomassa. 2. Biocombustíveis. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP – FEA – IEE – IF

AIRES DUARTE DA FONSECA

“Dimensionamento de plantas biomass-to-liquids para produção de óleo diesel sintético no Brasil”

Tese defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof^a Dr^a Patrícia Helena Lara dos Santos Matai - PPGE/USP
Orientadora e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. José Luis de Paiva – EP/USP

Prof. Dr. Miguel Edgar Morales Udaeta – EP/USP

Prof. Dr. Sérgio Almeida Pacca – EACH/USP

Prof Dr. Augusto Câmara Neiva EP/USP

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese a todos aqueles, pesquisadores ou entusiastas, que acreditam na razão e na ciência como caminhos essenciais para o aperfeiçoamento de nossa sociedade e para a evolução do ser humano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua graça divina e pelo abençoado caminho pelo qual fui guiado nesses anos de pesquisa e reflexão; à minha mãe e ao meu irmão, minha amada família, pela sempre presente companhia e apoio em todos os momentos de minha jornada; ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) e a todos os seus colaboradores que contribuíram para minha formação como pesquisador, em especial agradeço aos professores Ildo Sauer, Suani Coelho, Célio Bermann, José Goldemberg, Cláudio Scarpinella, Roberto Zilles, Roberto Hukai, Murilo Fagá, Alexandre Piantini, Arnaldo Kanashiro, Hédio Tatizawa, Virgínia Parente, Sonia Seger e aos meus bons amigos Tina Selles, Rodrigo “Alemão” Guarnetti, Orlando Cristiano, Larissa Rodrigues, Nilton Bispo, André Mocelin, Moana Simas, Adriana Pelege e Renata Boaventura; ao Programa de Recursos Humanos (PRH4) da Agência Nacional de Petróleo, Gás-Natural e Biocombustíveis (ANP), Thalita Marassato, Karina Merino, Hirdan Costa e aos grandes amigos que nele fiz: Aline Nasche, Arthur Cursino, Javier Escobar, Renato Barbosa, Renata Araújo, Francisco Del Moral, Isabel Sado, Rafael “Big” Juliano, Rafael Puglieri, Raul Penazzo, Rafael Troncoso e Vitor Santos pela boa companhia nos congressos Brasil afora e em tantas e tantas reuniões. Agradeço aos meus bons e velhos amigos aventureiros, que por muitos mundos comigo andarilharam; aos meus amigos da Escola de Engenharia de Lorena (EEL), que pelas noites adentro muitas partidas de pôquer comigo disputaram, aos professores Flávio Teixeira e André Ferraz e à minha colega Juliana Furlani; aos meus talentosos amigos músicos por suas canções; aos Perdedores e nossos tantos filmes antigos; agradeço ao professor Andre Faaij, da Universidade de Utrecht; a Claes Tullin da delegação sueca da Agência Internacional de Energia; a Anneli Kunnas da UPM Bioforce Company; ao Secretário Carlos Klink e também à senhora Ana Dolabella do Ministério do Meio Ambiente (MMA); a Shamim Patel da Linnæus University; ao professor José Landgraff e sua equipe do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo; à senhora Susan Pfeiffer e em especial ao senhor Matthias Rudloff, da empresa CHOREN Industrietechnik GmbH, pela inestimável colaboração e atenção com esta tese. Agradeço às “Três Marias” da Biblioteca Fonseca Telles: Maria de Fátima, Maria de Lourdes e Maria Penha; à Dulcineia “Dulce” Santos, Marisa Akemi e Rafael Diegues. Agradeço aos professores José Camacho, Marilin Mariano, José Luis Paiva e Augusto Neiva. Agradeço muito ao amigo e professor Miguel Udaeta e em especial à minha professora orientadora, Patrícia Matai, cuja dedicação, amizade e apoio foram fundamentais para as vitórias que conquistei, nesses anos de estudo, como pesquisador na Universidade de São Paulo.

A compreensão humana não é um exame desinteressado, mas recebe infusões da vontade e dos afetos; disso se originam ciências que podem ser chamadas 'ciências conforme a nossa vontade'. Pois um homem acredita mais facilmente no que gostaria que fosse verdade. Assim, ele rejeita coisas difíceis pela impaciência de pesquisar; coisas sensatas, porque diminuem a esperança; as coisas mais profundas da natureza, por superstição; a luz da experiência, por arrogância e orgulho; coisas que não são comumente aceitas, por deferência à opinião do vulgo. Em suma, inúmeras são as maneiras, e às vezes imperceptíveis, pelas quais os afetos colorem e contaminam o entendimento.

(Francis Bacon)

RESUMO

DUARTE, Aires. **Dimensionamento de plantas *Biomass-to-Liquids* para produção de óleo diesel sintético no Brasil.** 2013.

151p. Tese (Doutor em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2013.

Há uma demanda global pelo abastecimento de combustíveis veiculares menos poluentes, tanto por questões energéticas quanto sócio-ambientais. Uma potencial alternativa, que traduz a possibilidade de um biocombustível sem as limitações da Primeira Geração, é a rota tecnológica conhecida como *Biomass-to-Liquids* (BTL) que, através da gaseificação e da síntese Fischer-Tropsch, possibilita a obtenção de biocombustíveis líquidos, como o óleo diesel sintético, provenientes da biomassa moderna, nesse estudo, a biomassa lignocelulósica. Para a produção em escala comercial de um biocombustível da Segunda Geração, um complexo planejamento e altos investimentos são demandados dado seu pioneirismo e ausência de histórico de mercado ou modelos precisos. Uma metodologia desenvolvida em 2006 pelo pesquisador Harold Boerrigter propõe o dimensionamento ideal de uma planta BTL a partir de uma planta *Gas-to-Liquids* (GTL); são aqui propostas correções e atualizações para esta metodologia, sugerindo-se uma curva capaz de apontar a influência da economia de escala em plantas BTL e uma fórmula para o cálculo estimado do *Total Capital Investment* (TCI) destas plantas – até o momento o Brasil não dispõe de nenhuma planta que opere pela rota BTL. Segue-se com considerações sobre a oferta de resíduos florestais no território brasileiro e a constatação de que a mesma seria insuficiente como matéria-prima para sustentar grandes plantas BTL, fazendo-se necessário o emprego de culturas planejadas na forma de florestas energéticas. Uma vez feita tal análise, apresenta-se o histórico, desde sua concepção até o seu fechamento, da primeira planta a operar pela rota BTL e a produzir o *designer fuel* batizado de SunDiesel®: construída na Alemanha, a CHOREN Industrietechnik contribui com sua experiência de anos e também com a tecnologia de gaseificação Carbo-V® para as pesquisas com os biocombustíveis sintéticos. Seu exemplo pode sinalizar um alerta com relação ao dispêndio de esforços em projetos desta natureza dadas as incertezas econômicas que circundam as fronteiras tecnológicas dos combustíveis da Segunda Geração.

Palavras-chave: Biomassa. Segunda Geração de biocombustíveis. Biomass-to-Liquids (BTL). Designer Fuel. Síntese Fischer-Tropsch.

ABSTRACT

DUARTE, Aires. **Sizing of Biomass-to-Liquid plants for synthetic diesel oil production in Brazil.** 2013.

151p. Doctor's Thesis - Post-Graduation – Energy Related Graduate Program, Universidade de São Paulo, 2013.

There is a global demand for the supply of less polluting vehicular fuels as much by energy issues as socio-environmental. A potential alternative meaning the possibility of a biofuel without the limitations from the First Generation is the technological route known as Biomass-to-Liquids (BTL) which via gasification and the Fischer-Tropsch synthesis turns possible to obtain liquid biofuels such synthetic diesel oil from modern biomass, in this study, the lignocellulosic biomass. For commercial-scale production of a Second Generation biofuel, a complex planning and high investments are required given its pioneering and absence of market history or precise models. A methodology developed in 2006 by researcher Harold Boerrigter proposes the ideal sizing for a BTL plant assuming a Gas-to-Liquids (GTL) plant; here are proposed corrections and updates for this methodology, suggesting a curve able to point the influence of economy of scale in BTL plants and a formula for the calculation of an estimated Total Capital Investment (TCI) of these plants – by the present time Brazil has no plant operating by BTL route. The research follows up with issues regarding forest residues provision in the Brazilian territory and concluding that the same would be insufficient as a raw material to sustain large BTL plants, making necessary the use of planned crops in the form of energy forests. Once made such analysis, it is presented the history since its beginning until its closing for the first plant to operate by the BTL route and to produce the designer fuel called SunDiesel®: built in Germany, the CHOREN Industrietechnik contributes with its experience of years and also with the gasification technology Carbo-V® for researches with synthetic biofuels. Such example may indicates an alert regarding the expenditure of efforts on projects of this nature, given the economic uncertainties that surround the Second Generation fuels technological frontiers.

Keywords: Biomass. Second Generation biofuels. Biomass-to-Liquids (BTL). Designer Fuel. Fischer-Tropsch synthesis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Rota tecnológica <i>Biomass-to-Liquids</i> BTL.	26
Figura 3.1 – Cadeia produtiva de uma típica planta <i>Biomass-to-Liquids</i> .	42
Figura 3.2 – Típica planta <i>Gas-to-Liquids</i> (simplificada).	44
Figura 3.3 – Planta Oryx GTL, Ras Laffan, Qatar, Arábia Saudita.	58
Figura 3.4 – Planta Escravos GTL, Escravos, Nigéria, África.	59
Figura 3.5 – Linha de produção esquemática de uma planta GTL.	64
Figura 3.6 – Linha de produção esquemática de uma planta BTL.	65
Figura 3.7 – Briquetes e <i>pellets</i> de biomassa lignocelulósica.	81
Figura 3.8 – Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Norte.	84
Figura 3.9 – Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Nordeste.	86
Figura 3.10 – Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Centro-Oeste.	88
Figura 3.11 – Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Sudeste.	89
Figura 3.12 – Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Sul.	91
Figura 4.1 – Planta-alfa (α -plant).	97
Figura 4.2 – Planta-beta (β -plant).	97
Figura 4.3 – CHOREN Industries GmbH – Planta-Beta (β -plant).	98
Figura 4.4 – Gaseificador (α -plant).	100
Figura 4.5 – Gaseificador (β -plant).	100
Figura 4.6 – Reator multi-tubular Fischer-Tropsch (β -plant).	100
Figura 4.7 – Planta-alfa (α -plant) em construção.	101
Figura 4.8 – Planta-beta (β -plant) em construção.	102
Figura 4.9 – Silo de estocagem de biomassa.	103
Figura 4.10 – CHOREN Components GmbH.	105
Figura 4.11 – Processo BTL empregado na planta-beta (β -plant).	113
Figura 4.12 – Carbo-V® – Subestágio I.	114
Figura 4.13 – Carbo-V® – Subestágio II.	115
Figura 4.14 – Carbo-V® – Subestágio III.	115
Figura 4.15 – Amostras de SunDiesel®.	122
Figura A.1 – O gás de síntese (<i>syngas</i>) e algumas de suas aplicações.	138
Figura B.1 – Cálculos para diferentes fatores de escala (1).	139

Figura B.2 – Cálculos para diferentes fatores de escala (2).	145
Figura B.3 – Cálculos para diferentes fatores de escala (3).	145
Figura B.4 – Cálculos para diferentes fatores de escala (4).	146
Figura B.5 – Cálculos para diferentes fatores de escala (5).	146
Figura B.6 – Cálculos para relação entre CP <i>versus</i> TCI Específico (1).	147
Figura B.7 – Cálculos para relação entre CP <i>versus</i> TCI Específico (2).	147
Figura B.8 – Cálculos do TCI Total por região do Brasil – Parte 1	150
Figura B.9 – Cálculos do TCI Total por região do Brasil – Parte 2	151

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 1.	49
Gráfico 3.2 – Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 2.	50
Gráfico 3.3 – Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 3.	51
Gráfico 3.4 – Comparação entre agrupamentos: Propostas 1 e 3.	52
Gráfico 3.5 – Composição simplificada do <i>Fixed Capital Investment</i> (FCI).	54
Gráfico 3.6 – Relação entre TCI <i>versus</i> Escala de Produção para plantas GTL.	57
Gráfico 3.7 – Capacidade de Produção <i>versus</i> Fator de Escala (FE) segundo Boerrigter.	61
Gráfico 3.8 – Capacidade de Produção <i>versus</i> Fator de Escala (FE) - Ampliada.	62
Gráfico 3.9 – Agrupamento dos custos em uma típica planta BTL – Proposta 1.	66
Gráfico 3.10 – Agrupamento dos custos em uma típica planta BTL – Proposta 2.	67
Gráfico 3.11 – Comparação entre agrupamentos: Propostas 1 e 2.	68
Gráfico 3.12 – Relação entre TCI <i>versus</i> Escala de Produção para plantas BTL (1).	71
Gráfico 3.13 – Relação entre TCI <i>versus</i> Escala de Produção para plantas BTL (2).	73
Gráfico 4.1 – Perspectiva do uso de matéria-prima na planta-beta (β -plant).	108
Gráfico 4.2 – Distribuição das frações C_n para diferentes valores de α .	118
Gráfico B.1 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (1).	140
Gráfico B.2 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (2).	140
Gráfico B.3 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (3).	141
Gráfico B.4 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (4).	141
Gráfico B.5 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (5).	142
Gráfico B.6 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (6).	142
Gráfico B.7 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (7).	143
Gráfico B.8 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (8).	143
Gráfico B.9 – Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (9).	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre Fator de Escala (FE) e Capacidade de Produção (CP).	63
Tabela 3.2 – Panorama brasileiro: Resíduos de biomassa e TCI estimado (US\$).	92
Tabela A.1 – Plantas XTL em atividade.	136
Tabela B.1 – Distribuição dos custos proporcionais para plantas BTL.	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMOVEL	Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário.
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AEAC	Álcool Etílico Anidro Combustível.
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
ARCO	Atlantic Richfield Company.
ARLA 32	Agente Redutor Líquido Automotivo.
ARPA-E	Advanced Research Projects Agency – Energy.
ASF	Anderson-Schulz-Flory.
ASU	Air Separation Units.
ATF	Aviation Turbine Fuel.
AvGas	Aviation Gasoline.
BNDS	Banco Nacional do Desenvolvimento.
BP	Beyond Petroleum.
BRACELPA	Associação Brasileira de Papel e Celulose.
BTL	Biomass-to-Liquids.
BTX	Benzeno, Tolueno, Xileno.
CE	Comunidade Européia.
Ceetol	Cellulosic Ethanol.
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa.
CHOREN	Carbon Hydrogen Oxygen Renewable.
CHRISGAS	Clean Hydrogen-rich Synthesis Gas.
CNL	Chevron Nigeria Limited.
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão.
CONAFLOR	Comissão Nacional de Floretas.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural.
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.
CP	Capacidade de Produção.
CTE	Chumbo Tetraetila.
CTL	Coal-to-Liquids.

CUE	Conselho da União Européia.
DC	Direct Costs.
DEF	Diesel Exhaust Fluid.
DFLOR	Departamento de Florestas.
DME	Dimetil Éter.
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis.
DOE	Department of Energy (USA).
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands.
EDW	Base da Força Aérea Edwards.
EP	Escola Politécnica.
EGTL	Escravos GTL.
EPA	Environmental Protection Agency.
EPC	Engineering, Procurement and Construction.
ES	Espírito Santo.
EUA	Estados Unidos da América.
FAAP	Fundação Armando Álvares Penteado.
FAO	Food and Agriculture Organization.
FCI	Fixed Capital Investment.
FE	Fator de Escala.
FEA	Faculdade de Economia, Administração e Ciências Contábeis.
FER	Fonte de Energia Renovável.
FT	Fischer-Tropsch.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GF	Guiana Francesa.
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo.
GNV	Gás natural veicular.
GTL	Gas-to-Liquids.
HC	Hidrocarbonetos.
HCC	Hidrocrackeamento Catalítico.
HPC	Heavy Paraffin Conversion.
HPS	Heavy Paraffin Synthesis.
HTG	High Temperature Gasification
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IC	Indirect Costs.
IEA	Instituto de Energia e Ambiente.
IF	Instituto de Física.
ILC	International Land Coalition
ISBL	Inside Battery Limit.
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas Estado de São Paulo S.A.
JP-8	Jet Propellant 8.
LCA	Life Cycle Analysis.
LLC	Limited Liability Company.
LTG	Low Temperature Gasification.
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia.
MD	Master Degree.
MDA	Ministério do Desenvolvimento Agrário.
MDF	Medium Density Fiberboard.
MDP	Medium Density Particleboard.
MMA	Ministério do Meio Ambiente.
MME	Ministério de Minas e Energia.
MS	Mato Grosso do Sul.
NBR	Norma Brasileira.
NC	Número de Cetano.
NO	Octanagem.
NNPC	Nigerian National Petroleum Company.
NPRA	National Petrochemical & Refiners Association Annual Meeting.
NREL	National Renewable Energy Laboratory.
OC	Owner's Cost.
OSB	Oriented Strand Board.
OSBL	Outside Battery Limit.
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento.
P&DT	Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico.
PE	Parlamento Europeu.
PEC	Purchased Equipment Costs.
PPGE	Programa de Pós-Graduação em Energia.

PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.
POX	Oxidação Parcial do Metano.
PMVA	Produtos de maior valor agregado.
PNF	Programa Nacional de Florestas.
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotres.
PS-EEE	Process Simulation for Energy, Environment and Economy.
PTS	Partículas Totais em Suspensão
QAV	Querosene de Aviação.
QP	Qatar Petroleum.
RDS	Reserva de Desenvolvimento Sustentável.
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas.
SI	Sistema Internacional de Unidades.
SMCQ	Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental.
SMDS	Shell Middle Distillate Synthesis.
SNG	Synthetic Natural Gas.
SRM	Reforma a Vapor do Metano.
StC	Start-Up Costs.
TAF	Thermische Apparatur Freiberg GmbH.
TCI	Total Capital Investment.
UE	União Européia.
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro.
UnB	Universidade de Brasília
USAF	United States Air Force.
USDOD	United States Department of Defense.
USP	Universidade de São Paulo.
WC	Working Capital.
WGS	Water gas shift reaction.
XTL	Designação genérica para combustíveis sintéticos.
WTL	Wastes-to-Liquids.

LISTA DE SÍMBOLOS

° C	Graus Celsius (temperatura).
ΔH	Variação de Entalpia (energia).
α	Constante de propagação de cadeias carbônicas (seletividade).
β	Constante de terminação de cadeias carbônicas .
$\in$	Pertence a.
$\mathbb{N}$	Números Naturais.
$\rightarrow$	Deslocamento no sentido da reação.
$\leftrightarrow$	Deslocamento em ambos os sentidos da reação.
%	Fração de 100.
©	Copyright.
®	Registered trade mark.
TM	Trade Mark
a	Are = 100 m ² (área).
atm	Atmosfera = 101.325 Pa (pressão).
bar	Bar = 10 ⁵ Pa (pressão).
bbd	Barrels by day (produção).
bbl	Barril de petróleo $\approx$ 160 dm ³ (produção).
bdt	Bone dry ton (volume de biomassa)
bpd	Barril por dia (produção).
C	Carbono.
C _n	Fração de hidrocarbonetos que possuem comprimento <i>n</i> .
Co	Cobalto.
dm ³	Decímetro cúbico = 1,00 x 10 ⁻³ m ³ (volume).
GJ	Gigajoules = 1,00 x 10 ⁹ Joules (trabalho ou energia térmica).
f(x)	Função de uma variável em x.
€	Euro (unidade monetária).
Fe	Ferro.
ha	Hectare = 100 ares = 10,00 x 10 ³ m ² (área).
J	Joule = N.m (trabalho ou energia térmica).
H ₂	Hidrogênio molecular.

kg	Quilograma (massa) (SI).
kJ	Quilojoule = $1,00 \times 10^3$ Joules (trabalho ou energia térmica)
km ²	Quilômetro quadrado = $1,00 \times 10^6$ m ² (área).
K	Kelvin (temperatura termodinâmica) (SI).
lb	Libra = 0,45359237 kg (massa).
L	Litro = $1,00 \times 10^{-3}$ m ³ (volume).
m	Metro (comprimento) (SI).
m ²	Metro quadrado (área).
m ³	Metro cúbico (volume).
mm	Milímetro = 1×10^{-3} m (comprimento).
mL	Mililitro = 1×10^{-3} L (volume).
mol	Mol $\approx 6,022 \times 10^{23}$ (quantidade de matéria) (SI).
MJ	Megajoule = $1,00 \times 10^6$ J (trabalho ou energia térmica).
MPa	Megapascal = $1,00 \times 10^6$ Pa (pressão).
MW	Megawatt = $1,00 \times 10^6$ W (potência elétrica).
MW _{th}	Megawatt térmico = $1,00 \times 10^6$ W _{th} . (potência térmica).
μg	Micrograma = $1,00 \times 10^{-6}$ kg (massa).
n	Comprimento de hidrocarbonetos.
N	Newton = Kg.m/s ² (força).
N ₂	Nitrogênio molecular.
Ni	Níquel.
NO _x	Notação para os óxidos de nitrogênio.
O ₂	Oxigênio molecular.
ppm	Parte por milhão = μg/mL (concentração).
Pa	Pascal = N/m ² (pressão).
Pb	Chumbo.
Pt	Platina.
R\$	Real (unidade monetária).
s	Segundo (tempo) (SI).
S	Enxofre.
SO _x	Notação para os óxidos de enxofre.
US\$	Dólar (unidade monetária).
W	Watt = J/s (potência elétrica).
W _{th}	Watt térmico = J/s (potência térmica).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	19
1.1	Objetivo geral e objetivos específicos	24
1.2	Estrutura Capítular	25
2	REVISÃO SOBRE A BIOENERGIA	27
2.1	Combustíveis e biocombustíveis no Brasil	28
2.1.1	O óleo diesel brasileiro	31
2.2	Conceituando <i>designer fuel</i>	36
3	DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS <i>BIOMASS-TO-LIQUIDS</i> : UMA PROPOSTA COM BASE NA METODOLOGIA DESENVOLVIDA POR BOERRIGTER	40
3.1	Dimensionamento de plantas <i>Gas-to-Liquids</i> (GTL)	41
3.2	Dimensionamento de plantas <i>Biomass-to-Liquids</i> (BTL)	63
3.3	Revisão sobre os resíduos de biomassa	76
3.4	Potencial energético de produção de plantas BTL	82
3.4.1	Região Norte	84
3.4.2	Região Nordeste	85
3.4.3	Região Centro-Oeste	87
3.4.4	Região Sudeste	88
3.4.5	Região Sul	90
3.5	Aspectos gerais das florestas energéticas	91
4	CHOREN INDUSTRIE-TECHNIK GMBH	96
4.1	Apresentando a CHOREN Industrietechnik GmbH	96
4.2	Principais estágios da planta-beta (β -plant)	107
4.2.1	Primeiro Estágio: O preparo da biomassa lignocelulósica	107
4.2.2	Segundo Estágio: O processo de gaseificação Carbo-V®	109
4.2.3	Terceiro Estágio: A Síntese Fischer-Tropsch (SMDS)®	116
4.3	O Sundiesel®	120
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	124
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICE A – COMBUSTÍVEIS XTL	135
	APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO	139

1 INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

One condition for realizing sustainable development is the establishment of a global sustainable energy supply.

(José Goldemberg)

Um dos mais destacados desafios da moderna sociedade no século XXI é a segurança energética. O intenso crescimento populacional observado, o consequente aumento do consumo per capita juntamente com as tão discutidas mudanças climáticas decorrentes da ação humana, pedem por ações orientadas de uma forma sustentável, tanto em aspectos sócio-econômicos quanto ambientais. Apesar das muitas definições para sustentabilidade terem sofrido revisões conceituais ao longo do tempo conforme o avanço tecnológico e as próprias construções sociais características de cada geração, há um consenso de que muitas das nações ao redor do mundo têm investido recursos e orientado esforços objetivando mitigar o impacto negativo do uso energético não-sustentável advindo do progresso industrial – processo esse que não permite estagnação ou retrocesso – especialmente quando a atividade geradora desse impacto reside no emprego de fontes energéticas classificadas como poluentes, cujos expoentes são o carvão mineral¹, o petróleo e o gás natural. Estes combustíveis de origem fóssil são compostos essencialmente pelos elementos carbono (C) e hidrogênio (H), e possuem inúmeros derivados de emprego diversificado produzidos pela importante indústria petroquímica – atividade industrial essa responsável pela produção de combustíveis líquidos, óleos lubrificantes, graxas, polímeros plásticos, dentre outros muitos bens de consumo de incontestável relevância na moderna sociedade. Ao final do século XIX, o carvão mineral era, primordialmente, o recurso magno para atender às necessidades energéticas por insumos para calefação doméstica, assim como para o emprego industrial, majoritariamente para a produção de vapor d'água em caldeiras. Foi durante o processo de industrialização e urbanização observado na Europa, em princípios do século XX, que se iniciou a gradual introdução dos combustíveis líquidos provenientes da petroquímica em desenvolvimento, graças ao revolucionário advento dos motores de combustão interna.

¹ O carvão mineral é classificado conforme o teor do elemento carbono presente na rocha, sendo chamado de antracito em sua forma mais concentrada, passando em seguida para a hulha, o linhito e chegando até a turfa, sua variedade com menor teor de carbono. A não ser quando mostrar-se necessária uma diferenciação, tratar-se-á esses minerais apenas pela denominação mais geral de carvão mineral.

Esses, essencialmente máquinas térmicas capazes de transformar em energia mecânica a energia contida em determinados combustíveis, são divididos em Ciclo Otto (cujo princípio é a ignição por centelha) e Ciclo Diesel (cujo princípio é a auto-ignição), desenvolvidos, respectivamente, pelos alemães, o inventor Nikolaus August Otto e o engenheiro mecânico Rudolf Christian Karl Diesel, acarretando num cisma com o carvão mineral, a fonte de energia até então utilizada pelas máquinas a vapor; essas, uma herança tecnológica da Revolução Industrial iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, viriam transformar profundamente os meios de locomoção da humanidade. O emprego dos modernos motores de combustão interna, no que tange seu funcionamento, gerou uma rígida necessidade por combustíveis líquidos veiculares que permitissem seu funcionamento e, desde então, essa necessidade representa uma significativa demanda em todo o mundo, tendo acarretado à sociedade complexas redes de distribuição, políticas mercadológicas e uma notável economia em sua órbita. Para suprir essa enorme demanda por combustíveis líquidos veiculares, os processos de refino e transformação do petróleo tornaram-se primordiais no atendimento às essas necessidades em curso, constituindo até os dias de hoje – e por muitas décadas ainda – a trajetória tecnológica dominante para a produção dos combustíveis gasolina e óleo diesel empregados nos motores de combustão interna.

Em decorrência do aumento na demanda de energia advinda desses combustíveis fósseis, há aproximadamente um consenso de que a sociedade de consumo foi conduzida a uma matriz energética insegura, dispendiosa e também negativa para o meio ambiente. Esses aspectos têm levado, nas últimas décadas, à formulação e proposição de mudanças que promovam e intensifiquem o aproveitamento de outras fontes energéticas, fontes essas, algumas vezes, designadas alternativas quando comparadas aos combustíveis fósseis como, por exemplo, a energia nuclear, mesmo com todo o embate que há sobre suas vantagens e desvantagens. Dentre as fontes energéticas chamadas alternativas, destaque é dado àquelas classificadas como fontes renováveis, que apresentam, por si só, uma perspectiva de aproveitamento e uso menos danosos em termos ambientais; essa perspectiva é largamente incentivada por uma relativamente recente “consciência verde” coletiva que promove ações no sentido de seu emprego – que, eventualmente, veio a se tornar um ramo rentável da economia e cujo reflexo social, positivo em sua forma idealizada, é observável em seus apoiadores e executores. Muitas dessas iniciativas se mostraram factíveis nesse sentido e com o passar dos anos tem sido possível acompanhar sua evolução em nível global. Algumas dessas fontes energéticas renováveis encontraram um fértil e promissor solo na moderna conjuntura da economia global, como é o caso das centrais hidrelétricas, centrais eólicas, da

energia solar e dos biocombustíveis. Ater-se-á, nesta tese, somente aos biocombustíveis que podem ser, em essência, entendidos como alternativas aos combustíveis de origem fóssil e seus derivados e podem se apresentar como combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, geralmente obtidos pelo emprego ou transformação de matérias-primas consideradas renováveis, comumente definidas como biomassa. Essa categoria engloba variedades como plantas oleaginosas, biomassa florestal, culturas orgânicas, dentre outras, que podem ser renovadas em um curto prazo.

Desses biocombustíveis, a presente tese foi desenvolvida para aqueles que se apresentam em estado líquido, em princípio orientados para o emprego nos motores de combustão interna, e cuja fonte de matéria-prima implica no aproveitamento de recursos agrícolas, como terras cultiváveis e produtos de origem vegetal – a divisão destes biocombustíveis líquidos se dá, inicialmente, em Primeira Geração e Segunda Geração. Assim sendo, aqueles classificados como biocombustíveis da Primeira Geração são, como sua designação sugere, os combustíveis pioneiros na utilização de produtos vegetais como matéria-prima para a produção de energia de forma sustentável, sendo o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel seus mais destacados representantes (informação online)².

Em respeito a esses biocombustíveis, observa-se no Brasil sua evolução tecnológica e utilização. O país possui uma matriz energética munida, em boa medida, de fontes energéticas renováveis, sendo que sua maior parte é tida como limpa uma vez que advém da hidroeletricidade; por outro lado o país progride com avanços tecnológicos que proporcionam uma maior eficiência energética assim como um aumento no aproveitamento tanto de fontes tradicionais de energia, como o petróleo, quanto daquelas tidas como renováveis. No que tange os biocombustíveis líquidos, um sólido e bem sucedido exemplo foi o Programa Nacional do Álcool, ou Proálcool³, criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto nº 76.593, com o objetivo inicial de promover uma substituição em larga escala da gasolina de refinaria por etanol combustível proveniente da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) diante da crise do petróleo iniciada no ano de 1973. O Proálcool proporcionou um substancial progresso do setor sucroalcooleiro brasileiro e a cana-de-açúcar e seus derivados puderam, e ainda podem, ser tomados como uma das mais importantes fontes de energia primária da

² Material extraído do site Biodiesel BR: <<http://biodieselbr.com>> Acesso em 16.dez.2013.

³ O Proálcool foi um programa bem sucedido de substituição em larga escala de derivados de petróleo. Foi desenvolvido para evitar o aumento da dependência externa de divisas em relação aos choques de preço do petróleo. De 1975 a 2000, foram produzidos aproximadamente $5,6 \times 10^6$ de veículos movidos a Álcool Etílico Hidratado Carburante (AEHC). Ele substituiu por uma fração (entre 1,1% e 25%) de Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) o volume de gasolina pura consumida por uma frota superior a 10×10^6 de veículos movidos a gasolina, evitando, desta forma, emissões de dióxido de carbono (CO₂) da ordem de 110×10^6 ton. de carbono (contidos no CO₂), a importação de aproximadamente 550×10^6 de barris de petróleo.

matriz energética do país. A bem sucedida experiência brasileira tornou-se referência mundial dentro desse setor. Uma informação que ilustra a importância econômica do Proálcool pode ser observada em Goldemberg et al. (2004) indicando que entre os anos de 1975 e 2002, em decorrência do programa, o Brasil economizou bilhões em divisas com a produção de etanol combustível e sua utilização. Pode-se considerar que esse processo teve início com a adoção de subsídios aos já existentes produtos da cana-de-açúcar, incentivando a produção do biocombustível e, desde então, o país tem investido em pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia, aperfeiçoamento da cultura de cana-de-açúcar e melhores processos produtivos – o etanol combustível brasileiro atraiu a atenção internacional, consolidando todo um setor e proporcionando novas tecnologias.

Permanecendo no campo das inovações relativas aos biocombustíveis líquidos no Brasil, depois do etanol de cana-de-açúcar, o segundo biocombustível de maior relevância no cenário brasileiro é o biodiesel, cuja matéria-prima pode ser o óleo extraído de um vegetal oleaginoso. De semelhante forma, o biodiesel é um biocombustível que, ao ser utilizado, busca reduzir o emprego do diesel de refinaria na frota veicular brasileira, proporcionando também incentivos ao mercado produtor nacional e às medidas que buscam uma harmonização entre consumo energético e sustentabilidade ambiental. Assim como para o etanol, há também o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB). Por contar com uma relevante participação na matriz energética brasileira, o biodiesel se encontra em um estágio de intensa pesquisa e desenvolvimento. O PNPB também contribui de forma significativa em termos de ganho social por meio do Selo Combustível Social.

Os dois biocombustíveis líquidos aqui supracitados são apresentados como alternativas aos tradicionais combustíveis advindos da refinaria tradicional, porém não da forma ambiciosa – e irreal – como muito se especula onde é considerada a possibilidade de uma completa substituição de seus predecessores. Em verdade, busca-se (ou deveria ser buscado) um suporte ao abastecimento desses combustíveis de refinaria, cujo maior emprego é no setor de transportes. Há desafios de natureza diversa a serem observados em ambos os contextos, como por exemplo as barreiras tecnológicas associadas aos processos de conversão, oscilações mercadológicas, dilemas socioeconômicos como, por exemplo, o emprego de terras agriculturáveis uma vez destinadas para produção de alimentos serem realocadas para culturas vegetais destinadas a fins energéticos, dentre outros entraves que requerem a devida atenção ao se visar a otimização do que cada um dos biocombustíveis se propõe. O caminho científico que trilha por melhores condições de se produzir e empregar os biocombustíveis não se limita, unicamente, a aprimorar aqueles já existentes, como o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel.

Este caminho procura romper as limitações presentes em busca de novos combustíveis que, de semelhante forma, possam contribuir com o suporte às cadeias de biocombustíveis já estabelecidas. É nesse momento que são considerados os biocombustíveis pertencentes à chamada Segunda Geração. Estes possuem sensíveis diferenças quando comparados àqueles da Primeira Geração, diferenças estas que vão além da simples sucessão temporal. Apesar de também se proporem como alternativas aos tradicionais combustíveis líquidos oriundos da indústria de refino, esses biocombustíveis apresentam-se em um arcabouço mais complexo que seus antecessores e, em se tratando das questões energéticas, figuram entre os desafios presentes nas fronteiras tecnológicas do começo deste século. Biocombustíveis da Segunda Geração, são assim denominados por conciliarem os vetores de sustentabilidade adquiridos dos biocombustíveis da Primeira Geração com a tecnologia dos combustíveis sintéticos genericamente denominados XTL (BTL, CTL, GTL e WTL)⁴, variando sua denominação de acordo com a matéria-prima empregada em sua manufatura.

É importante que os conceitos fundamentais da tecnologia envolvida na rota *Biomass-to-Liquids* (BTL) sejam brevemente apresentados (ou revisados) para um melhor entendimento da metodologia que será apresentada no Capítulo 3. A começar pela matéria-prima, a biomassa lignocelulósica, que diferentemente do carvão mineral e do gás natural, é composta pelos polissacarídeos celulose ($C_5H_{10}O_5$) e hemiceluloses, pela macromolécula lignina, pelos diversos compostos orgânicos genericamente denominados de extrativos e também por minerais. Essa biomassa pode advir de resíduos florestais, madeira descartada pela construção civil ou indústrias de natureza diversa, florestas destinadas ao seu cultivo, dentre outras possibilidades. Os resíduos de madeira passam por um processo de pré-tratamento, ou seja, têm seu teor de umidade controlado para, posteriormente, ser submetidos a um gaseificador para o processo de gaseificação. Os processos de gaseificação, por sua vez, remontam os anos da Revolução Industrial, quando uma mistura de gases, composta majoritariamente de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), era utilizada como fonte de energia para iluminação e cocção. No decorrer das décadas, seus usos foram mudando e se adequando às necessidades de cada época; posteriormente, graças aos avanços tecnológicos, essa mistura de gases, denominada gás de síntese (do inglês *synthesis gas* ou simplesmente *syngas*), viria a ser utilizada como insumo no processo conhecido como síntese Fischer-Tropsch para a produção de hidrocarbonetos diversos, sendo advinda tanto do carvão mineral (CTL), quanto do gás natural (GTL), óleo pesado ou biomassa lignocelulósica.

⁴ Para detalhes, consultar o APÊNDICE A – INTRODUÇÃO AOS COMBUSTÍVEIS XTL.

Muitos são os estudos que abordam os processos de gaseificação, seus reatores (denominados gaseificadores), variáveis de processo e otimização, e graças ao relativamente recente advento dos desafios socioeconômicos e ambientais por fontes energéticas menos poluentes, as tecnologias de gaseificação têm encontrado, novamente, espaço na nova conjuntura econômica mundial. Dessa forma, pôde-se ter um panorama da cadeia produtiva do óleo diesel sintético, ou óleo diesel Fischer-Tropsch, advindo da biomassa lignocelulósica, um biocombustível da Segunda Geração, através da rota tecnológica conhecida como *Biomass-to-Liquids* – demonstrado de forma esquemática na figura (1.1), ao final.

A motivação desta pesquisa reside no estudo do dimensionamento de uma unidade produtiva BTL em território brasileiro – para fins desta tese, dimensionamento referir-se-á ao cálculo da capacidade nominal de produção (CP) de plantas que operem pelas rotas GTL e BTL buscando um tamanho mínimo para se beneficiarem da economia de escala ao se considerar a disponibilidade de matéria prima para tal, demonstrando o quão importante deve ser a análise de custos para a seleção dos programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que orbitam os avanços tecnológicos no campo dos biocombustíveis sintéticos.

1.1 Objetivo geral e objetivos específicos

Objetivou-se, nesta tese, analisar a influência da economia de escala em plantas que operem pela rota tecnológica *Biomass-to-Liquids* (BTL) para a produção de, em princípio, óleo diesel sintético no Brasil. Para tal, tem-se por objetivos específicos:

- a. Selecionar, adaptar e utilizar uma metodologia já existente para este fim, propondo-se um volume de produção ideal fundamentado nos princípios da economia de escala;
- b. Levantar a disponibilidade, em território brasileiro, de matéria-prima lignocelulósica na forma de resíduos florestais para aplicação numa planta BTL; e
- c. Promover a discussão entre as vantagens e desvantagens entre o óleo diesel sintético obtido pela rota BTL *versus* os biocombustíveis da Primeira Geração, destacando a importância da redução do enxofre em sua composição.

1.2 Estrutura capitular.

Esta tese divide-se em cinco capítulos, apresentados a seguir:

Capítulo 1.

Conforme visto, composto de uma introdução aos biocombustíveis da Segunda Geração, da motivação para a contribuição e realização desta tese e de seus objetivos.

Capítulo 2.

É feita uma revisão bibliográfica sobre a bioenergia, combustíveis e biocombustíveis dentro do cenário energético brasileiro, cujo foco é o óleo diesel de refinaria, seus principais impactos sócio-ambientais e as medidas necessárias acerca da melhoria do seu uso. Também é mencionado o conceito e exemplos para os chamados *designer fuels*.

Capítulo 3.

Será feita a escolha e atualização de uma metodologia para o dimensionamento de plantas BTL a partir de plantas GTL; é apresentada uma proposta de curva e fórmula que sugerem esse volume de produção mínimo, assim como uma indicação do custo aproximado do investimento. É feito também um levantamento sobre a oferta de biomassa lignocelulósica em forma de resíduos florestais e revisado o conceito de florestas energéticas.

Capítulo 4.

É apresentada, como exemplo, a CHOREN Industrietechnik GmbH, situada na Alemanha por esta ter sido a primeira planta a operar pela rota BTL no mundo. Ter-se-á seu histórico de operações e uma breve apresentação sobre os processos tecnológicos Carbo-V® e SMDS®, ambos empregados para a manufatura do óleo diesel sintético SunDiesel®, um *designer fuel*. Muitas das informações apresentadas foram obtidas através de fontes informais por intermédio de colaboradores e parte do conteúdo é considerado *off-the-records*.

Capítulo 5.

Frente aos aspectos pertinentes sobre os combustíveis e biocombustíveis no cenário brasileiro, os resultados obtidos no que diz respeito ao dimensionamento de plantas BTL e diante do exemplo da CHOREN Industrietechnik GmbH, são feitas considerações acerca dos biocombustíveis da Segunda Geração e os desafios de sua implementação no Brasil.

Figura 1.1 Rota tecnológica Biomass-to-Liquids BTL.

Fonte: (Elaboração própria).

2 REVISÃO SOBRE A BIOENERGIA

The need for energy and fuels is one of the common threads throughout history and is related to almost everything that man does or wishes to do.

(Donald L. Klass)

Nos últimos anos, muito tem sido considerado e até afirmado, às vezes sem certezas, por entidades de reconhecido renome ou de menor expressão, sobre o aproveitamento sistematizado das fontes energéticas chamadas de não-convencionais, batizadas de “verdes” por alguns meios de comunicação não especializados. As considerações acerca de tantos conceitos, alguns, já antigos, e outros, formulados nos últimos anos, nem sempre direcionam o entendimento das diversas comunidades globais para soluções economicamente viáveis, da forma menos danosa para o meio-ambiente, em nome do progresso social. Pode-se propor que exista uma tensão, positiva em essência, entre a tríade progresso, economia e meio-ambiente, sendo ela um propulsor cada vez mais presente na realidade energética do século XXI, tendo há muito extrapolado as esferas acadêmicas, políticas e governamentais, tornando-se assunto de interesse de diversas organizações, grupos prós e contras e também do cidadão comum que busca um maior entendimento sobre questões acerca do cotidiano que impacta sobre a sua vida.

Tem-se por objetivo prover um novo material para mais uma reflexão em torno das certezas e incertezas que a respeito do uso das fontes alternativas de energia que possam corroborar com o desenvolvimento da sociedade contemporânea cada vez mais demandante por energia, promovendo seu progresso sem, com isso, acarretar em uma degradação maior dos recursos naturais e que vem sendo foco de discussões e polêmicas por décadas. No decorrer do presente capítulo, alguns conceitos, muitos deles, atuais, serão, rapidamente, discutidos e servirão para um melhor entendimento e conseqüente reflexão, contribuindo para a concordância, ou discordância, quando, no quinto capítulo, forem apresentadas as considerações finais desta pesquisa a respeito da problemática que será apresentada e desenvolvida do decorrer deste, do terceiro e do quarto capítulo.

2.1 Combustíveis e biocombustíveis no Brasil

O Brasil, por contar com uma razoável variedade de climas, micro climas e uma imensa diversidade ambiental advinda da sua grande extensão territorial tem, em pontos geográficos, grandes vantagens agrícolas dadas as altas taxas de luminosidade e temperaturas médias anuais, isso ainda associada à grande disponibilidade hídrica e a uma regularidade de chuvas em muitas regiões que, segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), faz do Brasil um dos países com um enorme potencial para produção de energia renovável; entretanto, menos de um terço dessa área disponível é explorada – potencial esse próximo a $1,50 \times 10^6 \text{ km}^2$, sendo $0,90 \times 10^6 \text{ km}^2$ referentes às novas fronteiras e os outros $0,60 \times 10^6 \text{ km}^2$ referentes às terras de pastagens que poderiam ser convertidas em exploração agrícola no curto prazo (informação online)¹. Com o advento da economia “verde” e seu inegável impacto sobre o desenvolvimento do setor energético e industrial, e mesmo diante de limitações de natureza diversa, o país detém inúmeros sucessos e bons exemplos em prol do progresso considerado sustentável, como o Programa Nacional do Alcool e o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. Até o ano de 2007, segundo é apontado em Goldemberg, Coelho e Guardabassi (2008), a cana-de-açúcar e o milho foram as matérias primas mais utilizadas para produção do álcool etílico anidro combustível (AEAC), tendo o Brasil, juntamente com os Estados Unidos da América (EUA), manufaturado $35,40 \times 10^9 \text{ dm}^3$ – equivalente a 72% de toda a produção mundial. Diante de valores como esses, observou-se um crescimento do parque industrial, dado o incremento das plantas de produção dos biocombustíveis e também uma redução das divisas decorrente da redução da importação de combustíveis veiculares.

Um elemento fundamental para a avaliação do consumo dos combustíveis e, consequentemente, biocombustíveis, é a frota veicular de um país, dado o dinamismo do setor automobilístico e sua impactante pressão sobre o setor energético. A frota veicular brasileira, que consiste basicamente de carros de passeio, caminhões, ônibus e motocicletas, era de pouco mais de $9,30 \times 10^6$ veículos no começo dos anos da década de 1980, passando para $38,20 \times 10^6$ em janeiro de 2009 e estimativas do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) apontam que perto do ano 2020, a frota veicular brasileira atingirá a marca de

¹ Material extraído do website : <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em 06 de março de 2012.

48,70 x 10⁶ de veículos (informação online)². Muitos estudos buscam quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) advindos das emissões veiculares e assim demonstrar o impacto que o setor automobilístico possui no contexto energético e ambiental. No ano de 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) formulou e propôs o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que estabeleceu um cronograma visando a gradual redução da emissão de agentes poluentes, com ênfase em veículos leves. Tendo como exemplo as conquistas advindas de outros países, o PROCONVE buscou implementar procedimentos de melhorias industriais, segundo as necessidades brasileiras, visando promover o uso de combustíveis alternativos como suporte aos oriundos da petroquímica tradicional e proibindo a comercialização de veículos automotores não homologados de acordo com seus critérios. Tal iniciativa estabeleceu limites para as emissões de poluentes e material particulado (MP), implementando tecnologias que reduzissem o consumo de combustível, aumentassem a potência, aprimorassem o funcionamento dos motores de combustão interna, reduzindo também a emissão dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e dos hidrocarbonetos (HC) (informação online)³.

Conforme observado em Velásquez Arredondo (2009), uma vez que os motores de combustão interna vinham sendo aprimorados, tornando-se capazes de reduzir as emissões de poluentes e GEE, em um dado momento os combustíveis tornar-se-iam o foco desse processo tecnológico evolutivo; pode-se considerar que foi quando o etanol combustível passou a ser adicionado com sucesso na gasolina convencional, os teores de enxofre (S) no óleo diesel petroquímico começaram a ser reduzidos e o biodiesel passou a ser misturado no diesel automotivo em diferentes proporções. Os biocombustíveis podem ser utilizados como tal ou em misturas com os combustíveis petroquímicos como ocorre com a tecnologia *flexfuel*, no Brasil, onde a gasolina e o etanol combustível podem ser combinados (E0-E100) assim como, analogamente, acontece com o biodiesel, podendo o combustível ser utilizado misturado ou puro (B0-B100). Tanto para o etanol combustível quanto para o biodiesel, há uma gradual redução na emissão de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e material particulado diretamente proporcional à sua quantidade na mistura combustível; dadas as pequenas quantidades de fósforo (P) e enxofre (S) presentes no biodiesel, as emissões de SO_x (precursores de fenômenos climáticos como a chuva ácida) são desprezíveis, assim como a formação de compostos aromáticos. É válido destacar que as emissões de NO_x, no que diz

² Material extraído do website : <<http://www.denatran.gov.br>>. Acesso em 17 de junho de 2013.

³ Material extraído do website : <http://www.conpet.gov.br/download/pdf/economizar_diesel_saude.pdf>. Acesso em 30 de outubro de 2009.

respeito à utilização do biodiesel, não apresentam um comportamento definido pois, dependendo da origem dos óleos utilizados como matéria prima, elas podem ser mais elevadas quando comparadas às emitidas pelo óleo diesel de refinaria.

Uma vez que os biocombustíveis conquistaram uma sólida posição no cenário energético global, estudos que circundam seus processos produtivos, sua qualidade e aplicação, têm se tornado cada vez mais frequentes, contudo, de semelhante forma, entraves têm surgido no que diz respeito aos processos de manufatura e no emprego dos recursos naturais necessários para sua viabilização. De acordo com Kim e Dale (2005), o cultivo de vegetais para produção energética estimula a utilização de substâncias fertilizantes como nitratos e fosfatos, pesticidas e fungicidas, que provocam a acidificação dos solos e a contaminação de fontes de água. Considera-se que o maior desafio para a produção dos biocombustíveis da Primeira Geração seja a necessidade de terras agriculturáveis para o cultivo da matéria prima. Essa questão ainda se encontra na pauta de comunidades científicas e políticas ao redor do mundo, impactando na opinião pública quando em momentos de variação da balança comercial no que tange produtos alimentícios ou mesmo a alta nos preços dos combustíveis. Ressalta-se que o acelerado crescimento populacional é, de fato, um aspecto impactante no que compete ao mercado global de combustíveis. Em outubro de 2011, a população mundial ultrapassou a marca de $7,00 \times 10^9$ de habitantes; essa era de $1,00 \times 10^9$ em 1804 e algumas previsões apontam que ultrapassará a marca de $9,00 \times 10^9$ no ano de 2050.

Diante desse crescimento, do aumento do poder de consumo mundial e do crescente interesse por biocombustíveis, é cada vez mais evidente a disputa por terras agriculturáveis, mais evidente em países em desenvolvimento, intensificando as discussões sobre a competição com o mercado de alimentos. Em dezembro de 2011, a organização International Land Coalition (ILC)⁴ publicou o Land Rights and the Rush for Land, um abrangente documento sobre grandes aquisições de terra em países em desenvolvimento – este reúne 28 estudos de caso e análises regionais realizadas por 40 organizações distintas. O documento aponta que entre os anos de 2000 e 2010 foram vendidos (ou arrematados) aproximadamente $2,00 \times 10^6 \text{ km}^2$ de terras em países em desenvolvimento sendo que desse total, $0,71 \times 10^6 \text{ km}^2$ foram devidamente catalogados pelo estudo e que a maior parte, 40%, foi reservada para produção de biocombustíveis – em contrapartida, 27% dessas terras foram destinadas à

⁴ Essa organização originou-se de uma união de sociedades civis e agências internacionais a partir de uma conferência realizada em Bruxelas, Bélgica, em novembro de 1995, a qual mudaria sua denominação original para International Land Coalition (ILC) no ano de 2003, contando na época com 116 organizações que representam mais de 50 países, trabalhando para promover a adequada e segura distribuição de terras agriculturáveis entre agentes rurais.

mineração, turismo, indústria e silvicultura e somente 25% para a produção de alimentos; variando conforme as regiões, há hiatos mais expressivos como na África, onde 66% dos negócios envolvendo terras serão destinados à produção de biocombustíveis e apenas 15% à de alimentos. Esse é um dilema que acompanha o desenvolvimento dos biocombustíveis da Primeira Geração, uma vez que sua manufatura está diretamente e, por enquanto, indispensavelmente relacionada com o uso de terras agriculturáveis para o plantio de suas matérias-primas (informação online)⁵.

2.1.1 O óleo diesel brasileiro

O óleo diesel é um produto da refinaria tradicional, obtido pelo processo conhecido como destilação fracionada do óleo bruto, destilando até 300 °C em pressão atmosférica, constituído primordialmente por hidrocarbonetos contendo de 13 a 16 átomos de carbono (C) e contaminantes derivados do nitrogênio (N) e do enxofre (S) – este último representa o mais indesejável contaminante do combustível em decorrência da ação corrosiva de seus compostos, precursores de gases como os óxidos de enxofre (SO_x) que, além de tóxicos, são os precursores da chuva ácida. O combustível apresenta-se como uma mistura de diesel pesado, diesel leve, querosene e nafta, na forma de um líquido inflamável, tóxico, volátil e possuidor de odor característico, sendo uns dos combustíveis mais utilizados no mundo moderno. Segundo exposto em Duarte (2009), suas aplicações diferenciam sua classificação; de forma resumida, ela é dividida em:

- Óleo diesel automotivo, sendo subdividida em: óleo diesel interior, distribuído em cidades cuja frota veicular em circulação é grande e as condições geográficas e climáticas são desfavoráveis para a dispersão dos gases de combustão; extra diesel aditivado que é um combustível possuidor de aditivos que atuam como agentes detergentes e garantem uma proteção anticorrosiva no sistema de alimentação; e óleo diesel padrão, que é produzido unicamente para as montadoras de veículos automotivos movidos a óleo diesel para ser utilizado na homologação dos motores durante baterias de testes de desempenho e consumo;

- Óleo diesel marítimo, sendo subdividida em: óleo diesel marítimo comercial que é semelhante ao diesel convencional apresentando apenas um valor diferenciado para seu ponto

⁵ International Land Coalition (ILC). Material disponível no website: <<http://www.landcoalition.org>>. Acesso em 26 de maio de 2012.

de fulgor (60 °C ao invés de 38 °C, conforme Portaria nº 310 da ANP, de 27/12/2001); e óleo diesel especial para Marinha e Ártico, que é um combustível especial fabricado para atender às necessidades militares, apresentando características específicas para suportar condições adversas de embarcações marítimas sob baixas temperaturas.

No que diz respeito ao óleo diesel e conforme determinações do Departamento Nacional de Combustíveis (DNC), a Petrobras Distribuidora SA – Petróleo Brasileiro S/A classifica o combustível por ela distribuído em:

- “A” (diesel automotivo) comercializado no país até o ano de 1998, estando, atualmente, fora de linha de produção. Foi substituído pelo óleo diesel tipo “B”;
- “B” (diesel metropolitano) comercializado em todas as regiões metropolitanas do país;
- “C” (diesel metropolitano) comercializado no país de acordo com um programa que visava melhorar a qualidade do combustível; deixou de ser produzido no ano 2000; e
- “D” (diesel marítimo) especial para embarcações marítimas e uso militar.

Em concordância com dados publicados no ano 2011, pela empresa Petrobras – Petróleo Brasileiro S/A, o óleo diesel, empregado majoritariamente no transporte rodoviário de cargas, é o combustível automotor responsável pela maior parcela das emissões veiculares de dióxido de carbono (CO₂) no Brasil. O 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas Veiculares Automotores, em seu relatório final (janeiro de 2011), aponta que no ano de 2009, esse combustível representou 53% das emissões do setor de transporte rodoviário do país, seguido pela gasolina, com 26%; ainda é apontado que o óleo diesel deverá ser responsável por 49% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em 2020. Ainda sim, em se tratando da qualidade do óleo diesel brasileiro, no que tange suas emissões atmosféricas, este se encontra em concordância com as regulamentações da divisão responsável do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), do PROCONVE e suas especificações são pauta de discussões na ANP com os fabricantes de motores e autoridades ambientais. Deve-se ressaltar que os motores do ciclo diesel possuem maior eficiência quando comparados aos motores do ciclo Otto e, de tal forma, emitem menos GEE, porém as altas emissões registradas em 2009 decorrem do fato de que a matriz brasileira de transportes está centralizada no uso rodoviário (ressalta-se também a presença dos ônibus urbanos), nos quais, o óleo diesel é o combustível de maior demanda. Muito se infere sobre as possíveis medidas que poderiam mitigar as

emissões de GEE e poluentes, além da evidente utilização do biodiesel já em aplicação (informação online)⁶. Seriam, possivelmente, elas:

- uma progressiva renovação da frota de veículos automotores do ciclo diesel e a implementação de programas de inspeção e manutenção, assim com motores mais modernos e regulados; dessa forma, poder-se-á observar uma redução no consumo de combustível tal como nas emissões decorrentes desse consumo; e

- um uso racional dos combustíveis com políticas que combatam o desperdício frente aos recursos naturais não-renováveis e a consequente redução nas emissões de GEE e material particulado; para tal a Petrobras – Petróleo Brasileiro S/A fornece suporte administrativo e financeiro às atividades do Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), programa do Ministério de Minas e Energia (MME) criado pelo governo federal em 1991. Segundo estudos realizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2020, estimativas indicam que o setor de transporte rodoviário poderá emitir aproximadamente 60% a mais de dióxido de carbono (CO₂) do que o total emitido em 2009, podendo alcançar 270,00 x 10⁶ toneladas de dióxido de carbono (CO₂). Desse total de emissões em 2020, a maior parcela virá da frota de veículos pesados, como caminhões, com 36% e ônibus com 13%; automóveis e veículos movidos a gás natural veicular (GNV) serão responsáveis por 40% dessas emissões e 3% virão das motocicletas (informação online)⁷.

Em se tratando das emissões de poluentes, no passado, a qualidade do diesel brasileiro atingiu o nível crítico de 4,00 x 10³ ppm, *i.e.*, um óleo diesel contendo 4,00 x 10³ mg de enxofre (S) em cada litro de combustível, o que demandou a utilização do chamado diesel S-500 (500 ppm) nas regiões metropolitanas, resultando em uma diminuição da poluição atmosférica entre os anos de 2000 e 2004. Conforme definido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), entende-se por poluição atmosférica o fenômeno provocado pela alta concentração de uma substância ao ponto de torná-la imprópria – esta designar-se-á por poluente – incorrendo em inconvenientes ao bem estar público, à segurança da comunidade e também constituintes da fauna e da flora. Essa poluição atmosférica é mensurada segundo os níveis dos designados poluentes primários (advindos diretamente das fontes de emissão poluidora) e poluentes secundários (formados a partir das reações entre os poluentes primários e componentes naturais atmosféricos) e são classificados em compostos de nitrogênio (NO, NO₂, HNO₃ etc.); compostos orgânicos (alcoóis, aldeídos, cetonas etc.),

⁶ Material extraído do website : <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes#dióxido>>. Acesso em 14 de janeiro de 2013.

⁷ Material extraído do website: <<http://petrobras.com.br/pt/produtos/composicao-de-precos/>>. Acesso em 13 de março de 2012.

monóxido de carbono (CO); compostos halogenados (HCl, HF); metais pesados (chumbo, níquel etc.); oxidantes fotoquímicos (ozônio, propenal etc.); uma mistura de compostos em estado sólido e líquido, como poeira e fumaça, denominada material particulado (MP); e os componentes de enxofre (SO₂, SO₃, H₂S, tióis etc.). Especial atenção para os poluentes dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), emitidos principalmente em atividades de combustão, que, quando em reação química com o ar, podem formar material particulado, classificado como PTS (partículas totais em suspensão) cujo diâmetro aerodinâmico é inferior a 50µm; partículas inaláveis (MP₁₀), cujo diâmetro aerodinâmico pode ser de até 10µm; e também as partículas inaláveis finas (MP_{2,5}), com diâmetro aerodinâmico de até 2,5µm, sendo essas as mais nocivas dentre as mencionadas dada sua dimensão que a faz penetrar profundamente no sistema respiratório (informação online).⁸

Em entrevista para o jornal Valor Econômico, de 16 de agosto de 2010, o professor titular da Faculdade de Medicina (FM) da Universidade de São Paulo (USP), Dr. Paulo Hilário Saldiva, do Departamento de Patologia e coordenador de projetos de pesquisa em fisiopatologia pulmonar e toxicidade da poluição do ar por material particulado afirmou que, desconsiderando os demais poluentes atmosféricos, as emissões decorrentes da utilização do óleo diesel com altos teores de enxofre (S) causará aproximadamente 25,00 x 10³ mortes na capital paulista até o ano de 2030. Em 2010, em média, foram registradas 19 mortes por dia. De acordo com o Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da USP, coordenado pelo professor Saldiva, o custo anual dos agentes poluentes (enxofre e demais gases) lançados no ar da cidade de São Paulo gira em torno de US\$ 1,00 x 10⁹ – esse valor considera fatores como os gastos com internações hospitalares e mortes decorrentes de problemas de saúde. Outros dados tangem as regiões metropolitanas das cidades de Porto Alegre, Belo Horizonte, Curitiba, Recife e Rio de Janeiro, indicam que o impacto financeiro supera em duas vezes aquele calculado para a cidade de São Paulo (informação online)⁹.

É válido destacar que, em 2009, 40% da frota veicular a diesel circulante no Brasil possuía mais que 10 anos de utilização, acarretando em uma maior poluição por parte dos veículos mais antigos, veículos esses que, nas capitais, faziam uso do S-500 (500 ppm) e, em cidades do interior, do S-1800 (1800 ppm) – uma vez que os mesmos não incorporam e aproveitam tecnologias mais avançadas, como é o caso do diesel S-50 (50 ppm). Este, por sua vez, em 2009, era adotado nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e nas regiões

⁸ Material extraído do website: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/21-Poluentes%20#%20di%C3%B3xido>>. Acesso em 23 de dezembro de 2013.

⁹ Material extraído do website: <<http://www.valor.com.br/brasil/2850574/poluicao-mata-mais-que-aids-e-tuberculose-em-sp-diz-professor-da-usp>> Acesso em 12 de março de 2012.

metropolitanas de Fortaleza, Recife, Belém, Curitiba, Porto Alegre, Belo Horizonte, Salvador e região metropolitana de São Paulo, por ser menos poluente. No começo do ano 2011 foi a vez de outras três regiões metropolitanas do estado de São Paulo e da região metropolitana do Rio de Janeiro; e a partir de 2012 o diesel S-50 passou a ser fornecido em alguns postos em todo território nacional objetivando os motores com tecnologia P-7¹⁰.

A Petrobras, visando o melhoramento dos combustíveis veiculares, em especial, do óleo diesel, afirma ter investido cerca de US\$ 3,60 x 10⁹, no período compreendido entre os anos de 2000 a 2009, em unidades de tratamento para redução do teor de enxofre (S), justamente por este ser um dos mais preocupantes poluentes atmosféricos nas cidades, incorrendo em doenças respiratórias e acidificação das chuvas. Foi a partir do ano de 2012 que os veículos movidos a diesel, classificados como comerciais pesados, semi-pesados e também ônibus começaram a, obrigatoriamente, sair de fábrica equipados com a tecnologia de pós-tratamento de gases conhecida como Selective Catalytic Reduction-SCR, ou Redução Catalítica Seletiva, com motores adequados aos novos combustíveis, para redução das emissões de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) – comumente conhecidos como óxidos de nitrogênio ou NO_x (informação online)¹¹.

Os novos veículos pesados passaram a contar com a utilização de um agente redutor específico denominado Agente Redutor Líquido Automotivo, ARLA 32, também conhecido como AdBlue na Europa ou Diesel Exhaust Fluid, DEF, nos EUA, à base de uréia – nome comercial do composto orgânico diaminometanal (NH₂)₂CO. Esse agente não pode ser misturado ao óleo diesel e por isso os novos veículos são equipados com um tanque exclusivo, identificado por uma tampa azul que, durante seu funcionamento, injetam o ARLA32 na saída do escapamento dos gases de combustão, antes do catalisador, para neutralizar as emissões de NO_x. O ARLA 32 tem sido disponibilizado nas concessionárias de veículos pesados e principais redes de distribuição de combustível (informação online)¹².

¹⁰ A tecnologia P-7 é uma forma de controle da qualidade do ar em centros urbanos que consiste em uma adaptação às necessidades brasileiras de metodologias internacionais, em especial o EURO. O Proconve P-7 é a versão brasileira para o EURO 5, em vigor na Europa, representando a quinta etapa de diminuição progressiva de emissão de gases e que sucederá, aqui no Brasil, o P-5 (equivalente ao EURO 3). No Brasil, essa diminuição dos níveis de emissões atmosféricas tem sido implantada gradativamente através do Proconve, garantindo que os novos motores e veículos, nacionais e importados, estejam dentro dos limites de emissões permitidos – para tal essas emissões são testadas, quantificadas e comparadas com os limites estabelecidos. A sétima versão do Proconve observa uma significativa redução nos níveis de emissões permitidos para de veículos automotores pesados produzidos a partir de 1º de janeiro de 2012.

¹¹ Material extraído do website: <<http://fatosedados.blogspot.com.br/2011/02/11/diesel-combustivel-estadado>>. Acesso em 13 de março de 2012.

¹² Material extraído do website: <<http://brasil.air1.info/pt/all-about-adblue/what-is-adblue>>. Acesso em 17 de março de 2012.

Pôde-se observar as implicações inerentes à vasta utilização do óleo diesel de refinaria no cenário brasileiro: providências acerca dos teores de contaminantes precursores de poluentes atmosféricos; a utilização de misturas combustíveis com biocombustíveis que, por si só, já acarretam em suas próprias implicações sociais e ambientais alvo de debates; e a necessidade de mudanças estruturais mecânicas para se mitigar emissões atmosféricas. Esse cenário faz-se necessário devido a limitações advindas da própria natureza do combustível em questão. Frente à impossibilidade de uma substituição por uma fonte energética superior, muito tem sido feito para o avanço das tecnologias que orbitam os combustíveis veiculares. A seguir, revisar-se-á um relativamente recente conceito acerca da suposta próxima geração de combustíveis veiculares, os assim denominados *designer fuels*, que poderão se tornar uma satisfatória realidade em alguns anos.

2.2 Conceituando *Designer Fuel*

Alguns biocombustíveis parecem ser mais adequados para o uso presente, enquanto que alguns terão seu lugar em cenários de médio e longo prazo, dependendo de motores mais avançados que poderão requerer combustíveis de alta performance para um melhor desempenho.

(Desconhecido)

Uma possível solução para a redução das emissões atmosféricas, fazendo uso da mesma frota veicular atualmente disponível, seria a utilização de um tipo diferente de combustível. A empresa norte-americana Syntroleum Corporation, fundada em 1984 por Kenneth L. Agee, em Tulsa, EUA, desenvolve, há mais de 20 anos, pesquisas e comercialização de combustíveis sintéticos provenientes das rotas tecnológicas *Coal-to-Liquids* (CTL) e *Gas-to-Liquids* (GTL) e gerou o conceito do assim chamado *designer fuel* no qual um dos propósitos era o de permitir que motores do ciclo diesel atingissem os mesmos níveis de emissões atmosféricas dos carros a gasolina e fossem até 40% mais econômicos, sem a necessidade de modificações estruturais, mas partindo da utilização de um combustível aprimorado para possibilitar tais metas. Esse seria um tipo especial de combustível veicular

que pudesse ser modificado para melhor adequação ao motor no qual fosse empregado. Essa proposição pôde ser alcançada através da tecnologia conhecida como GTL, capaz de proporcionar um óleo diesel livre de enxofre (S), hidrocarbonetos aromáticos (BTX), metais pesados e atender aos padrões de emissões, propostos pela Environmental Protection Agency (EPA) para 2004, adotados no estado norte-americano da Califórnia. A empresa adaptou o processo de síntese Fischer-Tropsch, desenvolvido na Alemanha, na década de 1920, recebendo suporte financeiro do conglomerado automobilístico Daimler-Chrysler AG, para desenvolver um tipo de combustível líquido compatível com os motores do ciclo diesel. O combustível obtido pela empresa não requer que sejam realizadas adaptações mecânicas nos motores, como é o caso do gás natural ou das baterias elétricas, e pode ser utilizado em motores do ciclo diesel. O combustível foi licenciado para as empresas Texaco (que, posteriormente, se fundiria com a Chevron), Atlantic Richfield Company (ARCO) subsidiária da britânica Beyond Petroleum-BP, Marathon Oil, Kerr-McGee e a empresa texana Eron Corporation (informação online)¹³.

Em 1999, a Syntroleum Corporation, a pedido da Força Aérea Norte-Americana iniciou pesquisas para desenvolver um *designer fuel* que fosse capaz de auxiliar na redução da dependência do petróleo importado para os transportes aéreos. Aeronaves necessitam de um combustível de alta qualidade, com elevado número de octano – o que era obtido através da adição do não mais permitido chumbo tetraetila (CTE) – e aditivos que impedissem seu congelamento ou explosão em altas temperaturas, dentre outras exigências. A maior parte dos combustíveis destinados à aviação é derivada de hidrocarbonetos líquidos, como a gasolina ou o querosene – no caso de motores de ignição – ou o óleo diesel – no caso de motores por compressão – sendo os mais comuns a AvGas (do inglês, *Aviation Gasoline*) ou Gasolina de Aviação; o ATF ou JetFuel e o querosene de aviação (QAV). Em dezembro de 2006, o Boeing B-52 Stratofortress decolou da Base da Força Aérea Edwards, Califórnia, utilizando uma mistura de 50-50 de combustível de jato (JP-8) e diesel FT sintetizado pela Syntroleum Corporation. O voo, de sete horas, foi considerado bem sucedido e em 08 agosto de 2007, o Secretário das Forças Aéreas Norte-Americanas, Michael Wynne, certificou o *designer fuel*, finalizando formalmente esses testes, que são parte de um programa do Departamento de Defesa Norte-Americano (USDOD) para o desenvolvimento de fontes domésticas seguras de produção de energia para fins militares; outros testes pretendem verificar o desempenho da mistura de combustíveis nos aviões Rockwell B-1 Lancer e o Boeing C-17 Globemaster III.

¹³ Material extraído do website da Syntroleum ®. <<http://www.syntroleum.com/>> Acesso em 08 de abril de 2010.

Os experimentos bem sucedidos, no que tange o uso de mais de $400,00 \times 10^3 \text{ dm}^3$ de diesel sintético combinados com combustível de jato, proporcionaram à empresa o *know-how* necessário para o desenvolvimento do processo Bio-SynfiningTM, que consiste na utilização de uma variedade de matérias-primas renováveis como óleos vegetais, gorduras animais e gramíneas para a produção de um combustível sintético flexível, de acordo com sua origem e finalidade. Em junho de 2007, a Syntroleum Corporation e a corporação multinacional do ramo de alimentos, Tyson Foods Inc., em Springdale, EUA, criaram a *joint-venture* (50/50) Dynamic Fuels LLC objetivando a construção de um complexo industrial de síntese de biocombustíveis na cidade de Geismar, EUA, para a produção de óleo diesel sintético por ano e será a Tyson Foods a responsável pelo fornecimento da matéria-prima (biomassa moderna) para o processo (informação online)¹⁴.

A abrangência tecnológica para formulação de biocombustíveis sintéticos não se restringiu aos clássicos processos de síntese e, a partir do etanol combustível, foi possível a formulação de um *designer fuel*, batizado de SwiftFuel©, com um número de octano (NO) igual a 104, apto a ser utilizado, a princípio, em aeronaves e, posteriormente, em veículos rodoviários; esse combustível apresenta reduzidas emissões atmosféricas – importante destacar que sua matéria-prima é 100% biomassa –, de 15 a 20% mais energia por litro quando comparado aos combustíveis aeronáuticos oriundos da petroquímica tradicional e também ausência dos contaminantes advindos do enxofre e do chumbo.

A Swift Enterprises Ltd. é uma empresa química do ramo energético que atua no campo da propulsão, especializada em pesquisas com combustíveis aeroespaciais, foi fundada por John J. Rusek, e Mary Rusek (atual presidente) – sendo o primeiro, professor da Purdue University's School of Astronautics and Aeronautics Engineering, EUA. O professor Rusek também trabalhou na Base da Força Aérea Edwards (EDW), Califórnia, desenvolvendo projetos governamentais com propelentes para foguetes e atualmente lidera um grupo avançado em pesquisa em *designers fuels*. O combustível aeroespacial, denominado SwiftFuel©, foi apresentado em 28 de abril de 2008, em um encontro internacional para um comitê especializado em combustíveis de aviação, como sendo menos poluente e menos custoso se comparado aos combustíveis tradicionais utilizados em aeronaves não-militares.

¹⁴ Material extraído do website da Syntroleum ®. <<http://www.syntroleum.com/>> Acesso em 08 de abril de 2010.

Segundo Rusek, o novo combustível não deve ser confundido com outros biocombustíveis, como é o caso do E-85¹⁵, que não apresentaram desempenho significativo comparativamente com petróleo (informação online).¹⁶ O conceito envolvendo os *designer fuels* ainda não está firmado. Investimentos em P&D para o melhoramento dos combustíveis automotivos e também de aeroespaciais são esperados, buscando avanços em termos de rendimento, pureza e adequabilidade às estruturas mecânicas já existentes e assim produzindo combustíveis passíveis de melhorias de acordo com o propósito para o qual se designam. Como mencionado, as rotas CTL e GTL integram parte dessas pesquisas; um dos grandes desafios dentro do universo dos *designer fuels* será a rota BTL, ao associar a tecnologia dos combustíveis XTL com a vanguarda dos biocombustíveis. No terceiro e quarto capítulos, serão apresentados estudos que mostram a dimensão de investimentos financeiros, tempo, recursos naturais e tecnologias.

¹⁵ O E-85 é um combustível automotivo líquido cuja composição consiste em 85% de AEAC (Álcool Etilíco Anidro Combustível – $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) e 15% de gasolina pura, ou outro hidrocarboneto, em volume. É amplamente utilizado na Suécia e tem expandido seu mercado nos EUA, contando com mais de 1900 postos de abastecimento.

¹⁶ Material extraído do website da Swift Enterprises. <[http://www. swiftenterprises.net/Swift Fuel.html](http://www.swiftenterprises.net/Swift_Fuel.html)> Acesso em 12 de abril de 2010.

3 DIMENSIONAMENTO DE PLANTAS BIOMASS-TO-LIQUIDS: UMA PROPOSTA COM BASE NA METODOLOGIA DESENVOLVIDA POR BOERRIGTER

The economy of BTL plants is very dependent on the production scale and large-scale facilities are required to benefit from the economy of scale. Upon increasing plant sizes, the decrease in investments costs is much more significant than the increase in transport costs.

(Harold Boerrigter)

Após ter estabelecido políticas ambiciosas em se tratando dos combustíveis fósseis destinados ao uso veicular, a Comissão Europeia¹ vem concentrando esforços para atingir suas metas de, até o ano de 2020, substituir 10% de todos os combustíveis veiculares de origem fóssil por combustíveis alternativos e biocombustíveis em todos os países integrantes da União Europeia (UE). Estimava-se substituir essa parcela dos tradicionais combustíveis de refinaria pelos biocombustíveis da Primeira Geração, ou seja, o biodiesel e o álcool etílico combustível, seja este advindo da cana-de-açúcar, do milho ou de outro vegetal. O estudo *Sustainable Alternatives for Land-Based Biofuels in the European Union*², elaborado em Bruxelas, explora cenários de desenvolvimento sustentável para o setor de transportes, focando em tecnologias menos poluentes, como veículos elétricos e os biocombustíveis com menores impactos sociais e ambientais: os biocombustíveis da Segunda Geração, como o etanol celulósico (ceetol), ou etanol lignocelulósico, e o óleo diesel sintético, ou diesel Fischer-Tropsch (FT), este último obtido através da rota conhecida como *Biomass-to-Liquids* (BTL) (informação online)³.

¹ Comissão Europeia é uma instituição politicamente independente cujo objetivo reside na representação e defesa dos interesses da União Europeia (UE) perante o mundo globalizado. Suas atribuições incluem, além da legislação, políticas e programas de ações sociais e internacionais, sendo responsável por fazer valer as decisões tomadas pelo Parlamento Europeu (PE) e pelo Conselho da União Europeia (CUE).

² Estudo elaborado pelo instituto de investigação holandês CE Delft para as organizações não governamentais de ambiente europeias: Greenpeace, BirdLife Europe, European Environmental Bureau e Federação Europeia dos Transportes e Ambiente.

³ Material extraído da Proposta de Resolução do Parlamento Europeu <<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+MOTION+B6-2008-0215+0+DOC+XML+V0//PT>> e da Liga LPN<<http://www.lpn.pt/Homepage/Noticias/Comunicados-de-Imprensa/Announcements.aspx?tabid=2403&code=pt&ItemID=865>>. Acesso em 26 de dezembro de 2013.

Buscando o cumprimento das metas estabelecidas, a Comissão Européia contou com os recursos e o *know how* do Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), mais especificamente com a Unit ECN Biomass, Coal and Environmental Research, no que tange o óleo diesel FT, e que sob a coordenação do pesquisador holandês Harold Boerrigter, pesquisador no campo dos biocombustíveis Fischer-Tropsch e autor de diversos artigos de relevância dessa fronteira tecnológica, desenvolveu uma metodologia para o dimensionamento de plantas que operem pela rota BTL, visando a construção de unidades produtivas distribuídas pelo território europeu.

Em maio de 2006, Harold Boerrigter, especialista em tecnologias referente aos combustíveis e biocombustíveis sintéticos e também a síntese Fischer-Tropsch, apresentou sua metodologia para esse dimensionamento, sob o projeto documentado N° 7.5310, tendo o mesmo sido avaliado e aprovado por Jan Willem Erisman, da Faculty of Earth and Life Science da Vrije Universiteit, em Amsterdã, Holanda, que dirigiu o ECN⁴ e seus 90 pesquisadores até o ano de 2012, focando em pesquisas voltadas para o pré-tratamento de biomassa vegetal e tecnologias de conversão em insumos e produtos químicos. O dimensionamento proposto por Boerrigter e sua equipe mostrou-se primordial para o planejamento de unidades produtivas de complexos industriais que operam pela rota BTL e baseada nesses estudos, a presente pesquisa utilizou destas bases para a proposição de uma metodologia similar que busque o mesmo dimensionamento visando propor uma escala econômica “ótima” condizente com a realidade do Brasil, posicionando uma ou mais unidades de produção BTL em território nacional, considerando os recursos vegetais disponíveis.

3.1 Dimensionamento de plantas *Gas-to-Liquids* (GTL)

Primeiramente, é importante visualizar, separadamente, em uma unidade industrial que opere pela rota BTL, os principais estágios da sua cadeia produtiva, conforme indicado de forma esquemática na figura (3.1); assim, tem-se:

⁴ Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) é um dos maiores institutos de pesquisas energéticas de toda a Europa, possuindo destaque internacional em geração de conhecimento e tecnologias que viabilizem a transição para sistemas energéticos sustentáveis. A sede fica na cidade holandesa de Petten. O ECN também possui escritórios nas cidades holandesas de Amsterdam, Eindhoven, Wieringermeer e Bruxelas, na Bélgica.

(a) Todas as operações relacionadas à disponibilização da matéria-prima, seu adequado acondicionamento e preparo para utilização (verde);

(b) A transformação dessa matéria-prima em gás de síntese (*biosyngas*), sua limpeza e condicionamento, ou seja, a gaseificação da matéria lignocelulósica e a obtenção do *biosyngas* (vermelho); e

(c) A síntese Fischer-Tropsch, responsável pela conversão do *biosyngas* em hidrocarbonetos e o posterior beneficiamento do óleo diesel sintético obtido (azul).

Figura 3.1 Cadeia produtiva de uma típica planta *Biomass-to-Liquids*.

Fonte: (Adaptado de SWAIN, DAS e NAIK, 2011).

Informações disponíveis para estudos, como as tecnologias de pré-tratamento da matéria-prima (biomassa lignocelulósica) e a logística para seu transporte encontram-se disponíveis na literatura; já o entendimento da síntese Fischer-Tropsch⁵, é alvo de estudos científicos e práticos desde os anos de década de 1920, período de sua consolidação, sendo a maior parte de suas variáveis de processo dominada por empresas como a multinacional Royal Dutch Shell. Dessa forma, assume-se que o ponto principal de uma planta BTL, isto é, seu componente central e mais relevante, é o seu gaseificador de biomassa, elemento responsável pela tecnologia de conversão, capacidade produtiva e condições de operação do complexo produtivo de gás de síntese.

Contudo, as informações a respeito de custos de investimentos e operacionais para a construção de uma planta BTL, no que tange os três estágios supracitados, são escassas e, em

⁵ Para um entendimento inicial sobre o histórico e processos de conversão da tecnologia *Biomass-to-Liquids*, a bibliografia recomendada é a dissertação “Biomass-to-Liquids: Uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch” de autoria de Aires Duarte, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) da Universidade de São Paulo (USP) em 2009.

sua maioria, comumente baseadas em estudos acadêmicos e estimativas feitas sobre o custo individual dos equipamentos (*Purchased Equipment Costs-PEC*) – o que pode se mostrar impreciso uma vez que nem todos os componentes poderão estar inclusos na análise e os valores podem variar sensivelmente conforme a tecnologia escolhida. Entretanto, é válido ressaltar que apenas os componentes de produção e estruturas fabris não são suficientes para o cálculo dos custos em projetos como esse – esse assunto será abordado com mais detalhes adiante nesse capítulo. Há poucos anos, o modelo de gaseificador apontado como o mais adequado para a conversão da biomassa lignocelulósica em *biosyngas* foi o gaseificador pressurizado do tipo de arraste de escória (do inglês *pressurised oxygen-blown slagging entrained flow gasifier*)⁶ com a utilização do oxigênio (O₂) como agente gaseificador, como pode ser observado nos estudos realizados por Drift et al. (2004) no ECN.

Quando comparado aos gaseificadores mais comumente utilizados, os de leito fixo e leito fluidizado, o de leito de arraste de escória possui as maiores exigências em se tratando das propriedades físico-químicas da matéria-prima empregada, por isso torna-se relevante o conhecimento das características e homogeneidade da mesma. Em Drift et al. (2004), estudos apontam que essa tecnologia é responsável pela melhor conversão de combustível em gás de síntese de alta qualidade, dadas suas condições de operação nas quais as temperaturas variam entre 1200 e 1600 °C e as pressões situam-se entre 2 e 8 MPa, tornando suas condições de operação mais complexas que a dos demais gaseificadores e demandando o uso de oxigênio (O₂) como agente oxidante – o que acarreta em um encarecimento do processo ao ponto de poder comprometer sua viabilidade. Esse gaseificador se destaca pela sua alta taxa de conversão, minimizando a quantidade de contaminantes voláteis (presentes, principalmente, na casca dos vegetais lignocelulósicos), cinzas, alcatrão dentre outras substâncias.

Foi afirmado por Boerrigter (2006) que a economia da produção de combustíveis pela rota BTL é ainda muito dependente da produção em escala em grandes instalações e esta certamente beneficiar-se-á mais da redução dos custos de produção do que do acréscimo dos preços dos combustíveis da petroquímica tradicional – o que é um equívoco comum ponderar por essa linha de raciocínio. Assim, o custo de investimento de uma planta BTL, em função de sua escala, foi determinado por uma aproximação baseada em dados específicos referentes às plantas GTL que, mesmo não disponíveis para domínio público, foram obtidos de forma *off-the-records* para sustentar seus estudos que, infelizmente, carecem de fontes.

⁶ Para detalhes tecnológicos e operacionais sobre os diferentes modelos de gaseificadores e suas variáveis, a bibliografia indicada é Higman e Burgt (2008) e Steynberg e Dry (2004).

Em princípio é preciso observar a disposição de uma planta GTL⁷, figura (3.2), visto que o estudo em questão partiu de uma planta GTL, de forma simples e esquemática, focando nos principais componentes, para que assim se estabeleça o padrão comparativo que será utilizado adiante.

Figura 3.2 Típica planta *Gas-to-Liquids* (simplificada).

Fonte: (Adaptado de CALLARI, 2007).

O gás natural, após sua injeção no reformador, é convertido em gás de síntese bruto, o qual é extraído pela unidade de gaseificação, resfriado e condicionado – o que consiste em sua limpeza, ajuste da taxa de H₂/CO (comumente 2/1 respectivamente) e produção de hidrogênio (H₂) adicional para posterior hidrocrackeamento – para atender às especificações da síntese Fischer-Tropsch e majorar o rendimento dos produtos que normalmente são nafta – utilizada como importante insumo petroquímico – óleo diesel para transporte veicular e também hidrocarbonetos sólidos.

A partir do processo utilizado como modelo de partida, prossegue-se com a análise e eventual adaptação da metodologia, assumindo-se que, para fins dessa pesquisa, somente o óleo diesel sintético será objetivado como produto final. Alguns conceitos utilizados por Boerrigter em sua análise, serão destacados e revisados, uma vez que termos por ele empregados como *Inside Battery Limit* (ISBL) e *Outside Battery Limit* (OSBL), às vezes

⁷ Para mais detalhes sobre o processo Gas-to-Liquids e suas especificidades operacionais, a bibliografia indicada é Mokhatab e Poe (2012); e Gerosa (2007).

denominados como custos *onsite* e *offsite* respectivamente, não possuem uma definição universalmente aceita, podendo variar de entidade para entidade, principalmente nos primeiros estágios do planejamento de uma planta industrial em semelhança ao proposto, conforme destacado por Varraveto (2006), no 115th National Petrochemical & Refiners Association Annual Meeting (NPRA)⁸, ocorrido nos EUA, em 2007. Para a análise da metodologia e eventuais proposições, as definições envolvendo as parcelas que compõem os custos de capital serão baseadas na bibliografia escrita por Towler e Sinnott (2012); assim como nos conceitos apresentados por Barolo (2008) no *Workshop Process Simulation for Energy, Environment and Economy (PS-EEE)*⁹, em Trieste, Itália, 2008; e também contribuições de Varraveto (2006) e Bray (2007).

Quando uma nova unidade produtiva de BTL é planejada, o cálculo de seu custo total de investimento não deve ser baseado unicamente nos custos dos principais equipamentos demandados (PEC) para sua operação. Conforme expresso na equação (3.1) e sintetizado na (3.2), o Capital Total de Investimento (*Total Capital Investment*-TCI) é composto pelo Capital Fixo (*Fixed Capital Investment*-FCI) que representa os custos do projeto, construção, instalações e eventuais modificações necessárias para preparar a planta. O FCI consiste nos Custos Diretos (*Direct Costs*-DC) – formado pelo ISBL, o custo da planta em si; e pelo OSBL, que são as modificações e melhorias que devem ser realizadas na planta – e Custos Indiretos (*Indirect Costs*-IC) para construção da planta, somado ao Capital de Trabalho (*Working Capital*-WC) que nada mais é que o capital necessário para verter a planta em operação e finalmente somados aos Custos de Partida (*Sart-Up Costs*-StC) que, como corretamente sugere o nome, são os custos requeridos para que a planta seja inicializada pela primeira vez. (TOWLER; SINNOTT, 2012) (BAROLO, 2008) (BOERRIGTER, 2006).

$$TCI = [(ISBL+OSBL)+IC] + WC + StC \quad \text{Equação (3.1)}$$

$$TCI = FCI + WC + StC \quad \text{Equação (3.2)}$$

⁸ O National Petrochemical & Refiners Association Annual Meeting (NPRA) é o mais prestigiado encontro de refinarias e de manufatura petroquímica, reunindo executivos e técnicos de mais de 450 refinarias de todo o EUA: <<http://www.afpm.org>> Acesso em 13 de março de 2011.

⁹ O Process Simulation for Energy, Environment and Economy (PS-EEE) foi um evento promovido pelo International Centre for Science e Hight Technology (ICS) das Nações Unidas (ONU), o United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) na cidade de Trieste, Itália, em dezembro de 2008. <<http://www.ics.trieste.it/>> Acesso em 28 de março de 2011.

Boerrigter (2006) afirma que investimentos inerentes a projetos acerca de complexos industriais, como refinarias por exemplo, podem ser divididos primordialmente em duas partes distintas: ISBL, que se refere às unidades produtivas já existentes ou expansões das mesmas, com seus reatores, tubulações e demais estruturas produtivas; e OSBL que, de forma geral, consiste em todos os elementos de suporte, processos intermediários, alimentação do processo e armazenamento da matéria-prima, podendo o OSBL representar até 30% em alguns projetos. Contudo, essa divisão simplificada acarreta distorções uma vez que há uma imprecisão nos elementos classificados pelo pesquisador, como aqueles pertencentes ao ISBL e pertencentes ao OSBL, isso de acordo com Towler e Sinnott (2012). Ainda é relevante mencionar que o ISBL e OSBL formam apenas o DC do FCI, havendo a necessidade de se considerar também os IC – custos estes que, de forma não clara, foram imputados como “custos com fornecedores” no OSBL pela equipe de Boerrigter. Para fins deste estudo, e em consenso com Towler e Sinnott (2012), Varraveto (2006) e Bray (2007), os custos indiretos (IC) não serão incluídos no OSBL, em discordância com a metodologia descrita, e elementos pertencentes aos diferentes custos serão reclassificados adiante – embora não seja objeto desse estudo realizar uma revisão bibliográfica acerca de conceitos de custos de investimento, mostrar-se-á necessária uma breve revisão dedicada a alguns deles para um melhor entendimento. Em Towler e Sinnott (2012) e Barolo (2008) tem-se que:

A. Custo *onsite* ou *Inside Battery Limit* (ISBL) é aquele formado por:

A.1 Custos Diretos de Campo, compostos por:

- a. Todos os principais equipamentos do processo produtivo, como reatores, fornalhas, trocadores de calor, resfriadores, bombas, compressores, motores, ventiladores, turbinas, centrífugas, secadores, etc.;
- b. Sistemas de bombeamento e estruturas de tubos, estruturas de suporte, pintura, lubrificantes, solventes, etc.;
- c. Trabalhos civis como fundações, esgotos, valas, estradas, etc.; e
- d. Instalações elétricas.

A.2. Custos Indiretos de Campo, compostos por:

- a. Aluguéis de equipamentos para construção, estruturas provisórias de suporte e transporte, unidades temporárias de energia e água, etc.;

- b. Gastos com serviços de campo como refeitórios, gastos com serviços específicos, pagamentos de horas extras e adversidades advindas de mudanças climáticas;
- c. Seguro de construção;
- d. Benefícios trabalhistas e encargos como seguro social, por exemplo; e
- e. Itens gerais como comissão de agentes, custos legais, impostos de importação, gastos com fretes, taxas locais, pagamento de patentes ou *royalties*, etc.

Especial atenção deve ser dedicada à esta etapa do planejamento uma vez que outros custos associados ao projeto terão por base os valores apontados pelo ISBL.

B. Custo *offsite* ou *Outside Battery Limit* (OSBL) é aquele formado por:

- a. Subestações elétricas, transformadores e linhas de força;
- b. Motores de turbina, geradores de reserva;
- c. Aquecedores, dutos de condensação, planta de tratamento para abastecimento de água;
- d. Torres de resfriamento, destiladores de água, tratamento de efluentes, sistema de drenagem, esgotos;
- e. Unidades de separação de gases para fornecimento de nitrogênio (N₂), linhas de transporte de nitrogênio;
- f. Secadores e ventiladores, linhas de transporte de ar;
- g. Linha de tubos de abastecimento em geral;
- h. Unidades de carregamento de combustível, silos, docas, armazéns, estradas, elevadores de carga;
- i. Laboratórios e equipamento de análise;
- j. Escritórios, vestiários, sala de controle;
- k. Unidades de manutenção;
- l. Serviços de emergência, brigada de combate a incêndios, hidrantes, unidades de atendimento médico; e
- m. Serviços de segurança e vigilância.

Observa-se que o OSBL comporta os custos adicionais que possibilitarão a infraestrutura necessária para a acomodação de uma nova unidade produtiva ou para a expansão da planta já existente. Normalmente incluem contratos com fornecedoras de energia elétrica e água também. O OSBL costuma ser estimado de forma proporcional ao ISBL nos

primeiros estágios do planejamento, podendo assumir valores que variam de 20% a 50% do ISBL em se tratando de projetos típicos do setor químico ou então 40% se houver carência de detalhes – esses custos poderão ser menores em casos onde estruturas produtivas já existam, como as de complexos industriais desativados (os chamados *brownfield sites*) ou poderão ser maiores em casos onde uma planta completamente nova deverá ser construída (as chamadas *greenfield sites*). Boerrigter (2006) apresenta a equação (3.3), semelhante à equação (3.2), onde não constam os IC, WC e StC.

$$\text{TCI} = \text{ISBL} + \text{OSBL} + \text{OC}$$

Equação (3.3)

Em se tratando de calcular o TCI de uma típica planta GTL, Boerrigter e sua equipe afirmam que, dentre os custos dos principais equipamentos (ISBL), ou seja, os custos instalados do maquinário envolvido diretamente no processo produtivo, aquele que separadamente detém a maior parcela é a Unidade de Separação de Ar (*Air Separation Unit-ASU*), já observada na figura (3.3), e cuja participação nos custos de investimento será observada no gráfico (3.1), com 30% do total, necessária para a produção de oxigênio (O_2). Em seguida, tem-se os custos que envolvem a unidade produtiva propriamente dita do gás de síntese, ou seja, o reformador, que juntamente com a unidade de condicionamento de gás, representam mais 30% do ISBL, deixando 25% para o reator da síntese Fischer-Tropsch e 15% para a unidade de melhoramento (*upgrading*) do produto obtido (como já mencionado, para fins desse trabalho, considerar-se-á 100% de óleo diesel sintético por uma questão de simplificação somente). É válido notar que a unidade de produção de gás de síntese (nesse caso, o reformador de uma planta GTL,) não é a unidade mais dispendiosa da linha de produção, representando apenas 20% do total na distribuição dos custos de investimento.

Gráfico 3.1 Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 1.

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

Custo %	Componentes
30%	Unidade de Separação de Ar (ASU).
25%	Reator Fischer-Tropsch.
20%	Manufatura do Gás de Síntese.
15%	Unidade de melhoria do produto (<i>upgrading</i>).
10%	Unidade de manufatura do H ₂ + Condicionamento do Gás de Síntese.

Uma vez dispostas as porcentagens acima – segundo estudo publicado em 2006 – a seguir serão apresentadas sensíveis diferenças em relação às mesmas ao se considerar os dados apresentados por Arno de Klerk, da Universidade de Alberta, no Canadá, em um *workshop* da Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E), divisão do U.S. Department of Energy (DOE), em 13 de janeiro de 2012, em Houston, Texas, (em fase de

elaboração)¹⁰. No evento, Klerk atualizou os valores referentes à participação desses equipamentos na composição do TCI de uma típica planta GTL, conforme poderá ser observado no gráfico (3.2) a seguir:

Gráfico 3.2 Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 2.

Fonte: (Adaptado de ZENNARO et al., 2012).

Custo %	Componentes
24%	Reator Fischer-Tropsch.
20%	<u>Estruturas externas</u> (OSBL).
18%	Manufatura do Gás de Síntese.
16%	<u>Estruturas de suporte</u> .
08%	Unidade de Separação de Ar (ASU).
06%	Unidade de manufatura do H ₂ .
05%	Unidade de melhoria do produto (<i>upgrading</i>).
03%	<u>Unidade de tratamento de águas</u> (OSBL).

¹⁰ Dados e estudo de autoria de Arno de Klerk ainda sem data para publicação.

O gráfico (3.2) contempla, de uma só vez, tanto o ISBL (em azul), quanto o OSBL (em verde). É preciso separá-los com o intuito de realizar a equivalência comparativa entre o ISBL apresentado anteriormente e o que será apresentado adiante. Assim posto, os valores referentes às Estruturas externas, *offsites*, (20%) – pertencentes ao OSBL – e a Unidade de tratamento de águas (03%) – que, segundo Towler e Sinnott (2012) integram o OSBL – não serão consideradas para esta comparação; contudo, deve-se observar, em seu lugar, a inserção de uma nova informação: Estruturas de suporte (em vermelho), que estão compreendidas nos Custos Diretos de Campo (componentes do ISBL) e que não estavam contemplados na distribuição simplificada apresentada pelo gráfico (3.1) de forma correta. Realizando as correções proporcionais nas porcentagens e os devidos agrupamentos, pode-se observar a distribuição dos custos, nos moldes anteriormente apresentados, no gráfico (3.3) a seguir :

Gráfico 3.3 Agrupamento dos custos em uma típica planta GTL – Proposta 3.

Fonte: (Elaboração própria).

Custo %	Componentes
31,2%	Reator Fischer-Tropsch.
23,4%	Manufatura do Gás de Síntese.
20,8%	Estruturas de suporte (<i>Custos Diretos e Indiretos de Campo</i>).
10,4%	Unidade de Separação de Ar (ASU).
7,8%	Unidade de manufatura do H ₂ + Condicionamento do Gás de Síntese.
6,4%	Unidade de melhoria do produto (<i>upgrading</i>).

É possível observar uma considerável mudança na distribuição dos custos que compõem o ISBL de uma típica planta GTL (em azul), isso segundo os dados apresentados em Boerrigter (2006), quando comparados com as novas informações apresentadas por esta pesquisa, após modificação, conforme pode ser observado no gráfico (3.4) abaixo:

Gráfico 3.4 Comparação entre agrupamentos: Propostas 1 e 3.

Fonte: (Elaboração própria).

Com a atualização dos valores, tem-se a proposta de Boerrigter (em azul) e a nova proposta (em rosa), onde a unidade que detém separadamente a maior parcela dos custos é a unidade da síntese Fischer-Tropsch com 31,2%. Uma vez que é de conhecimento que o custo

da tecnologia FT é aquela de maior impacto na divisão do total, planos diretores poderão ser traçados para lidar com o mesmo, mitigando sua parcela talvez.

Prossegue-se com a segunda parcela dos custos que formam o FCI, ou seja, o OSBL (sem os IC), que incluem a aquisição do espaço territorial que virá a ser utilizado, a construção de unidades de apoio, melhoramentos no local das instalações e unidades de armazenamento e distribuição de matéria-prima. Esses custos foram calculados a partir dos custos do ISBL + 100% sobre esse valor – como já apontado por Towler e Sinnott (2012), esse valor pode variar, comumente, de 20% a 50% em típicos projetos do setor químico mas destaca que em se tratando de um *greenfield site*, ou seja, uma planta totalmente nova a ser construída, o valor poderá chegar até 100%, o que corrobora assertivamente com a porcentagem utilizada por Boerrigter ao estabelecer esse valor sobre o ISBL calculado, isso pois, essas plantas possuem inúmeras unidades auxiliares, como transporte e tratamento dos gases da ASU (oxigênio e nitrogênio), hidrocarbonetos gasosos e água (subprodutos do reator FT) demandando unidades auxiliares para o manuseio desses fluxos. Para fins desse estudo o valor mostra-se adequado uma vez que o Brasil não dispõe de nenhuma unidade GTL *brownfield* ou similar – complexo industrial já existente – para que estudos sejam realizados sobre seu aproveitamento na construção de uma planta BTL a partir dos mesmos.

Terminada a análise dos Custos Diretos (DC), que consistem na soma do ISBL e do OSBL, prosseguindo com o estudo das parcelas da equação (3.1) vista anteriormente, os Custos Indiretos (IC) representam (assim como os custos do OSBL) investimentos de capital não relacionados ao processo de manufatura e o último componente do *Fixed Capital Investment* (FCI). Assim, de acordo com Peters et al. (2003) apud Barolo (2008), os IC abrangem os custos de (a) manejo e supervisão (*engineering & supervision*); (b) despesas de construção e taxas de empreiteiro; (c) provisões para contingências; e (d) despesas legais, podendo os IC representar de 15% até 35% do FCI, indicando uma variação de 65% até 85% para os DC conforme ilustrado pelo gráfico (3.5) adiante, os DC (em azul) e IC (em laranja). Finalizada a análise do FCI e retomando a equação (3.1), parte-se agora para suas duas outras parcelas que a compõem, o WC e os StC que, segundo Barolo (2008), definem-se como:

(A) *Working Capital* (WC): É o capital empregado para colocar a planta em operação no primeiro mês de atividade, considerando-se a produção prevista para trinta dias e utilizando-se matéria prima para esse período inicial; desse capital sairá o montante para as contas e taxas a pagar, assim como o *cash on hand* para o pagamento de salários e aquisição da matéria prima. O WC pode representar de 10% até 20% do *Total Capital Investment* (TCI);

Gráfico 3.5 Composição simplificada do *Fixed Capital Investment* (FCI).

Fonte: (Elaboração própria).

(B) *Star-Up Costs* (StC): É o capital empregado para que a planta seja inicializada pela primeira vez, levando-se em consideração o trabalho necessário para tal, eventuais modificações no processo e também as perdas de produção. O StC pode ser calculado a partir do *Fixed Capital Investment* (FCI), variando de 8% até 10% do valor deste.

Boerrigter e sua equipe apresentam na equação (3.3), a seguir, sua proposta para o cálculo do TCI de uma típica planta GTL. Já na equação (3.4) é possível notá-la de forma mais detalhada, onde tem-se o TCI como resultado da soma do *Engineering, Procurement and Contracting* (EPC) – composto pela soma do ISBL com o OSBL – com o *Owner's Cost* (OC), custos que serão arcados pelos proprietários, como (a) gastos com pesquisa e desenvolvimento (Pesquisa e Desenvolvimento P&D) licenças, taxas e contingência; (b) inventários, salários e (c) gastos com perdas de produção – estes procurando contemplar ao mesmo tempo o *Working Capital* e os *Start-UP Costs*.

$$TCI = EPC + OC \quad \text{Equação (3.3)}$$

$$TCI = [(ISBL+OSBL)] + OC \quad \text{Equação (3.4)}$$

A participação percentual de cada componente do ISBL, previamente indicada no gráfico (3.3), foi tomada na forma de valores adimensionais por Boerrigter, totalizando 100 unidades (equivalentes a 100%). As considerações vindouras terão como base os valores estabelecidos nesse momento, tendo o ISBL como ponto de partida, sendo utilizadas para o prosseguimento da análise. Assim, a partir da equação (3.4), observar-se-á que o OSBL equivalerá a 100% do ISBL, conforme explicitado anteriormente, e em relação aos OC, estes foram calculados a partir do EPC, correspondendo a 20% do valor encontrado para o mesmo. Dessa forma, tem-se a equação (3.5) a seguir:

$$TCI = [(ISBL)+(1,00 \times ISBL)] + 0,20 \times EPC \quad \text{Equação (3.5)}$$

Aplicando-se a didática de valores adimensionais, Boerrigter e sua equipe obtiveram um resultado igual a 240 unidades conforme indicado a seguir:

$$TCI = [(100)+(1,00 \times 100)] + 0,20 \times EPC \quad \text{Equação (3.6)}$$

$$TCI = (200) + 0,20 \times 200 \quad \text{Equação (3.7)}$$

$$TCI = 240 \quad \text{Equação (3.8)}$$

Porém, como o estudo se mostrou deficiente na composição do TCI, foi preciso atualizá-lo de forma a contemplar os IC e porcentagens corrigidas para suas parcelas. Adotar-se-á uma postura conservadora em relação à variação das porcentagens dos elementos que compõe o TCI, buscando dessa forma manter a maior parcela dos custos ainda relacionada aos principais equipamentos e estruturas que compõe o ISBL e OSBL – ainda mais dentro da realidade brasileira que não contempla estruturas já existentes, sendo preciso se considerar a possibilidade de uma planta inteiramente nova (*greenfield site*) – assim, para o IC será tomada a porcentagem de 15% para a participação no total do FCI; uma porcentagem de 08% sobre o FCI para os StC e uma porcentagem de 10% para a participação do WC no TCI. Procedendo de acordo com a equação (3.1) e os valores vistos até agora, tem-se:

$$TCI = FCI + WC + StC \quad \text{Equação (3.9)}$$

$$TCI = [(DC) + IC] + WC + StC \quad \text{Equação (3.10)}$$

$$TCI = [(ISBL + 1,00 \times ISBL) + IC] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.12)}$$

$$TCI = [(100 + 1,00 \times 100) + IC] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.13)}$$

$$TCI = [200 + IC] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.14)}$$

85%FCI 15%FCI

$$TCI = [200 + 35] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.15)}$$

$$TCI = [235] + WC + 0,08 \times 235 \quad \text{Equação (3.16)}$$

$$TCI = 235 + 18,8 + WC \quad \text{Equação (3.17)}$$

$$TCI = 253,8 + WC \quad \text{Equação (3.18)}$$

90%TCI 10%TCI

$$TCI = 253,8 + 28,2 \rightarrow TCI = 282 \quad \text{Equação (3.19)}$$

Observa-se então que, quando comparadas, as equações (3.8) e (3.19) nos mostram valores distintos para o cálculo do TCI: os valores do FCI (para esta análise) e do EPC (para estudo de Boerrigter) apresentaram valores distintos, respectivamente 282 e 240, pois fez-se necessário considerar os IC e os StC, conforme observado na bibliografia. Os valores até aqui obtidos serão aplicados adiante para a estimativa do TCI de plantas BTL. É válido destacar que, dependendo de escolhas nas participações observadas nos IC, StC e WC – custos extras às principais estruturas que compõe o OSBL e ISBL – os valores para o cálculo do TCI de uma típica planta GTL, conforme apresentados neste estudo, podem ser de até 65% superiores. Prosseguir-se-á com o cálculo do TCI porém abordando mais uma variável: a escala das plantas GTL, cujo principal objetivo é a verificação do momento onde a expansão

da capacidade produtiva do complexo industrial provoca um aumento na quantidade produzida sem que esse aumento seja diretamente proporcional no custo da produção. Essa economia representa os ganhos que as organizações conquistam com o aumento da sua capacidade produtiva, dessa forma, aumenta-se o nível de produção e os custos fixos são diluídos por uma quantidade maior de unidades produzidas, baixando assim o custo médio da produção. De semelhante forma como as definições de ISBL e OSBL foram tratadas, não é objetivo deste estudo realizar uma revisão bibliográfica no que tange a economia de escala, entretanto uma breve definição se faz necessária. Conforme definido por Eaton e Eaton (1999) apud Araújo e Pinho (2004), economia de escala são reduções no custo médio de um produto ocasionadas pelo aumento da escala de produção, ou seja, da capacidade produtiva daquela indústria. De forma simplificada, a obtenção de rendimentos crescentes de escala ocorre quando a ampliação da capacidade produtiva em relação aos insumos $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ atende à seguinte condição, onde F é a função da produção: $F(az_1, az_2, az_3, \dots, az_n) > aF(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$, para um a não nulo e maior que 1 (um). Dessa forma, para que produção cresça a vezes não é necessário que a quantidade dos insumos (z_n) utilizados aumente de forma diretamente proporcional, bastando um aumento de ordem inferior. Assim, como consta em Boerrigter (2006), é possível observar adiante, no gráfico (3.6), a forte dependência do TCI, expresso em unidades monetárias da ordem de US\$ $1,0 \times 10^3$ para cada barril (bbl) por dia (bpd) – do inglês *barrels by day* (bbd), medida de petróleo líquido que equivale a 158,98 L (EUA) ou 159,11 L (CE) –, em relação à capacidade produtiva de uma planta GTL, expressa em 10^3 bpd, variando de $1,00 \times 10^3$ bpd a $100,00 \times 10^3$ bpd.

Gráfico 3.6 Relação entre TCI versus Escala de Produção para plantas GTL

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

No gráfico (3.6) o ponto em branco, equivalente a uma capacidade produtiva de $32,40 \times 10^3$ bpd¹¹, representa a planta GTL que foi utilizada como referência por Boerrigter e sua equipe: a ORYX GTL, figura (3.4), a seguir, localizada na Cidade Industrial de Ras Laffan, administrada pela Qatar Petroleum (QP), no Qatar, Península Arábica, com 51% de participação e também pertencente às companhias petroquímicas Sasol Limited e Chevron Corporation, juntas com 49% de participação – a planta destina-se à produção de hidrocarbonetos líquidos e outros produtos químicos de utilização na indústria petroquímica, principalmente o óleo diesel FT, às vezes denotado como óleo diesel GTL.

Figura 3.3 Planta Oryx GTL, Ras Laffan, Qatar.

Fonte: (Gas to Liquids 201) (informação online)¹².

A capacidade nominal de produção da ORYX GTL é de $34,00 \times 10^3$ bpd, tendo em 2006, a data de realização do estudo, seu EPC (ISBL+OSBL) equivalente a US\$ $0,95 \times 10^9$ e seu TCI equivalente a US\$ 1.15×10^9 (ou $\approx$ US\$ 33.824 bpd^{-1}) – valores diferentes daqueles adotados em Boerrigter (2006). Essa planta, aqui mantida como referencial, servirá como uma base para estimativas do TCI de plantas BTL de diferentes escalas no decorrer desta metodologia. Para plantas cujas escalas forem inferiores a valores de $20,00 \times 10^3$ bpd, o TCI aumentará rapidamente, fazendo com que as plantas GTL dessa magnitude não sejam, via de regra, atrativas economicamente, como pôde ser observado no gráfico (3.6) anteriormente.

¹¹ Em relação à capacidade nominal de produção de outras plantas GTL, consultar a Tabela A.1 – Plantas XTL em atividade no APÊNDICE A – INTRODUÇÃO AOS COMBUSTÍVEIS XTL.

¹² Gas to Liquids 201. <<http://communities.gas-to-liquids.co.uk/2012/09>> Acesso em 17 de novembro de 2012.

Em Boerrigter (2006) é feita uma comparação entre a planta ORYX GTL e a planta de Escravos GTL (EGTL), figura (3.5), adiante, localizada na região de Escravos, próximo ao delta do rio Níger, na Nigéria, África, administrada igualmente pelas petroquímicas Sasol Limited e Chevron Nigeria Limited (CNL), a primeira com 75% de participação, em parceria com a Nigerian National Petroleum Company (NNPC), e a segunda com 25% de participação. Sua capacidade nominal é de $32,4 \times 10^3$ bpd. Enquanto suas capacidades produtivas nominais se aproximam, seus custos se distanciam. Para a planta Escravos GTL, Boerrigter (2006) apresenta um TCI de US\$ $2,0 \times 10^9$, um valor quase que 74% superior ao TCI da planta ORYX GTL no ano de 2006 – data da publicação de seu estudo.

Figura 3.4 Planta Escravos GTL, Escravos, Nigéria, África.

Fonte: (Gas to Liquids 201) (informação online)¹³.

É afirmado por Boerrigter que parte desta diferença se dá pela primeira planta ser um complexo industrial do tipo *brownfield*, já a EGTL, um complexo industrial do tipo *greenfield*, ou seja, construído a partir do zero, sem nenhum infra-estrutura pré-existente que pudesse ser utilizada como ponto de partida – o que é o mesmo caso do Brasil, objeto de interesse desse estudo, e que será abordado mais adiante. Contudo, no ano de 2011, somente 76% da planta EGTL estavam, de fato, concluídos, postergando o início de suas operações para o ano de 2013 (previsão), ao invés de 2012 conforme havia sido planejado.

¹³ Gas to Liquids 201. <<http://communities.gas-to-liquids.co.uk/2012/09>> Acesso em 17 de novembro de 2012.

Desta forma, segundo a empresa Sasol Limited¹², o TCI da EGTL foi inicialmente estimado em US\$ $1,7 \times 10^9$, tendo chegado em US\$ $5,9 \times 10^9$ e, após atrasos e significativos aumentos nos ISBL e OSBL, novos estudos indicam que esse TCI já é de US\$ $8,4 \times 10^9$ – um valor quase cinco vezes superior ao que fora primeiramente calculado. Como já mencionado, tanto a ORYX GTL quanto a EGTL possuem capacidades produtivas nominais próximas, $34,00 \times 10^3$ bpd e $32,40 \times 10^3$ bpd respectivamente, fazendo com que ambas se beneficiem da economia de escala apresentada no gráfico (3.6). Em Boerrigter (2006), é apresentada uma relação entre a capacidade produtiva das plantas GTL (bpd) e um fator de escala (FE) que representa a variação que se pode esperar nos custos (EPC) como resultado dos acréscimos ou decréscimos no uso dos insumos de produção $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ mencionados anteriormente. O fator de escala pode ser entendido, segundo Koch et al. (1996), como o expoente que indicará o dimensionamento (para mais ou para menos) de um modelo simplificado (neste caso, uma planta em escala piloto) para outros de maior proporção (neste caso, uma planta em escala comercial). Uma planta piloto consiste em um pequeno sistema industrial operado para gerar informações, em escala reduzida, de uma planta comercial. São utilizadas na análise de risco de projetos para a mitigação dos riscos associados, podendo também ser utilizadas para o treinamento de pessoal e estudos de aspectos diversos do complexo a ser construído. A relação proposta pode ser observada a seguir:

Fator de Escala (FE)	Variação da Capacidade Produtiva (bpd)
0,50	De $1,00 \times 10^3$ até $5,00 \times 10^3$
0,60	De $5,00 \times 10^3$ até $20,00 \times 10^3$
0,70	De $20,00 \times 10^3$ até $60,00 \times 10^3$
0,90	De $60,00 \times 10^3$ até $100,00 \times 10^3$

Boerrigter (2006) não apresenta dados para o cálculo dos fatores de escala presentes em sua metodologia, porém mesmo com poucos pontos empregados foi possível posicionar os diferentes valores para os FE em relação à capacidade produtiva (CP), fornecidos em seu estudo, em um plano cartesiano, e assim relacioná-los com uma gama maior de capacidades de produção (bpd), tornando possível a construção do gráfico (3.7), adiante, onde observa-se a curva $f(x)$ que descreve essa relação expandida, variando ela de $1,00 \times 10^3$ até $100,00 \times 10^3$ bpd, nas ordenadas, e de 0,50 até 1,00, para o Fator de Escala (FE), nas abscissas. Tem-se o primeiro ponto em vermelho como a indicação de um FE=0,70 e o segundo de um FE=0,90, sendo esse primeiro o mais relevante tomado pelo estudo realizado em 2006, conforme será

abordado mais adiante. A área do gráfico preenchida com a cor verde compreende os valores de capacidade de produção que, segundo Boerrigter (2006), não são atrativos para investimentos, isso porque, uma produção que varie de $1,00 \times 10^3$ até $20,00 \times 10^3$ bpd não se beneficia da produção em escala, conforme observado anteriormente no gráfico (3.6), por desta forma apresentar um TCI muito alto, tornando o projeto pouco atrativo em termos financeiros – isso, ao se tomar como modelo de partida a planta ORYX GTL, como já mencionado. Para valores superiores a $20,00 \times 10^3$ bpd, tem-se uma maior atratividade em termos de investimentos, o que equivale a um FE maior ou igual a 0,70 – por sua vez, a capacidade de produção de $20,00 \times 10^3$ bpd foi escolhida por Boerrigter e sua equipe por sinalizar, para seus propósitos, a capacidade de produção mínima a ser adotada; esse valor pode ser diferente no caso de uma nova planta ser tomada como modelo. Em seu estudo metodológico, Boerrigter considera que fatores de escala iguais a 0,50 ou mesmo 0,60 são adequados para plantas GTL de pequeno porte, da mesma forma, também considera que para os valores de produção superiores a $100,00 \times 10^3$ bpd, o TCI específico se torna praticamente independente do mesmo. A área de interesse da curva está compreendida entre os pontos em vermelho, indicando a região que será utilizada para o cálculo de outros fatores de escala.

Gráfico 3.7 Capacidade de Produção *versus* Fator de Escala (FE) segundo Boerrigter.

Fonte: (Elaboração própria).

Através do *software* Microsoft Excel 2007, partindo-se do gráfico (3.7), foi possível encontrar a função que mais se aproxima da curva acima descrita na forma de uma função polinomial de quarta ordem¹⁴. Pela função $f(x)$, em azul, pôde-se construir uma curva, em rosa, que se aproxime e descreva o comportamento do FE proposto em Boerrigter (2006), dentro da área de interesse para esse estudo, delimitada pelos pontos vermelhos que indicam capacidades de produção compreendidas entre $20,00 \times 10^3$ bpd e $60,00 \times 10^3$ bpd, podendo a curva ser contemplada a seguir no gráfico (3.8), fornecendo um meio para se calcular valores mais precisos do FE, não apresentados por Boerrigter – valores esses que podem ser conferidos na tabela (3.1) adiante.

Gráfico 3.8 Capacidade de Produção *versus* Fator de Escala (FE) - Ampliada.

Fonte: (Elaboração própria).

¹⁴ A função encontra-se no APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO.

Tabela 3.1 – Relação entre Fator de Escala (FE) e Capacidade de Produção (CP).

Fonte: (Elaboração própria).

FE	CP (bpd)	FE	CP (bpd)
0,69	18.327	0,80	37.600
0,70	20.000	0,81	39.496
0,71	21.690	0,82	41.439
0,72	23.394	0,83	43.439
0,73	25.112	0,84	45.505
0,74	26.842	0,85	47.648
0,75	28.586	0,86	49.882
0,76	30.345	0,87	52.219
0,77	32.121	0,88	54.674
0,78	33.919	0,89	57.262
0,79	35.743	0,90	60.000

Com o auxílio da tabela (3.1) pode-se precisar um FE mais adequado de acordo com a capacidade produtiva desejada – para esse estudo, em concordância com Boerrigter (2006), será uma capacidade produtiva de $34,00 \times 10^3$ bpd. Uma vez expostos os meios, devidamente corrigidos, de se estimar o cálculo do TCI e o FE para plantas que operem pela rota GTL, adiante essas informações serão utilizadas para o cálculo dos mesmos parâmetros, porém para plantas que operem pela rota BTL que, como proposto em Boerrigter (2006), é possível fazê-lo partindo-se dos complexos industriais do tipo GTL.

3.2 Dimensionamento de plantas *Biomass-to-Liquids* (BTL)

Algumas considerações básicas necessitam ser feitas nesse estágio da pesquisa para a continuidade da metodologia. Uma planta que opere pela rota *Gas to Liquids* (GTL), esquematizada na figura (3.6) adiante, difere primordialmente de uma que opere pela rota *Biomass to Liquids* (BTL), esquematizada na figura (3.7) adiante, pela sua matéria prima, sendo a biomassa lignocelulósica (adotada para essa pesquisa) empregada no lugar do gás natural, impactando em diferentes áreas do processo produtivo do gás de síntese ou *syngas*, ou ainda, no caso da rota BTL, o *biosyngas*. O processo GTL beneficia-se da natureza de sua matéria prima uma vez que a composição da mesma é plenamente conhecida; essa rota não

necessita converter a matéria prima empregada para o estado gasoso, diferentemente da rota CTL, sua predecessora, o que caracteriza, por si só, já um desafio tecnológico e econômico para o processo. De semelhante forma como acontece com o carvão, a conversão da biomassa lignocelulósica em gás de síntese se dá pela utilização de um gaseificador que, nesse exemplo, é do tipo leito de arraste (*entrained flow*) e que consiste em um processo mais complexo que aqueles empregados na conversão de gás natural – e são tipicamente mais caros também. Boerrigter (2006) aponta ainda que, para uma mesma quantidade de gás de síntese produzido, a gaseificação da biomassa necessita 50% mais oxigênio que o gás natural, implicando em Unidades de Separação de Ar (ASU) cuja capacidade produtiva seja 50% maior. É importante destacar que, segundo Drift et al. (2004) e Öhrman et al. (2013), a opção pelo emprego de oxigênio, ao invés de ar, é a escolha tecnológica que apresenta um melhor rendimento em termos de produção de gás de síntese (*biosyngas*), contudo, como já mencionado, acarreta em custos mais elevados. Ainda em se tratando da rota BTL, uma das diferenças mais relevantes a ser observada é a alta quantidade de substâncias tidas como impurezas que estão presentes na biomassa lignocelulósica: uma extensa gama de compostos orgânicos pode ser encontrada principalmente na casca dos vegetais lenhosos: são os extrativos que compõem-se de resinas, alcoóis, ceras, terpenos, ácidos graxos, fenóis, taninos, flavonóides, lignanas, quinonas dentre muitos outros, o que aumenta significativamente a quantidade de compostos voláteis no *biosyngas* e também nas cinzas geradas pelo processo de degradação térmica. Por esse motivo torna-se importante um maior cuidado com o processo de limpeza desse gás de síntese, demandando uma unidade adicional para tal. Nesse caso, a unidade proposta por Boerrigter e sua equipe é a unidade Rectisol ®.

Figura 3.5 Linha de produção esquemática de uma planta GTL.

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

Figura 3.6 Linha de produção esquemática de uma planta BTL.

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

Rectisol ® é um processo de limpeza e condicionamento de gás de síntese, criado em 1955 pela empresa alemã Lurgi GmbH, que em um único estágio consiste na redução de gases contaminantes como o dióxido de carbono (CO_2), o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o ácido cianídrico (HCN), fumos e outros gases indesejáveis, principalmente aqueles compostos de enxofre como os tiofenos, tióis, sulfidos dentre outros. Durante as últimas décadas, mostrou-se de ampla aplicação em produções em larga escala de amônia (NH_3) e em complexos industriais que façam uso da tecnologia Fischer-Tropsch, tendo seu uso se expandido para quase todas as linhas de produção de amônia, metanol, hidrogênio e líquidos sintéticos advindos de processos de gaseificação; dados de 2004 apontam que 90% de todo o gás de síntese (*syngas*) empregado em processos de síntese como o CTL e o BTL são purificados pelo Rectisol ®¹⁵ (informação online)¹⁶.

Segundo a proposição feita por Boerrigter, os investimentos necessários para o cálculo do Capital Total de Investimento (*Total Capital Investment-TCI*) de uma típica planta BTL podem ser dispostos a seguir, em termos do *Inside Battery Limit* (ISBL), como em uma planta GTL, e da mesma forma que foi feito no gráfico (3.1), far-se-á no gráfico (3.9) adiante. Deve-se observar a inclusão da unidade Rectisol ® (em vermelho) – o que já implica em um aumento do ISBL, impactando diretamente nos custos do processo produtivo – e também observar que, de acordo com Boerrigter (2006), tanto o custo da Unidade de Separação de Ar (ASU) quanto do gaseificador (*entrained flow*), quando comparados com os componentes de

¹⁵ Para detalhes técnicos sobre a tecnologia Rectisol ® a bibliografia recomendada é o manual “The Rectisol ® Process” da Lurgi GmbH e o manual “Acid Gas Removal by the Rectisol ® Wash Process” de Niles Mangukia, da Lind Engineering India Pvt Ltd.

¹⁶ The Rectisol ® Process. <<http://lurgi.com/website/Home.106.0.html?L=1>> Acesso em 20 de março de 2012.

uma típica planta GTL, aqui são apresentados com um acréscimo de 50% daquele valor (em amarelo)¹⁷ o que, juntamente com a unidade Rectisol®, revelam um imediato aumento de 60% no ISBL de plantas BTL.

Gráfico 3.9 Agrupamento dos custos em uma típica planta BTL – Proposta 1.

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

Custo %	Componentes
45%	<u>Unidade de Separação de Ar (ASU)</u> (50% superior à planta GTL).
35%	<u>Unidade Rectisol®</u> .
30%	<u>Gaseificador</u> (50% superior à planta GTL).
25%	Reator Fischer-Tropsch.
15%	Unidade de melhoria do produto (<i>upgrading</i>).
10%	Unidade de manufatura do H ₂ + Condicionamento do Gás de Síntese.

¹⁷ É válido lembrar que no estudo realizado pelo Dr. Boerrigter e sua equipe, não constam as fontes que propõem esse valor (50% superior) pelos motivos já mencionados anteriormente (*off-the-records*).

De forma semelhante pode-se observar, no gráfico (3.10) adiante, uma proposta mais recente para a distribuição dos custos componentes do ISBL em uma típica planta BTL de acordo com o reporte técnico elaborado por Ryan Swanson, Justinus Satrio e Robert Brown, da Universidade de Iowa, em novembro de 2010, para o National Renewable Energy Laboratory (NREL), divisão do U.S. Department of Energy (DOE) – assim como Arno de Klerk anteriormente o fizera para plantas que operem pela rota GTL.

Gráfico 3.10 Agrupamento dos custos em uma típica planta BTL – Proposta 2.

Fonte: (Elaboração própria).

Custo %	Componentes
51,6%	Gaseificador (<i>custo acrescido em 50%</i>).
25%	Reator Fischer-Tropsch.
18,8%	Unidade de Separação de Ar (ASU) (<i>custo acrescido em 50%</i>).
17,1%	Unidade de manufatura do H ₂ + Condicionamento do Gás de Síntese.
11%	Unidade Rectisol ®.
11%	<u>Pré-tratamento da biomassa.</u>

Assim como no gráfico (3.9), a unidade Rectisol ® permanece destacada (em vermelho) e os custos da unidade ASU e do gaseificador (em amarelo) acrescidos de 50% segundo a metodologia proposta em Boerrigter (2006). Desta forma, observar-se-á, em verdade, um acréscimo de 34,5% no ISBL de uma planta BTL quando comparada com uma típica planta GTL, um pouco mais que a metade daquele observado anteriormente (60%).

Gráfico 3.11 Comparação entre agrupamentos: Propostas 1 e 2.

Fonte: (Elaboração própria).

De forma semelhante, assim como mudanças na distribuição dos custos que compõem o ISBL de uma típica planta GTL foram anteriormente observadas. Diferenças também poderão ser notadas na distribuição dos custos que compõem uma típica planta BTL ao se comparar as propostas 1 e 2, gráficos (3.9) e (3.10) respectivamente, conforme pôde ser visto no gráfico (3.11) anterior. Nota-se que a Unidade de Tratamento de Ar (ASU) também não representa a maior parcela dos custos do ISBL, da mesma forma que Klerk (2012) também o apontara para plantas GTL – sinalizando que, possivelmente, na época do estudo publicado por Boerrigter (2006), os custos associados a esse componente eram muito superiores, como

pôde ser observado nos gráficos (3.1) para plantas GTL e (3.9) para plantas BTL; tem-se então que, o gaseificador pressurizado do tipo de arraste (*pressurised oxygen-blown slagging entrained flow gasifier*) se mostra como o equipamento mais custoso deste ISBL. Ainda é de destacada relevância a inclusão dos custos do pré-tratamento da biomassa lignocelulósica empregada (em verde) que, como já mencionado, impactam diretamente no processo produtivo e na qualidade do *biosyngas* produzido. Deve-se observar também que, para Swanson, Satrio e Brown (2010) a unidade de melhoramento de produto (*upgrading*) é parte integrante do processo Fischer-Tropsch, gráfico (3.10), não sendo considerada separadamente, como poderá ser observado no Capítulo 4. Adotando a didática dos valores adimensionais já vista, tem-se então um ISBL=134,5 – e não 160,0 como foi calculado em Boerrigter (2006) – que, ainda sim, está acima daquele já calculado para uma planta GTL, onde se verifica um ISBL=100.

Assim como feito para uma típica planta GTL, e em conformidade com as equações (3.1) e (3.2) e a metodologia anteriormente descrita no item 3.1 desta pesquisa, prosseguir-se-á com a segunda parcela dos custos que formam o Capital Fixo (*Fixed Capital Investment-FCI*), ou seja, o *Outside Battery Limit* (OSBL), que são calculados a partir dos custos do ISBL + 100% sobre esse valor, apontado em Towler e Sinnott (2012), Varraveto (2006) e Bray (2007). Diferentemente dos valores obtidos para uma típica planta GTL, onde, partindo-se de valores adimensionais, tinha-se um OSBL=100, para uma típica planta BTL, nesta proposta, ter-se-á um OSBL=134,5 já o é ISBL=134,5. Uma vez que os valores do ISBL e OSBL são conhecidos, revelando-se os Custos Diretos (DC), é possível determinar os Custos Indiretos (IC), o *Working Capital* (WC) e os *Start-UP Costs* (StC) em concordância com Barolo (2008). Segue-se com os mesmos cálculos previamente realizados das equações (3.9) à (3.19) porém agora para uma típica planta BTL:

$$TCI = FCI + WC + StC \quad \text{Equação (3.20)}$$

$$TCI = [(\text{DC}) + IC] + WC + StC \quad \text{Equação (3.21)}$$

$$TCI = [(\text{ISBL} + 1,00 \times \text{ISBL}) + IC] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.22)}$$

$$TCI = [(134,5 + 1,00 \times 134,5) + IC] + WC + 0,08 \times FCI \quad \text{Equação (3.23)}$$

$$\text{TCI} = [\textcolor{red}{269} + \text{IC}] + \text{WC} + \textcolor{blue}{0,08} \times \text{FCI} \quad \text{Equação (3.24)}$$

$$\text{TCI} = [\textcolor{red}{269} + \textcolor{red}{47,47}] + \text{WC} + \textcolor{blue}{0,08} \times \text{FCI} \quad \text{Equação (3.25)}$$

$$\text{TCI} = [\textcolor{red}{316,47}] + \text{WC} + \textcolor{blue}{0,08} \times \textcolor{red}{316,47} \quad \text{Equação (3.26)}$$

$$\text{TCI} = \textcolor{red}{316,47} + \textcolor{blue}{25,31} + \text{WC} \quad \text{Equação (3.27)}$$

$$\text{TCI} = 341,78 + \text{WC} \quad \text{Equação (3.28)}$$

$$\text{TCI} = 341,78 + 37,97 \rightarrow \text{TCI} = \textcolor{black}{379,75} \quad \text{Equação (3.29)}$$

Chega-se ao resultado adimensional de 379,75 para o TCI de uma típica planta BTL, o que corresponde a um valor 34,66% superior ao de uma típica planta GTL (TCI=282), conforme equação (3.19); e apesar de em Boerrigter (2006) o valor obtido como resultado (TCI=384, considerando-se um ISBL=160) tenha sido próximo ao aqui calculado, o mesmo aponta um valor 60% superior para plantas BTL, muito acima daquele aqui demonstrado (34,66%). Assim como observado anteriormente, aponta-se que, dependendo de fatores diversos que venham a variar as participações observadas nos IC, StC e WC – custos extras às principais estruturas que compõe o OSBL e ISBL – os valores para o cálculo do TCI de uma típica planta BTL, conforme apresentados neste estudo, podem ser de até 75% superiores. Da mesma forma como ocorre com plantas GTL, a economia de escala também tem forte impacto nas plantas BTL e, assim como visto no gráfico (3.6), observar-se-á essa mesma relação a seguir, no gráfico (3.12), também expresso em unidades monetárias da ordem de US\$ 1,00 x 10³ para cada barril por dia (bpd) em relação à capacidade produtiva de uma planta BTL, expressa em 10³ bpd, variando de 1,00 x 10³ bpd a 100,00 x 10³ bpd. Destacam-se os valores nas ordenadas que chegam a US\$ 160,00 x 10³, valores estes 60% superiores ao do gráfico (3.6), conforme apresentado em Boerrigter (2006).

Gráfico 3.12 Relação entre TCI *versus* Escala de Produção para plantas BTL (1).

Fonte: (Adaptado de BOERRIGTER, 2006).

De posse do resultado obtido na equação (3.29), e retomando a planta ORYX GTL, figura (3.2), adotada como referência em ambos os estudos, cuja capacidade nominal é de 34×10^3 bpd, e cujo TCI adotado para esta pesquisa é de US\$ $1,15 \times 10^9$ (ou $\approx$ US\$ 33.824,00 bpd⁻¹) ter-se-á que o TCI específico para uma típica planta BTL, cuja capacidade nominal de produção (*i.e.* sua escala) é mantida em $34,00 \times 10^3$ bpd, é igual a US\$ ≈ 45.547 bpd⁻¹ (34,66% superior ao TCI específico da planta GTL aqui tomada como modelo), o que resulta em um TCI aproximado de US\$ $1,55 \times 10^9$ – um valor 16% inferior àquele apresentado por Boerrigter e sua equipe: US\$ $1,80 \times 10^9$ – isto ocorre dadas as diferenças entre os valores obtidos em ambos os estudos em relação ao aumento dos custos de uma típica planta BTL, equações (3.20) à (3.29), em relação à uma típica planta GTL: 60% em Boerrigter (2006) e 34,66% nesta pesquisa. Ainda em Boerrigter (2006) é apresentada uma equação que descreve de forma simples a relação entre o TCI específico de uma típica planta BTL e sua capacidade nominal de produção (*i.e.* sua escala X), a qual aqui, na equação (3.30) adiante, encontra-se adequada aos valores previamente calculados de US\$ 45.547,00 para o TCI específico e cujo Fator de Escala (FE), observado anteriormente na tabela (3.1), irá variar de acordo com o valor que mais se aproxima da produção nominal da planta desejada; é importante relembrar que em Boerrigter (2006) o FE adotado é 0,70 e mantido constante para diferentes escalas (de $20,00 \times 10^3$ até $60,00 \times 10^3$ bpd), mas essa decisão foi tida como uma simplificação pelo próprio pesquisador e sua equipe.

$$\text{TCI Específico (Escala X)} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * \left(\frac{34.000 [\text{bpd}]}{\text{Escala X} [\text{bpd}]} \right)^{(1-FE)} \quad \text{Equação (3.30)}$$

Assim sendo tem-se o valor do TCI específico de uma planta BTL sendo multiplicado pela razão entre (a) a capacidade nominal de produção da planta GTL (tomada como modelo) pela (b) escala desejada para o novo empreendimento, estando essa razão sujeita ao FE que irá variar de acordo com a capacidade produtiva nominal da planta objetivada. Observar-se-á a seguir, nas equações (3.31) à (3.39), três exemplo onde o cálculo do TCI e do TCI específico são realizados, utilizando-se para os mesmo, três diferentes escalas almejadas para típicas plantas BTL (20.000 bpd; 34.000 bpd; e 45.500 bpd) e fazendo uso da tabela (3.1) para a escolha do FE mais adequado conforme cada uma das CP:

Exemplo 1

$$\text{TCI Específico (20.000)} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * \left(\frac{34.000 [\text{bpd}]}{20.000 [\text{bpd}]} \right)^{(1-0,70)} \quad \text{Equação (3.31)}$$

$$\text{TCI Específico (20.000)} = 53.406 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] \quad \text{Equação (3.32)}$$

$$\text{TCI} = 53.406 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * 20.000 \text{ bpd} = \$ 1.068.120.000,00 \quad \text{Equação (3.33)}$$

Exemplo 2

$$\text{TCI Específico (34.000)} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * \left(\frac{34.000 [\text{bpd}]}{34.000 [\text{bpd}]} \right)^{(1-0,78)} \quad \text{Equação (3.34)}$$

$$\text{TCI Específico (34.000)} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] \quad \text{Equação (3.35)}$$

$$\text{TCI} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * 34.000 \text{ bpd} = \$ 1.548.598.000,00 \quad \text{Equação (3.36)}$$

Exemplo 3

$$\text{TCI Específico (45.500)} = 45.547 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * \left(\frac{34.000 [\text{bpd}]}{45.500 [\text{bpd}]} \right)^{(1-0,84)} \quad \text{Equação (3.37)}$$

$$\text{TCI Específico (45.500)} = 43.472 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] \quad \text{Equação (3.38)}$$

$$\text{TCI} = 43.472 \left[\frac{\$}{\text{bpd}} \right] * 45.500 \text{ bpd} = \$ 1.977.976.000,00 \quad \text{Equação (3.39)}$$

Observa-se que nos três exemplos, mantidas fixas a escala da planta GTL, $34,00 \times 10^3$ bpd e seu TCI específico (34,66% superior) de US\$ 45.547,00, temos um aumento nos valores nominais das escalas desejadas ($20.000 \text{ bpd} < 34.000 \text{ bpd} < 45.500 \text{ bpd}$) e um decréscimo nos respectivos TCI específicos ($\text{US\$ } 53.406,00 \text{ bpd}^{-1} > \text{US\$ } 45.547,00 \text{ bpd}^{-1} > \text{US\$ } 43.472,00 \text{ bpd}^{-1}$) indicando como a economia de escala influencia nos custos de uma típica planta BTL, como pode ser observado no gráfico (3.13) a seguir:

Gráfico 3.13 Relação entre TCI *versus* Escala de Produção para plantas BTL (2).

Fonte: (Elaboração Própria).

Assim, nota-se que a equação (3.30) descreve a relação entre o TCI e a escala de produção de forma semelhante àquela anteriormente apresentada em Boerrigter (2006) no gráfico (3.12); é importante observar que, também como já mencionado, conforme a capacidade nominal de produção se torna muito elevada, o TCI tende a independar do FE. O ponto destacado (em vermelho) corresponde à capacidade nominal de $33,92 \times 10^3$ bpd, próxima àquela tomada como ponto de partida, $34,00 \times 10^3$ bpd, proveniente da planta modelo GTL. Em relação à planta ORYX GTL, é preciso considerar que se trata de uma planta *brownfield*, fazendo-se necessárias algumas considerações a respeito a seguir.

Quando um complexo industrial como esse é projetado, as companhias e investidores envolvidos costumam buscar por localidades urbanas ou rurais com terra livre disponível ou infra-estruturar fabril previamente existente, sendo a primeira conhecida como *greenfield* e a segunda, conhecida como *brownfield* – estruturas estas que poderão ser modernizadas e/ou expandidas para atender aos objetivos do projeto. De semelhante forma à já adotada, não é objeto de estudo desta tese se aprofundar nas questões envolvendo os critérios de escolha entre as duas possibilidades supracitadas mas uma breve discussão a respeito far-se-á necessária, objetivando a elaboração de mais um importante ponto a ser observado. Em concordância com a bibliografia publicada por Mullin; Kotval e Moriarty (1993), Batra e Kumar [200-?] e também com o manual *Sustainable land use and urban design on brownfield sites* (2004), desenvolvido pela Comissão Européia, tem-se:

A. Uma área *greenfield* é uma delimitação de terra que ainda não foi utilizada para nenhuma construção habitacional, comercial ou industrial antes; geralmente são áreas rurais ou se encontram nas redondezas de centros urbanos.

A.1 Vantagens associadas à escolha de um sítio *greenfield*:

- a. Geralmente próximos a centros urbanos com acesso a importantes rodovias de acesso ou portos/canais navegáveis;
- b. Maior possibilidade e liberdade de expansões do complexo industrial;
- c. Maior facilidade para se erguer estruturas (*fresh start*).

A.2 Desvantagens associadas à escolha de um sítio *greenfield*:

- a. De forma geral a utilização dessas áreas não é sustentável em sua totalidade;
- b. Normalmente a construção de estradas e/ou ferrovias de acesso, redes de transmissão de força, água e esgotos, e complexos habitacionais são necessárias.

B. Uma área *brownfield* é uma delimitação de terra já utilizada pelo setor da construção civil ou industrial, suportando estruturas que estão prontas para serem modificadas e/ou expandidas ou; podem ser encontradas em diversos locais e também dentro de áreas urbanas.

2.1 Vantagens associadas à escolha de um sítio *brownfield*:

- a. Pode ser, em princípio, menos danosa ao ambiente; minimiza a pressão existente quanto ao uso de áreas *greenfield*, reutilizando dessa forma a terra parada/abandonada;

- b. Aproveitamento da infra-estruturar já existente, geralmente integrante do OSBL;
- c. Reutilizando uma área *brownfield* poderá ser possível reavivar seus arredores.

B.2 Desvantagens associadas à escolha de um sítio *brownfield*:

- a. A remoção e o tratamento de entulho, escombros, lixo industrial de diferentes classificações de risco, estruturas condenadas e danificadas poderá ser custoso;
- b. O grau de liberdade para a disposição do complexo industrial é menor se comparada à utilização de uma área *greenfield*, demandando certa adequabilidade do mesmo.

Essas considerações, mesmo que simplificadas, são objeto de discussão e ainda não há consenso sobre as mesmas, podendo suas definições variar sensivelmente de um projeto para o outro. Embora seja uma estimativa, complexos industriais construídos sobre áreas do tipo *greenfield* podem ser tomados como sendo até 50% mais custosos que aqueles construídos em áreas do tipo *brownfield*, como já mencionado em Towler e Sinnott (2012), sendo algumas porcentagens ainda maiores, como o caso já citado da planta na região de Escravos (EGTL), figura (3.3), cujo TCI era 74% superior ao TCI da planta ORYX GTL, figura (3.2), para capacidades de produção próximas, na data da realização do estudo (2006) e que, apesar de uma parcela dessa diferença se dar por razões tecnológicas, Boerrigter (2006) afirma que a maior parte dela se deve mesmo ao fato de ser uma planta erguida da estaca zero. Dessa forma, a equação (3.30) fornece uma estimativa para complexos industriais BTL erguidos sobre áreas do tipo *greenfield*, cuja parcela de custos adicionais integra o OSBL daquele TCI, indicando que, para áreas do tipo *brownfield*, uma redução nesse valor pode ser esperada – mas dependerá de inúmeros fatores como o estado de conservação do sítio, volume de escombros, dentre outros. A equação (3.10) prevê um cenário otimista, desconsiderando atrasos que poderão encarecê-lo, como aconteceu (e ainda acontece) com a EGTL, cujo TCI já se encontra num valor próximo a US\$ $8,4 \times 10^9$, valor este mais de 400% superior àquele calculado inicialmente, proporcionando um TCI específico de US\$ $260,00 \times 10^3 \text{ bpd}^{-1}$ (informação online)¹⁸. Até o ano de 2013, o Brasil não possui qualquer unidade produtiva GTL ou similar que poderá ser utilizada como ponto de partida (*brownfield*) para a construção de uma típica planta BTL; desta forma, considerar-se-á a utilização de uma área do tipo *greenfield* para tal. Serão apresentadas, a seguir, considerações acerca dos resíduos lignocelulósicos e um breve panorama de sua potencial oferta pelas cinco regiões do país.

¹⁸ Gas to Liquids 201. <<http://communities.gas-to-liquids.co.uk/2012/09>> Acesso em 18 de janeiro de 2013.

3.3 Revisão sobre os resíduos de biomassa.

Resíduos sólidos, estejam eles separados em industriais, rurais (agrícolas e florestais) ou urbanos, podem ser vistos como restos sólidos decorrentes de determinada ação humana que, em princípio, não possuem utilidade para a atividade fim que lhes originou, podendo assim ser descartados de maneira adequada ou adequadamente por sua aparente falta de utilidade ou devido tratamento, ou ainda, podem se tornar insumos para outras atividades de natureza diversa, agregando dessa forma, utilidade e valor comercial. Da ótica do setor industrial, os resíduos sólidos podem ser encarados como matéria-prima não convertida em produto final, podendo apontar a eficiência do processo e suas eventuais perdas. Nas últimas décadas, uma crescente preocupação relacionada às cada vez mais presentes questões ambientais e à elaboração de definições para o desenvolvimento sustentável, levou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a criar a Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos para revisar a ABNT NBR 10004:1987 – Resíduos sólidos – Classificação, com o objetivo de oferecer um adequado suporte ao gerenciamento de resíduos sólidos. Essa classificação abrange desde a identificação do processo ou atividade geradora dos resíduos, características físico-químicas e a eventual comparação com outras substâncias danosas ou potencialmente danosas ao ser humano ou meio ambiente. É importante que o processo classificatório comece na fonte geradora do resíduo, pois sua origem é parte integrante do laudo técnico. Resíduos sólidos podem ser classificados como perigosos ou não-perigosos, sendo o segundo ainda dividido em inerte e não-inerte. A NBR 10004:1987 os define como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10.004 Resíduos Sólidos – Classificação ABNT/04).

Por interesse desse estudo tratar-se-á apenas dos resíduos não-perigosos de origem rural, identificados como A009 segundo o Anexo H da NBR 10004:1987. Segundo o Banco de Dados de Biomassa no Brasil¹⁹, esses resíduos advêm de processos de beneficiamento de produtos agrícolas e florestais e também do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico.

¹⁹ Dados disponíveis em <<http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>> Acesso em 18 de abril de 2012.

A indústria madeireira, moveleira e serrarias produzem resíduos a partir do beneficiamento de toras, cavacos, casca, serragem, aparas dentre outros; de forma similar há a indústria do beneficiamento de grãos, como o arroz, o café, o trigo, o milho, amendoim dentre outros, que também produz resíduos como casca, sabugo e palha. Ainda é importante mencionar o setor de papel e celulose que produz como resíduos as cascas, cavacos e lixívia. Os resíduos rurais abrangem aqueles gerados por atividade produtiva localizada em zonas rurais (destinadas para atividades agropecuárias, agroindustriais e extrativistas) e são eles: resíduos agrícolas, pecuários e florestais (ou silvestres) – sendo o primeiro aquele oriundo de atividades de manutenção de culturas e colheitas; mensura-se essa produção de resíduos através da relação percentual entre a quantidade total de biomassa produzida por hectare plantado e a quantidade de produto economicamente aproveitável. A maior parte desses resíduos, se não toda ela, permanece no próprio terreno cultivado, funcionando como proteção e adubo para o solo. Resíduos pecuários caracterizam-se por produtos resultantes da atividade biológica do gado bovino, suíno e outros, como o esterco, e cuja importância econômica reside em seu aproveitamento, na forma de biogás, para o setor energético. Por fim, os resíduos florestais ou silvestres são aqueles deixados em florestas, resultantes de extração de madeira, estimando-se que de 15 a 20% da massa do vegetal permaneçam como resíduo. Resíduos sólidos urbanos não serão objeto de estudo dessa pesquisa que focará somente nos resíduos rurais, do tipo florestais, ou silvestres, advindos dos processos industriais de beneficiamento de toras. (JUNKES, 2002) (HAMADA, 2003) e (JUNIOR et al., 2004).

O Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) são responsáveis pelas principais políticas públicas vigentes no país no que diz respeito à gestão, aproveitamento e deposição dos resíduos em geral, englobando, naturalmente, também dos resíduos de madeira (ou lignocelulósicos). Programas e políticas públicas federais como a Política de Agroenergia (MME), ou a Política Florestal, gerida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), uma divisão do MMA, são exemplos de iniciativas que visam um destino mais proveitoso, econômica e ambientalmente, para esses resíduos. Outros ministérios, como o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) também tem participação em projetos dessa natureza e de acordo com o MMA, o Brasil é um grande produtor de produtos de origem florestal e um grande consumidor de tais produtos para o abastecimento de setores estratégicos como a indústria do papel e celulose, siderurgia, construção civil dentre outros menores dependentes desse setor (informação online)²⁰.

²⁰ Dados disponíveis em <<<http://www.mma.gov.br>>> Acesso em 18 de abril de 2012.

Em 2009, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), contando com o suporte do consultor Marcelo Wiecheteck, especialista atuante no campo da economia florestal gestor da empresa de consultoria florestal STPC Engenharia de Projetos Ltda²¹, sediada em Curitiba, PR, elaborou um documento baseado em diversos estudos visando o aproveitamento dos resíduos florestais brasileiros por alternativas tecnológicas. Esse documento constitui o corpo do projeto BRA 00/020. Seguindo a orientação da Secretaria Executiva da Comissão Nacional de Florestas (CONAFLO), no MMA, as questões energéticas são incumbências da Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental (SMCQ) e, a mando de seu Secretário, Carlos Augusto Klink, ex-pesquisador de ecologia vegetal na Universidade de Brasília (UnB), e com a colaboração de Ana Dolabella²², para fins desta pesquisa, disponibilizou o documento supracitado – não havendo estudos de natureza similar posteriores a este disponíveis no MMA até a presente data. Segundo consta no projeto BRA 00/020, o setor madeireiro brasileiro e a utilização da madeira em centros urbanos (seja na construção civil, no emprego de embalagens ou na poda de arborização urbana) é um grande gerador de resíduos de madeira onde uma expressiva parcela desse volume não possui um destino adequado, ou seja, carece de um aproveitamento social e/ou econômico e/ou ambiental – *i.e.* uma significativa perda de oportunidades para comunidades locais, para a indústria, governos estaduais e para a sociedade de forma geral. Tais resíduos de madeira poderiam ser utilizados como matéria prima para fins diversos, dentre eles o uso energético – diferentemente do que o uso comum aponta, a combustão para geração de calor não é o único destino para tais subprodutos das indústrias de produtos florestais, assim pode-se dizer. É possível empregá-los em processos mais elaborados, que utilizem seus constituintes elementares, como o carbono (C) e o hidrogênio (H), para produção de produtos de química fina, como lubrificantes e combustíveis.

Os resíduos industriais de madeira podem ser gerados na ação extrativa para sua obtenção, seja em áreas destinadas ao seu plantio ou florestas nativas; resíduos também podem surgir durante o transporte dessa madeira até o parque industrial onde será, quando pertinente, estocada, assim como durante seu manuseio e posterior processamento – a geração desses resíduos é consequência direta da transformação da madeira por processamento mecânico em diferentes etapas. Tais resíduos podem se apresentar em variadas formas, como por exemplo, cavacos (*wood chips*), a acendalha (ou maravalha), serragem, pó de madeira,

²¹ Detalhes sobre a empresa STPC Engenharia de Projetos Ltda no endereço <<http://www.stcp.com.br>>.

²² DOLABELLA, Ana. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida de <ana.dolabella@mma.gov.br> em 28 de junho de 2012.

lascas ou aparas de tamanhos diversos, os cepilhos (pequenos sólidos de madeira) ou a própria casca do vegetal (presente também nas tábuas costaneiras). Conforme apontado por Cassilha et al. [2004?] o critério para classificação de alguns dos resíduos depende de suas disposições morfológicas, nos fornecendo madeira na forma de (a) cavacos, que se caracterizam por fragmentos com dimensões máximas de 50 x 20 mm; (b) acendalha, que possui dimensão superior a 2,5 mm; (c) serragem, comumente proveniente da ação de serras, variando de 0,5 a 2,5mm em tamanho; e (d) na forma de pó de serra, considerado um resíduo de madeira com diâmetro inferior a 0,5mm.

Muitos dos resíduos de madeira encontram aplicação na indústria madeireira, como em serrarias, na forma de produtos de maior valor agregado (PMVA) como no fabrico de placas de compensado, embalagens e painéis de madeira, briquetes ou para produção de carvão vegetal; naturalmente uma parcela acaba sendo utilizada como combustível em caldeiras e/ou pequenos fornos, por exemplo. Tais atividades foram observadas com maior incidência nas regiões Sudeste, Centro Oeste e Sul do Brasil. Outro ponto forte é a indústria de papel e celulose. Segundo a entidade responsável pela representação institucional desse setor junto a seus principais públicos de interesse, a Associação Brasileira de Papel e Celulose (BRACELPA), os resíduos oriundos do processo de descascamento das toras de madeira são empregados como biomassa na co-geração de energia, principalmente na região sul do país, onde há um ativo mercado negociador de resíduos. Outro segmento industrial que consome resíduos de madeira, principalmente como insumos, é o de painéis de madeira, que necessita dos mesmos para sua manufatura. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA), os painéis de madeira são estruturas fabricadas com madeiras em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação que, aglutinadas pela ação de pressão, de temperatura e resinas, são novamente agregadas para o fabrico de fibras de madeira como os compensados multilaminados e sarrafeados, aglomerados, o *medium density fiberboard* (MDF), o *medium density particleboard* (MDP), *oriented strand board* (OSB), tamburato, *blockboard* dentre outros. Esse segmento industrial se concentra nas regiões Sudeste e Sul, consumindo os resíduos adquiridos de terceiros ou de madeira oriunda de florestas plantadas próprias. (BIAZUS; HORA e LEITE, 2010); (informação online)²³.

Um outro setor gerador de resíduos de madeira é a indústria moveleira ou indústria do mobiliário, representado pela Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário (ABIMÓVEL) e que concentra-se em algumas cidades das regiões Sudeste e Sul. A indústria

²³ Dados disponível em <<http://abipa.org.br>> Acesso em 23 de maio de 2012.

moveleira, cujo processo produtivo já se encontra consolidado, depara-se com volumes cumulativos de resíduos que causam impactos ambientais negativos quando dispostos de forma inadequada, contaminando recursos hídricos, por exemplo.

Ainda segundo Biazus, Hora e Leite (2010), uma outra classificação, no que tange sua origem, para os resíduos de madeira, são aqueles advindos de áreas urbanizadas, merecendo atenção diferenciada por representarem madeira desperdiçada, em geral, em grandes centros urbanos. Muito empregada no segmento da construção civil, a madeira utilizada como suporte às estruturas e andaimes normalmente é descartada com os demais resíduos sólidos desse setor, encontrando seu fim, como dejetos, em aterros sanitários – não havendo, de forma expressiva, reciclagem da mesma uma vez que as toras e tábuas comumente apresentam contaminação por outros materiais, como por exemplo concretos e metais. Ainda no que tange a disposição final de resíduos de madeira em centros urbanos, tem-se aqueles resíduos provenientes da manutenção de parques públicos e jardins e principalmente da poda de arborização urbana, assim como da remoção parcial ou total de árvores públicas, incorrendo em problemas quando esses resíduos não são devidamente descartados, encontrando seu fim em locais inadequados como aterros clandestinos. É válido destacar ainda que existem os resíduos de embalagens de madeira destinadas ao transporte de alimentos, em princípio, ou outros bens rústicos quando sua qualidade diminui. Essas embalagens, ou caixas de madeira, são utilizadas e reaproveitadas até seu desgaste máximo, quando então podem ser empregadas como combustíveis para fins energéticos (em seu estado atual ou processadas em cavacos) ou ainda, destinadas a aterros sanitários.

Segundo Hüebli (2001) apud Cassilha et al. [2004?], ao se analisar a cadeia produtiva da madeira é possível verificar que, devido à utilização de tecnologias inadequadas de processamento e ao desconhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas, principalmente, há perdas que somam quase 50% da matéria-prima, sendo 12% delas na forma de serragem; 20% na forma de lascas ou maravalhas decorrente do uso de plainas empregadas na indústria de beneficiamentos e as demais na forma de cavacos ou lenha provenientes de aparas, cascas e costaneiras em laminadoras e serrarias. No âmbito de mitigar o desperdício dos resíduos de madeira, ou são eles utilizados como matéria-prima para PMVA ou então utilizados, de diferentes formas, no setor de geração e co-geração de energia, podendo ela ser térmica, elétrica ou ainda indireta – foco desse estudo – como no caso de sua gaseificação para produção de gás de síntese (*biosyngas*).

Uma alternativa viável para o aproveitamento dos resíduos de madeira para o setor energético, em substituição ao seu uso tradicional em processos de combustão, é a produção

de briquetes (diâmetro a partir de 50mm) ou *pellets* (diâmetro entre 6 e 16mm) de madeira por meio da compactação de matéria lignocelulósica, sob a ação de pressão (≈ 200 MPa) e temperatura (de 100 a 150 °C), promovendo sua aglomeração por meio da lignina presente. Segundo Wiecheteck (2006), estatísticas oficiais que representem a situação do mercado de briquetes no país são imprecisas mas este estima que haja uma produção de pelo menos $160,00 \times 10^3$ toneladas anuais – essa produção advém de empresas isoladas e concentra-se, principalmente, nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. Apesar dos investimentos em equipamentos necessários para o processo de dimensionamento da madeira – aspecto ausente quando a mesma é simplesmente utilizada como lenha – a confecção de briquetes e *pellets* possibilita um transporte e armazenamento mais efetivos e econômicos além de um aproveitamento energético mais refinado dos resíduos através de processos relativamente simples e cuja tecnologia está consolidada e disponível em território nacional. Dessa forma, briquetes e *pellets* de madeira podem ser considerados biocombustíveis sólidos gerados a partir de resíduos de madeira que atendem a determinadas condições como dimensão, formato (cilíndrico, bolacha, etc.), teor de umidade (variando de 8% a 15%) e poder calorífico; ainda deve-se considerar diferenças significativas em sua composição e nas condições supracitadas dependendo da matéria prima empregada, como por exemplo, o eucalipto (*eucalyptus*) ou pinho (*pinus*) ou Madeiras de Lei (informação online)²⁴. É possível observar, na figura (3.8), adiante, o aspecto físico de briquetes e *pellets* de madeira ordinários, usados comumente na indústria do cimento, metalurgia e siderurgia. No que diz respeito ao extenso universo dos briquetes e *pellets* de biomassa lignocelulósica, o pouco abordado nesta pesquisa presta-se à uma breve introdução apenas, objetivando posicionar o leitor na abrangente situação que orbita a produção, classificação, transformação e emprego desses resíduos.

Figura 3.7 Briquetes e *pellets* de biomassa lignocelulósica.

Fonte: Lippel & CIA Ltda. (informação online)²⁵.

²⁴ Dados disponível em <http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp> Acesso em 27 de maio de 2012; e <<http://lippel.com.br/br/sustentabilidade/briquetagem-e-peletizacao.html#.UWxrY0rd6So>> Acesso em 27 de maio de 2012.

²⁵ Dados disponíveis em <<http://lippel.com.br>> Acesso em 27 de maio de 2012.

3.4 Potencial energético de produção de plantas BTL

Desde 2008 até 2012, o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) e o Ministério de Minas e Energia (MME) atualizaram sua publicação prévia, o Atlas de Bioenergia do Brasil (2008), atlas esse que será utilizado como principal bibliografia para a continuidade desta pesquisa. A seguir, cada uma das cinco regiões integrantes da área territorial do Brasil – que, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é igual a 8.515.692,272 km² – será abordada de acordo com sua oferta de resíduos florestais ou silvestres. Em se tratando dos resíduos da silvicultura, segundo o Atlas de Biomassa (2012), sua classificação proposta encontra-se dividida em três grupos distintos descritos a seguir:

- a. De um total extraído, 15% destes resíduos são aqueles deixados no campo silvestre após a coleta da madeira – 85% seguem para processamento ou fonte de energia;
- b. De um total submetido a processos industriais, 50% da madeira é consumida em forma de toras, proporcionando 50% de resíduos advindos do processamento; e
- c. De um total transformado pela indústria moveleira nacional, tem-se uma geração de aproximadamente 20% de resíduos diversos de madeira.

O Atlas de Biomassa (2012) aponta que somente os resíduos de madeira advindos dos processos industriais diversos (item b) puderam ser mapeados uma vez que os despojos silvestres deixados nos campos após atividade extrativista e aqueles oriundos da indústria moveleira são muito esparsos, carecendo de localidades definidas e mais especificações que possibilitem seu mapeamento. Neste atlas, constam mapas (escala 1:15.616.123) onde são encontrados os potenciais teóricos para geração de energia (MW ano⁻¹)²⁶. Serão apresentadas informações acerca dos aspectos geográficos mais relevantes das extensões de terra que apresentarem uma oferta anual (365 dias) de biomassa lignocelulósica suficiente para suprir uma típica planta BTL cujas capacidades de produção poderão variar de acordo com a disponibilidade da matéria-prima. Cada mapa contém seis diferentes faixas quantitativas, indicando a potencial oferta da biomassa silvestre (em toneladas) de resíduos industriais.

²⁶ No Atlas de Biomassa (2012) os cálculos foram feitos considerando-se um período de operação durante 95% das horas em todo o ano (8.322 horas, de um total de 8.640 horas), tendo-se em uso um convencional sistema de turbina a vapor (ciclo Rankine) e atentando-se para um Poder Calorífico Inferior (PCI) igual a 2.000 kcal kg⁻¹ para os resíduos silvestres.

Antes de prosseguir, uma última, porém não menos relevante, inferência a ser feita tange o rendimento médio do processo de conversão da biomassa lignocelulósica, *in natura* ou transformada e processada (em briquetes ou *pellets*), *i.e.*, a quantidade de litros ou metros cúbicos de biocombustíveis sintéticos possíveis se obter com, por exemplo, o emprego de uma tonelada de matéria-prima. Sobre as quantidades calculadas a partir do Atlas de Biomassa (2012) será aplicado um rendimento médio do processo de transformação da biomassa lingocelulósica em combustíveis líquidos de aproximadamente 10 (dez) para 1 (um), ou seja, para cada dez toneladas de matéria-prima, produzir-se-á, em média, uma tonelada de combustíveis líquidos. Esse valor, baseado nos rendimentos teóricos de dois projetos de vanguarda, foi obtido por contato com Anneli Kunnas²⁷, gerente na UPM Bioforce Company, unidade da finlandesa UPM-Kymmene Corporation, um complexo empresarial atuante no ramo do processamento de polpa de celulose, papel e madeira, subdividida nos setores de polpa/energia, papel e materiais para engenharia, sendo a detentora de unidades produtivas em 17 países, cuja central localiza-se em Helsinki, na Finlândia. A UPM participará da primeira chamada da NER 300²⁸ com os projetos a seguir, objetivando a produção de biocombustíveis sintéticos num cenário europeu que visa a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE):

- (a). A expansão da planta UPM Stracel BTL, processamento de polpa de papel, localizada em Strasbourg, leste da França, visando a construção de um complexo industrial de combustíveis da Segunda Geração, com capacidade nominal de produção estimada de $105,00 \times 10^3 \text{ t ano}^{-1}$ de biocombustíveis líquidos pela rota BTL, sendo, inicialmente, 80% de óleo diesel FT e 20% de bionafta; e
- (b). A construção da planta Ajos BTL, ainda sem local definido – porém sabe-se que será na região noroeste da Finlândia – cuja produção nominal esperada será de $115,00 \times 10^3 \text{ t ano}^{-1}$ para o fornecimento de combustíveis sintéticos, como o óleo diesel FT e bionafta para a região do Mar Báltico, com foco na Finlândia e Suécia.

²⁷ KUNNAS, Anneli. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida de <communications@upm.com> em 27 de março de 2013.

²⁸ NER300 consiste em um mecanismo que tem por principal objetivo o incentivo de investimento dos Estados membros da União Européia e do setor privado em tecnologias com baixo teor de carbono, em concordância com a revisão da Diretiva n.º 2003/87/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de outubro, pela Diretiva n.º 2009/29/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril. Esse mecanismo de Incentivo visa o financiamento de projetos de demonstração comercial visando a captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono (CO₂) em condições de segurança ambiental e de Project os de demonstração de tecnologias inovadoras de aproveitamento de fontes de energia renováveis (FER). <<http://www.ner300.com>> Acesso em 23 de fevereiro de 2013.

De posse das quantidades calculadas a partir do Atlas de Biomassa (2012) e do rendimento médio aplicado, é possível estimar a capacidade nominal (em bpd) e, com o emprego da equação (3.30), seu TCI específico e, posteriormente, seu TCI. Considerou-se apenas as quantidades nominais de biomassa silvestre superiores à $42,00 \times 10^3 \text{ t m^{-1}}$, uma vez que quantidades inferiores produzirão menos de $1,00 \times 10^3 \text{ bpd}$ de óleo diesel FT, não se beneficiando da economia de escala, conforme Boerrigter (2006) e gráficos (3.7) e (3.13).

3.4.1 Região Norte

Segundo o IBGE, é a maior das cinco regiões do Brasil, possuindo uma área de $3,869637 \times 10^6 \text{ km}^2$, correspondendo a 42,27% do território brasileiro, sendo formada por sete estados, de clima predominantemente equatorial e de grande biodiversidade. A figura (3.9) indica as áreas pertencentes à Região Norte que apresentam potencial de geração de resíduos silvestres advindos de processos industriais. As quantidades nominais dessa biomassa foram distribuídas conforme uma escala crescente, variando desde onde a oferta é pequena (tons claros) até onde ela é elevada (tons escuros) em seis diferentes faixas.

Figura 3.8 Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Norte.

Fonte: (Adaptado do Atlas de Energia do Brasil, 2012).

As maiores concentrações de recursos silvestres disponíveis na Região Norte do Brasil encontra-se ambas no estado do Amapá (AP), na denominada Mesorregião Sul, sendo a primeira limitada ao norte pelo Parque Nacional Amazônico da Guiana, um parque nacional pertencente ao território da Guiana Francesa (GF); a noroeste pela República do Suriname e pelo Parque Indígena do Tumucumaque; a oeste, se estende por toda a fronteira com o Pará (PA), seguindo o Vale do Rio Jarí até a Bacia Hidrográfica do Rio Cajari, ao sul do estado, em uma extensa região conhecida como Laranjal do Jarí, cuja área estimada corresponde a $29,70 \times 10^3 \text{ km}^2$, que equivale a quase um quinto da área do estado, e que abriga a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Rio Iratapuru, ao centro, com uma área estimada de $8,06 \times 10^3 \text{ km}^2$, pouco mais de um terço do Laranjal do Jarí, limitada ao norte pela Terra Indígena Waiãpi e ao sul pela Estação Ecológica do Jarí. Já a segunda região corresponde ao território político do município de Porto Grande, cuja área é de $4,40 \times 10^3 \text{ km}^2$. Nessas regiões, a capacidade nominal anual de produção de resíduos de biomassa silvestre varia de $477,20 \times 10^3$ a $715,90 \times 10^3 \text{ t}$, capaz de produzir, aproximadamente, de $4,77 \times 10^3$ a $6,73 \times 10^3 \text{ m}^3$ de líquidos FT (para fins deste trabalho, como já mencionado anteriormente, considerar-se-á 100% de óleo diesel sintético), o que equivale a dizer produzir de $0,947 \times 10^3$ a $1,413 \times 10^3 \text{ bpd}$. Contudo, um mínimo de $1,00 \times 10^3 \text{ bpd}$ é desejado, e fazendo uso da tabela (3.1) tem-se que o fator de escala (FE) correspondente é de 0,56, assim os TCI poderão variar de US\$ $214,90 \times 10^6$ a US\$ $260,80 \times 10^6$.

3.4.2 Região Nordeste

Segundo o IBGE, é a terceira maior das cinco regiões do Brasil, possuindo uma área de $1,558196 \times 10^6 \text{ km}^2$, correspondendo a 18% de todo o território brasileiro e possuindo a maior costa litorânea do país. É formada por nove estados, de clima litorâneo, tropical e semi-árido e formações vegetais distintas em cada um deles. A figura (3.10), adiante, indica as áreas pertencentes à Região Nordeste que apresentam potencial de geração de resíduos lignocelulósicos advindos de processos industriais. Em três regiões distintas pode-se observar maior capacidade nominal de oferta de biomassa silvestre, sendo elas:

- a. No estado do Maranhão (MA), em sua região meio-norte, ou Mata dos Cocais – sendo formada predominantemente por espécies do tipo babaçu (*Orbignya phalerata*)

e carnaúba (*Copernicia prunifera*) – na divisa com o estado do Pará (PA), limitada superiormente pelo oceano Atlântico, cuja formação vegetal de transição recebe influência marinha e fluvial, sendo assim denotada como manguezal, ou mangue, e se estende por uma longa faixa através dos municípios de Carutapera, Luís Domingues, Godofredo Viana, Cândido Mendes e Turiaçu, onde é possível observar uma oferta anual de biomassa silvestre que varia de $715,70 \times 10^3$ a $2.385,60 \times 10^3$ t, sendo capaz de produzir, aproximadamente, de $6,74 \times 10^3$ a $22,46 \times 10^3$ m³ de líquidos FT o que equivale a dizer produzir de $1,413 \times 10^3$ a $4,710 \times 10^3$ bpd, com um FE variando de 0,56 a 0,60, e cujos TCI poderão variar de US\$ $260,80 \times 10^6$ a US\$ $472,90 \times 10^6$; e

Figura 3.9 Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Nordeste.

Fonte: (Adaptado do Atlas de Energia do Brasil, 2012).

b. No estado Bahia (BA), na mesorregião do Centro-Sul Baiano que, de semelhante forma como ocorre no estado do Maranhão (MA), também possui influência marítima em sua vegetação costeira, proporcionando duas áreas distintas com potencial oferta de biomassa silvestre. São elas: (1) a região do Litoral Norte, limitada ao norte pela fronteira com o estado do Sergipe (SE) e a leste pelo oceano Atlântico, nos municípios

de Esplanada e Entre Rios; e (2) a região conhecida como Extremo Sul, limitada também pelo oceano Atlântico e pelos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES), englobando os municípios de Belmonte, Eurapolis, Mucuri, Nova Viçosa, Caravelas e Alcobaça. Em ambas as localidades, há predominância de floresta atlântica, ou mata atlântica, de grande biodiversidade, englobando também as vegetações de transição, manguezais, cuja oferta nominal de biomassa pode variar de $715,70 \times 10^3$ a $2.385,60 \times 10^3$ t, sendo capaz de produzir de $1,413 \times 10^3$ a $4,710 \times 10^3$ bpd, também com FE que variem de 0,56 a 0,60, e cujos respectivos TCI estarão entre US\$ $260,80 \times 10^6$ e US\$ $472,90 \times 10^6$.

3.4.3 Região Centro-Oeste

É composta por quatro unidades federativas, sendo uma delas o Distrito Federal (DF), e segundo o IBGE, possui uma área de $1,606371 \times 10^6$ km², posicionando-a como a segunda maior região do país, porém a menos populosa, logo com a menor densidade populacional. A figura (3.11) adiante aponta as principais áreas da região Centro-Oeste com potencial para geração resíduos de biomassa florestal proveniente de processos industriais. O estado do Mato Grosso do Sul (MS), de clima tropical e cujas formações vegetais predominantes são o cerrado, os pampas e o bioma conhecido como Complexo do Pantanal, é aquele que apresenta maior potencial para produção de resíduos de biomassa lignocelulósica na região Centro-Oeste, localizando-se esta em suas regiões norte e leste, nas subseções de Três Lagoas e Campo Grande, englobando os municípios de Três Lagoas, Água Clara e Ribas do Rio Pardo, sendo formada, primordialmente, por pelo bioma denominado cerrado, ou “savana brasileira”. É uma região extensa, cuja diversidade vegetal está ameaçada, há décadas, pelas monoculturas, pecuária intensiva, carvoarias e intensa atividade madeireira. A capacidade nominal anual de produção de resíduos florestais nessa região varia de $238,60 \times 10^3$ a $2.385,60 \times 10^3$ t, podendo produzir de $0,471 \times 10^3$ a $4,710 \times 10^3$ bpd, sendo somente um percentual dessa capacidade de real interesse dessa pesquisa por proporcionar uma capacidade nominal de produção superior a $1,00 \times 10^3$ bpd, apresentando em seu potencial máximo um FE=0,60 e cujos TCI poderão variar, adotando como um mínimo a capacidade produtiva de $1,00 \times 10^3$ bpd, cujo FE=0,56, valores que variam de US\$ $214,90 \times 10^6$ a US\$ $472,90 \times 10^6$.

Figura 3.10 Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Centro-Oeste.

Fonte: (Adaptado do Atlas de Energia do Brasil, 2012).

3.4.4 Região Sudeste

A região Sudeste é quarta região em tamanho do país, segundo o IBGE, possui uma área de $0,924511 \times 10^6$ km², englobando quatro unidades federativas. Nela, encontram-se as maiores cidades do Brasil, com as maiores densidades populacionais e grandes pólos industriais. É tida como uma região de transição entre o relevo e clima da região Nordeste e os aspectos geográficos e climáticos da região Sul do Brasil. Conforme apresentado na figura (3.12), adiante, é possível identificar as áreas que possuem a maior capacidade anual de produção de resíduos de biomassa silvestre, sendo elas:

- Nos municípios de Conceição da Barra e São Mateus, compreendidos no litoral norte do Espírito Santo (ES), se tratando da extensão da vegetação litorânea do Extremo Sul do estado da Bahia (BA), região fronteira com o município de

Alcobaça, com predominância da floresta atlântica e a vegetação litorânea de transição (mangues ou manguezais) mencionada anteriormente. É possível observar uma capacidade nominal anual de oferta de resíduos de biomassa lignocelulósica de $357,90 \times 10^3$ a $1.908,50 \times 10^3$ t, podendo produzir de $0,706 \times 10^3$ a $3,768 \times 10^3$ bpd de líquidos FT, contudo há interesse somente em capacidades produtivas superiores a $1,00 \times 10^3$ bpd, onde os FE variam de 0,56 a 0,59, e o TCI pode variar de US\$ 214,90 $\times 10^6$ a US\$ 422,90 $\times 10^6$;

Figura 3.11 Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Sudeste.

Fonte: (Adaptado do Atlas de Energia do Brasil, 2012).

b. No estado de São Paulo (SP), com maior concentração na região administrativa de Sorocaba, abrangendo diversos municípios, sendo eles Itararé, Capão Bonito, São Miguel Arcanjo, Pilar do Sul, Guareí e Bofete; e também no município de Luís Antônio, na região administrativa de Ribeirão Preto. Em todas essas localidades há um potencial anual de produção de resíduos silvestres de $357,90 \times 10^3$ a $954,20 \times 10^3$ t, sendo o suficiente para a produção de $0,706 \times 10^3$ a $1,884 \times 10^3$ bpd de combustíveis sintéticos, todavia, havendo interesse somente em capacidades produtivas superiores a

$1,00 \times 10^3$ bpd, cujos FE poderão ser 0,56 ou 0,57, podendo o TCI variar do mínimo estabelecido de US\$ 214,90 x 10^6 até o limite de US\$ 297,70 x 10^6 ; e

c. No estado de Minas Gerais (MG), na região conhecida como Rio Doce, nos municípios de Peçanha e Antônio Dias; e também na região conhecida como Alto Paranaíba, no oeste do estado, no município de Estrela do Sul, estando estas áreas localizadas na mesma faixa de potencial de produção de resíduos silvestres que as regiões supracitadas no estado de São Paulo (SP).

3.4.5 Região Sul

A região Sul é aquela com o menor território do Brasil, segundo o IBGE possui uma área de $0,576409 \times 10^6$ km², formada por três estados, sendo a única a se localizar fora da zona tropical, cujo relevo alterna entre planaltos, florestas e campos. Na figura (3.13), abaixo, estão indicadas as principais áreas da região Sul com potencial para geração resíduos de biomassa lignocelulósica oriunda de processos industriais, distribuídas em:

a. No estado do Paraná (PR), na mesorregião metropolitana de Curitiba e em seu centro oriental, nas cercanias da Serra de Paranapiacaba, nos municípios de Cerro Azul, Doutor Ulysses e Senges; nos municípios de Arapoti, Tibagi, Cândido de Abreu na região centro-norte; na região sudeste do Paraná (PR), no município de General Carneiro e na região centro-sul, no município da Lapa. Nessas regiões, o potencial anual de produção de resíduos silvestres pode variar de $477,20 \times 10^3$ a $1.192,80 \times 10^3$ t, proporcionando uma produção de $0,947 \times 10^3$ a $2,355 \times 10^3$ bpd de combustíveis sintéticos, entretanto, havendo interesse somente em capacidades produtivas superiores a $1,00 \times 10^3$ bpd, cujos FE poderão ser 0,56 ou 0,57, ter-se-ão valores de TCI variando do mínimo estabelecido de US\$ 214,90 x 10^6 até o limite dessas regiões de US\$ 338,10 x 10^6 ;

b. No estado de Santa Catarina (SC), na região meio-oeste, no município de Caçador; e na região da serra, nos municípios de Bocaina do Sul, Otacílio Costa e Palmeira, cujas capacidades anuais de produção de resíduos silvestres são as mesmas apresentadas acima para o estado do Paraná (PR); e

c. No estado do Rio Grande do Sul (RS), no município de Cambará do Sul, na região nordeste do estado; no município de Vale Verde, na região metropolitana de Curitiba;

e na região sudeste, no município de Jaguarão. Da mesma forma como no estado de Santa Catarina (SC), as ofertas nominais anuais de resíduos silvestres neste estado também variam conforme aquelas apresentadas para o estado do Paraná (PR).

Figura 3.12 Potencial brasileiro de oferta de resíduos florestais – Região Sul.

Fonte: (Adaptado do Atlas de Energia do Brasil, 2012).

3.5 Aspectos gerais das florestas energéticas

Ao realizar simples considerações a respeito do TCI de plantas que operem pela rota BTL, baseando-se unicamente na oferta brasileira disponível de resíduo silvestres oriundos de processos industriais, é possível verificar que os volumes de biomassa lignocelulósica disponíveis (e apenas eles) são insuficientes para produzir um volume de líquidos Fischer-Tropsch (expresso em bpd) em plantas que se beneficiem da economia de escala em território brasileiro, como pode ser observado na tabela (3.2) adiante. As considerações feitas abrangem somente os resíduos silvestres *in natura*, isentos de qualquer processo de transformação para

adensamento, transporte ou estocagem. Nota-se que, observando o critério escolhido para a análise – e somente ele –, as capacidades produtivas de eventuais complexos industriais não atingem, ou sequer se aproximam, de um valor tido como ideal ($34,00 \times 10^3$ bpd) conforme observado no gráfico (3.13), uma vez que seus FE variam entre 0,50 e 0,60, o que, segundo Boerrigter (2006), as posiciona no patamar de plantas de pequena escala, ocasionando valores elevados para seus TCI e tornando por demais dispendiosos os investimentos.

Tabela 3.2 – Panorama brasileiro: Resíduos de biomassa e TCI estimado (US\$).

Fonte: (Elaboração própria).

Brasil	Máximo de Resíduos de Biomassa (ton/ano)	Produção Máxima de Líquidos FT (bpd)	TCI Estimado (US\$)
Região Norte	$\approx 0,71 \times 10^6$	1.413	$\approx 261,00 \times 10^6$
Região Nordeste	$\approx 2,40 \times 10^6$	4.710	$\approx 473,00 \times 10^6$
Região Centro-Oeste	$\approx 2,40 \times 10^6$	4.710	$\approx 473,00 \times 10^6$
Região Sudeste	$\approx 1,90 \times 10^6$	3.768	$\approx 423,00 \times 10^6$
Região Sul	$\approx 1,20 \times 10^6$	2.355	$\approx 338,00 \times 10^6$

Diante desse cenário, segundo proposições de Andre Faaij,²⁹ consultor do Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), dentre outros órgão internacionais, e atual analista de sistemas energéticos e diretor da divisão Energy & Resources Unit do Copernicus Institute for Sustainable Development da Universidade de Utrecht, Holanda, autoridade de reconhecimento global na utilização de resíduos de biomassa para produção de energia, por ocasião da I Conferência Internacional de Biocombustíveis, realizada em maio de 2010 nas dependências da Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP), no que tange a possibilidade da construção de uma ou mais plantas BTL no Brasil, o mesmo sugere que se faça uso de biomassa lignocelulósica destinada à exclusiva produção de energia através do emprego de briquetes ou *pellets* de madeira, ou seja, além da utilização de resíduos silvestres disponíveis de origens diversas, que haja uma complementação com matéria-prima planejada e orientada para ser aplicada na gaseificação do processo BTL. Essa proposição, explicou Faaij, acarreta na utilização das assim chamadas, Florestas Energéticas, que consistem em áreas planejadas cuja espécies vegetais plantadas são destinadas unicamente ao abastecimento energético. Segundo o Centro Nacional de Referência em

²⁹ FAAIJ, André P.C. São Paulo, Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado, maio de 2010. Entrevista a Aires Duarte, São Paulo, 2010.

Biomassa (CENBIO) e o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), o termo passou a ser utilizado durante a década de 1980 para designar culturas destinadas à produção de biomassa florestal, lenha e carvão, objetivando mitigar o desmatamento incidente sobre florestas naturais; tais culturas consistem em extensas áreas com grande número de árvores plantadas por hectare ($1 \text{ ha} = 10,00 \times 10^3 \text{ m}^2$), com um curto ciclo de plantio, maximizando o volume de biomassa lignocelulósica disponível num menor espaço de tempo (informação online)³⁰.

Dentro do contexto brasileiro, a utilização da madeira como fonte de energia, orientada para a produção de biocombustíveis sintéticos, poderia implicar em uma diminuição da dependência energética externa e um aumento na segurança no que tange o suprimento da demanda por combustíveis veiculares, além de proporcionar uma matriz energética ambientalmente menos danosa. É recente que a madeira deixou de ser a principal fonte de energia primário no Brasil – essa mudança teve início nos anos da década de 1950 com a expansão do mercado petrolífero e com o desenvolvimento do setor hidrelétrico, causando um decréscimo na utilização da madeira para fins energéticos. Por mais de 450 anos, a lenha foi a mais importante fonte de energia primária no Brasil; no ano de 1941, conforme aponta Lima e Bajay (2000), a madeira correspondia a 75% da energia consumida no país, decrescendo para 50% em 1953, 43% no ano de 1963, 16% em 1963 e, até baixar para menos de 10% em 1998 – esses valores evidenciam uma diminuição da participação da madeira no cenário energético brasileiro. Durante os anos da década de 1990, o consumo mundial de madeira atingiu a marca de $3,30 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. Segundo o Food and Agriculture Organization on the United Nations (FAO)³¹, dados de 2002, as florestas no mundo são responsáveis pela cobertura de, aproximadamente, $39,00 \times 10^6 \text{ km}^2$ sendo que, cerca de $37,00 \times 10^6 \text{ km}^2$ são de florestas nativas e $1,87 \times 10^6 \text{ km}^2$ de florestas plantadas. O abastecimento de matéria lignocelulósica no mundo, em sua maior parte (65%), provém de florestas naturais – o Brasil possui cerca de $50,00 \times 10^3 \text{ km}^2$ de florestas plantadas, sendo 64% constituídas, basicamente, de eucaliptos para uso industrial, presentes em mais de 500 municípios brasileiros; essas plantações de eucalipto são responsáveis por suprir um terço da demanda total de madeira, cujo consumo anual situa-se em cerca de $300,00 \times 10^6 \text{ m}^3$ sendo que, desse total, apenas 6% são atribuídos à indústria de papel e celulose que faz uso de florestas plantadas. No começo dos século XXI o consumo de madeira, por parte das indústrias brasileiras, foi estimado em $166,00 \times 10^6 \text{ m}^3$,

³⁰ CENBIO <<http://cenbio.iee.usp.br>> Acesso em 12 de março de 2013; SEBRAE <<http://sebrae.com.br>> Acesso em 12 de março de 2013.

³¹ FAO <<http://www.fao.org/home/en/>> Acesso em 15 de março de 2013.

sendo $32,00 \times 10^6 \text{ m}^3$ para papel e celulose; $45,00 \times 10^6 \text{ m}^3$ para produção de carvão vegetal; $29,00 \times 10^6 \text{ m}^3$ para lenha industrial e $60,00 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a indústrias de manufaturados como painéis, laminados, etc. – a presença de florestas plantadas tem aumentado nas últimas décadas, principalmente no setor de papel e celulose e para obtenção de carvão vegetal (de 34% para 72% da década de 1990 para 2000). Foi criado pelo Decreto nº 3.420, de 20 de abril de 2000, o Programa Nacional de Florestas (PNF), cujo objetivo é o de articular políticas públicas setoriais que promovam o desenvolvimento sustentável conciliado ao uso e à conversão das florestas que se encontram em território brasileiro. A princípio o MMA ocupou a posição de órgão articulador, sendo substituído pelo Departamento de Florestas (DFLOR) com a publicação do Decreto nº 6.101 de 26 de abril de 2007. Dentre as principais atribuições previstas no PNF, as de maior interesse para essa pesquisa são (1) incentivar e zelar pelo uso sustentável de novas florestas, assim como de florestas nativas; (2) fomentar a prática do reflorestamento; (3) promover a utilização sustentável de florestas de produção, ou seja, voltadas para a indústria; e (4) estimular a proteção dos ecossistemas florestais dentre outras atividades (informação online)³². Frente à possibilidade de se aumentar a oferta de madeira de florestas plantadas³³, destinadas ao suporte de projetos que envolvam a produção de líquidos Fischer-Tropsch, é de extrema relevância introduzir e aperfeiçoar técnicas de engenharia florestal e genética que contribuam de forma adequada para o aumento da produtividade e melhoria das plantações, capaz de lhes conferir sustentabilidade e reduzir os prejuízos ao meio ambiente e sociedade, transformando assim, a biomassa lignocelulósica em uma matéria-prima de alta qualidade, visando seu emprego para uma refinada geração de energia.

Dessa forma, cria-se uma perspectiva ambiental sustentável já que a maior parte da madeira do vegetal é dedicada exclusivamente ao processo energético que se destina – e não somente 50% daquela advinda das toras, conforme observado anteriormente – deixando galhos e folhas no local de extração, podendo também contribuir com a recuperação de solos degradados. Se empregadas para a produção de briquetes de biomassa para obtenção de gás de síntese (uma utilização mais refinada que sua transformação em lenha ou carvão) as florestas energéticas poderão significar a alavancagem necessária, em termos de volume de matéria-

³² Material extraído do website Florestas Energéticas. <<http://www.florestasenergeticas.cnptia.embrapa.br/descricao/projeto-componente-02/>> Acesso em 22 de junho de 2010.

³³ Para detalhes sobre madeira plantada destinada a fins energéticos, a bibliografia recomendada é a tese “Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para estimação do consumo” de autoria de Alexandre Uhlig, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) da Universidade de São Paulo (USP); e também da apresentação “Energia através dos dejetos da biomassa” de autoria de Javier Farago Escobar, disponível no endereço <http://http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/erechim2012_escobar.pdf>

prima, que as plantas que operem pela rota BTL necessitam para atingir uma economia de escala ótima, beneficiando-se da mesma.

4 CHOREN INDUSTRIE-TECHNIK GMBH

Fossil fuels are not only finite, their use is detrimental to the climate – what to do? The fact that our oil reserves will be fully depleted in the not too distant future coupled with our environmental obligation to act now before it is too late demands a fundamentally new approach to satisfying our energy and petrochemical needs. The crucial issue in this new approach is to find a substitute for crude oil. Incident energy from the sun heats our planet but may also be bound in the form of photosynthesis derived chemical energy. The simultaneous day time warming and night time cooling of the earth yields the status quo to maintain the crucial ambient temperature to support life as we know it.

(Bodo Wolf)

Neste estágio da pesquisa, muitas das informações foram obtidas por canais informais, através de material não publicado advindo de agentes colaboradores e também conversas trocadas por correio eletrônico, sendo que parte deste material será considerada *off-the-records*, ou seja, informações cuja procedência não poderá ser mencionada a pedido dos próprios agentes colaboradores, carecendo assim de uma fonte formal para consulta.

4.1 Apresentando a CHOREN Industrietechnik GmbH

A empresa alemã CHOREN está localizada no coração tecnológico e minerador da cidade de Freiberga (*Freiberg*, em alemão), no distrito homônimo no Estado Livre da Saxônia, região leste da Alemanha onde, a princípio, em centros de processamento e gaseificação de carvão, pesquisas com biomassa lignocelulósica, isto é, madeira, têm sido desenvolvidas e que, desde o ano de 1998 até o ano de 2012, operou uma planta piloto de conversão dessa biomassa sólida em óleo diesel sintético através de um pequeno complexo industrial que operava pela rota tecnológica *Biomass-to-Liquids* (BTL).

A CHOREN é uma empresa de capital privado, fundada em 1990, pelo Dr. Bodo M. Wolf, CEO, três membros do Deutscher Brennstoff Institut – DBI (Instituto de Combustão

Alemão) e fruto do esforço conjunto de 140 pesquisadores. Em 1997, iniciou-se seu foco em gaseificação de biomassa lignocelulósica, construindo, em Freiberga, no ano seguinte, uma planta-piloto (α -plant), figura (4.1), *brownfield*, de 1MW_{th} , utilizando ar como agente gaseificador para suas pesquisas; no ano 2000, a CHOREN Industrietechnik GmbH foi fundada, em parceria com a multinacional Royal Dutch Shell, contando também com as empresas alemãs Daimler AG e Volkswagen como acionistas minoritárias, empregando mais de 200 colaboradores. Em 2002, uma segunda planta de gaseificação foi inaugurada, a planta-beta (β -plant), figura (4.2), de 45MW_{th} , *greenfield*, utilizando oxigênio (O_2) como agente gaseificador a partir de 2007, com uma capacidade nominal de produção próxima de $17,585 \times 10^6\text{ dm}^3$ de líquidos Fischer-Tropsch ao ano, equivalente a $0,307 \times 10^3\text{ bpd}$. Uma terceira unidade produtiva, similar à planta-beta (β -plant), constava nos planos da CHOREN Industrietechnik GmbH, esta porém em escala comercial, a planta-sigma (Σ -plant), de 600MW_{th} , *greenfield* ou *brownfield*, cuja capacidade produtiva nominal planejada se aproximaria de $234,467 \times 10^6\text{ dm}^3$ de líquidos Fischer-Tropsch ao ano, equivalente a dizer $4,096 \times 10^3\text{ bpd}$, cujo quadro de colaboradores previsto seria de 850 num primeiro estágio. O início de sua construção era desejada para o ano de 2005, contudo atrasos gerados pelo início das operações da planta-beta (β -plant) fizeram com que sequer fosse iniciada – o local necessário para a construção do possível complexo industrial ainda estava em planejamento: o mesmo poderia requerer de $6\text{ a }20 \times 10^3\text{ m}^2$ (6 a 20 ha) sendo que a planta em si ocuparia $2 \times 10^3\text{ m}^2$ (2 ha). Dada a limitação de informação sobre a planta-sigma (Σ -plant), é de interesse para este capítulo os aspectos gerais que orbitaram a planta-beta (β -plant) até seu fechamento.

Figura 4.1 Planta-alfa (α -plant).

Fonte: (fonte informal)¹.

Figura 4.2 Planta-beta (β -plant).

Fonte: (fonte informal)¹.

¹ CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

Há três destacadas divisões no que tange os objetivos e estratégias da empresa, sendo: (a) o suprimento de seu principal produto, o biocombustível sintético batizado de SunDiesel®, para veículos equipados com motores diesel; (b) a modificação dos motores do ciclo diesel, em cooperação com a indústria automobilística local, para melhor explorar o potencial dos biocombustíveis denominados *designer fuels*, tornando-os assim veículos mais econômicos e menos poluidores; e (c) uma tecnologia inovadora em células a combustível – esta última não será abordada nessa pesquisa (CHOREN Industries, 2007). A planta-beta (β -plant), observada na figura (4.1) anteriormente, pode ser dividida, de forma simplificada porém didática, em oito setores de maior interesse, conforme figura (4.3):

1. Recebimento e acondicionamento da biomassa lignocelulósica;
2. Armazenamento da biomassa lignocelulósica;
3. Secador da biomassa lignocelulósica;
4. Produção do gás de síntese (*biosyngas*) pelo gaseificador Carbo-V®;
5. Estação de geração de força;
6. Condicionamento do gás de síntese (*biosyngas*) e unidade Fischer-Tropsch;
7. Unidade do compressor; e
8. Estoque de gás.

Figura 4.3 CHOREN Industries GmbH – Planta-Beta (β -plant).

Fonte: (fonte informal)².

² CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

A construção e operação da planta-beta (β -plant) demandou um significativo aumento de pessoal qualificado e treinado para tal, sendo que 70 deles já haviam estado envolvidos com o funcionamento da planta-alfa (α -plant), precisando os demais serem contratados para posições operacionais específicas, como maquinistas, técnicos laboratoriais, soldadores e especialistas em manutenção e mecatrônica. Dado o fato de a planta-beta (β -plant) ter sido a primeira no mundo a operar pela rota BTL – o que demandou quase dois anos na escolha de seu principal parceiro comercial, a Royal Dutch Shell, detentora da tecnologia Fischer-Tropsch – objetivando-se a produção de óleo diesel sintético – foram necessários quase doze meses de preparo do pessoal operacional, com ênfase na fundamentação teórica do processo, juntamente com treinamentos de segurança e práticas de refino em uma unidade da empresa Royal Dutch Shell na cidade de Colônia, oeste da Alemanha. O advento da CHOREN Industrietechnik GmbH levou algumas universidades alemãs, em particular a Technische Universität Bergakademie Freiberg, a desenvolverem pesquisas em favor da exploração energética da biomassa lignocelulósica, da otimização dos processos de combustão, dos dispositivos de reduzida emissão de carbono dentre outros objetivos de igual relevância.

Parte da contribuição, e talvez a mais significativa delas, para a produção e pesquisas em prol dos líquidos Fischer-Tropsch a partir de biomassa lignocelulósica e, conseqüentemente, em favorecimento dos biocombustíveis sintéticos, foi o processo de gaseificação em três estágio desenvolvido pela CHOREN Industrietechnik GmbH e empregado na sua planta-beta (β -plant), processo esse batizado de Carbo-V®, cujos aspectos mais gerais serão vistos adiante – deve-se ressaltar que, de forma simplificada, as etapas de limpeza do gás de síntese (*syngas*), o hidrocraqueamento e a síntese Fischer-Tropsch (apesar de complexa e ainda carente de um completo entendimento em aspectos técnicos pontuais), são processos amplamente estudados e empregados há décadas para a produção de hidrocarbonetos a partir do gás de síntese (*syngas*), o que contribui para o direcionamento das atenções se fazerem valer, no caso da rota BTL, sobre o processo de gaseificação da madeira.

Conforme apresentado no evento 2nd European Summer School on Renewable Motor Fuel em 2007, na Polônia, no começo, os componentes considerados como inovadores do processo de gaseificação Carbo-V® foram construídos e testados para funcionarem em uma planta piloto de gaseificação de carvão, a planta-alfa (α -plant), como parte de um projeto de pesquisa que envolvia a construção de um gaseificador de $1,00 \times 10^5$ Pa (1 bar), de baixa temperatura (550 °C), figura (4.4), adiante, para que, posteriormente, com base em seu molde, uma unidade de gaseificação de biomassa, de $5,00 \times 10^5$ Pa (5 bar), também de baixa temperatura, fosse instalada na planta-beta (β -plant), figura (4.5), adiante:

Figura 4.4 Gaseificador (α -plant).

Fonte: (fonte informal)³.

Figura 4.5 Gaseificador (β -plant).

Fonte: (fonte informal)³.

Para dar continuidade à construção do complexo industrial – após a instalação das unidades de limpeza e remoção de material particulado do gás de síntese – no que tange a unidade de síntese Fischer-Tropsch, foram necessários quase dois anos para a escolha dos parceiros comerciais e para a aprovação dos financiamentos e assim, em meados de 2005, iniciou-se a instalação do reator Fischer-Tropsch, figura (4.6), abaixo:

Figura 4.6 Reator multi-tubular Fischer-Tropsch (β -plant).

Fonte: (informação online)⁴.

No que diz respeito ao histórico das obras da planta-beta (β -plant) são apresentados, a seguir, alguns dos eventos, em ordem cronológica, de maior relevância no decorrer da história

³ CHOREN Industries – Kathrin Biernet, 2nd European Summer School on Renewable Motor Fuel, Poland, 2007.

⁴ European Biofuels – Technology Platform, disponível em <<http://www.biofuelstp.eu/btl.html#choren>> Acesso em 13 de março de 2012.

de sua construção, desde sua concepção com a planta-alfa (α -plant), passando pelos testes pré-operatórios, até seu inesperado fechamento, por insolvência, no começo do ano de 2012.

- 1995 Tem início o processo de criação da patente para o processo de gaseificação em três estágios conhecido Carbo-V®;
- 1997-1998 Período de construção de uma planta-piloto (α -plant) de 1MW_{th} para testar a tecnologia de gaseificação Carbo-V®, figura (4.7);

Figura 4.7 Planta-alfa (α -plant) em construção.

Fonte: (fonte informal)⁵.

- 1998-2001 Diversos testes foram perpetrados com uma grande variedade de matérias-primas (madeira reciclada, resíduos orgânicos, palha, biomassa florestal, etc.);
- 2001 Produzidos os primeiros volumes de líquidos Fischer-Tropsch a partir de gás de síntese (*syngas*), advindo de biomassa lignocelulósica, em escala laboratorial;
- 28.Nov.2002 Iniciada a construção, em Freiberga, Alemanha, da planta-beta (β -plant) e as unidades-chave de processamento para o processo de gaseificação de biomassa em baixas e altas temperaturas;
- Abr.2003 Primeiros testes para a produção de metanol (CH_3OH) a partir de gás de síntese (*syngas*) obtido da biomassa lignocelulósica;

⁵ CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

- Mai.2003 Produzidos $11 \times 10^3 \text{ dm}^3$ de metanol (CH_3OH), completando, com sucesso, o programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D);
- Jun.2003 Produzidos os primeiros volumes de líquidos Fischer-Tropsch a partir de gás de síntese advindo de biomassa lignocelulósica (*biosyngas*).
- Sep.2003 Finalizadas as obras na planta-beta (β -plant) no que diz respeito às estruturas de suporte (ilha) do gaseificador de biomassa, figura (4.8);

Figura 4.8 Planta-beta (β -plant) em construção.

Fonte: (fonte informal)⁶.

- 2004 Realizados os primeiros testes na indústria automotiva, responsabilidade das empresas Volkswagen e a até então DaimlerChrysler AG;
- 22.Nov.2004 Testes operacionais com parte da planta-beta (β -plant) são finalizados;
- 04.Mai.2005 Iniciado, junto ao distrito administrativo da cidade alemã de Chemnitz, no Estado Livre da Saxônia, o processo para aprovação parcial e tomada de decisões em relação à construção/operação da planta-beta (β -plant) para a construção da unidade de síntese e manufatura do óleo diesel sintético;
- 17.Ago.2005 São assinados os acordos de cooperação com a empresa Shell Deutschland Oil GmbH e com a Shell Global Solutions International, subsidiárias da Royal Dutch Shell, para provisão da tecnologia SMDS® referente à síntese Fischer-Tropsch e para venda de produtos BTL.

⁶ CHOREN Industries – Kathrin Biernert, 2nd European Summer School on Renewable Motor Fuel, Poland, 2007.

Dados os padrões de segurança exigidos pela Shell Deutschland Oil GmbH, novas obras precisaram ser realizadas, acarretando em atrasos para o início das operações;

Dez.2005 Finalizada a construção dos três silos de armazenamento de biomassa lignocelulósica com capacidade de $2,00 \times 10^3 \text{ m}^3$ cada um, figura (4.9);

Figura 4.9 Silo de estocagem de biomassa.

Fonte: (informação online)⁷.

2006 Finda-se o período de operação da planta-alta (α -plant): 1998-2006;

Jun.2006 Início da engenharia avançada para limpeza e condicionamento do gás de síntese (*biosyngas*) e síntese Fischer-Tropsch, com os sistemas auxiliares, em uma parceria entre CHOREN Industrietechnik GmbH, a Shell Deutschland Oil GmbH e a companhia alemã de engenharia EDL Anlagenbau Gesellschaft;

Ago.2006 Finalizadas as fundições para o reator de síntese e iniciadas as obras para as superestruturas metálicas e planejamento logístico da matéria-prima;

28.Set.2006 Posicionamento de parte do equipamento sobre as estruturas metálicas para a unidade de síntese;

22.Dez.2006 Posicionamento do reator Fischer-Tropsch no quadrante de síntese e finalizações mecânicas no gaseificador Carbo-V®;

Mai.2007 Terminado o tanque para armazenamento do combustível a ser produzido;

Jun.2007 Qualificação dos colaboradores seniores finalizada;

⁷ Helix Plant Systems, disponível em <<http://plant-systems.com/de/content/system-elata-117/>> Acesso em 13 de julho de 2012.

- 27.Jul.2007 Comemorados os 365 dias sem acidentes e as 425×10^3 horas trabalhadas;
- Ago.2007 Instalação dos principais equipamentos concluída;
- Dez.2007 Finalizada a instalação da rede de dutos e preparativos para operação;
- Abr.2008 Cerimônia oficial celebra o início das atividades, contando com a presença da chanceler da Alemanha, Angela Merkel, e do diretor de *downstream* da Royal Dutch Shell, Rob Routs. Até esse ponto a CHOREN Industrietechnik GmbH já contava com 150 fornecedores;
- Mai.2008 A planta-beta (β -plant) produz suas primeiras amostras de óleo diesel sintético, batizado de SunDiesel® pelos parceiros comerciais Daimler AG e Volkswagen, responsáveis pelos testes com o combustível e pelo *marketing*;
- 2009 O empresário e consultor sobre indústria energética Robert Rapier (MD) aceita o cargo de chefe da Divisão de Tecnologia e aponta as dificuldades na ampliação das novas tecnologias empregadas, assim como o tempo que eventualmente poderia ser necessário para o seu redimensionamento e sua viabilidade financeira;
- 2009-2010 A empresa começou um longo processo de comissionamento para o complexo de gaseificação de biomassa; não havia precedentes para a operação de um gaseificador de biomassa daquele tipo e porte. Foi preciso interromper suas atividades, dando início a um período de instabilidade econômica. Até esse ponto a CHOREN Industrietechnik GmbH já contava com 290 colaboradores;
- 2010-2011 Nesse período a planta-beta (β -plant) produziu quantidades limitadas de SunDiesel®, para o qual, ela não construiu sua rede de distribuição, vendendo combustível para a Shell Deutschland Oil GmbH;
- Jun.2011 Por não utilizar fundos governamentais, os investidores privados é que arcavam com os gastos do complexo industrial nos últimos anos; muitos deles, como a Shell Deutschland Oil GmbH, optaram por finalizar sua parceria dado o tempo que seria necessário para lidar com os ajustes técnicos necessários – o processo de comissionamento estava demorando muito mais que o previsto, culminando quando todos os parceiros comerciais interromperam seus investimentos. A CHOREN Industrietechnik GmbH, incapaz de arcar com suas dívidas, declarou então insolvência;
- Out.2011 A divisão de manufatura de equipamentos, a CHOREN Equipaments GmbH, responsável pela construção do gaseificador de biomassa, centro da tecnologia Carbo-V®, foi a primeira a ter seus ativos vendidos, tendo ela passado para a

administração da empresa alemã Thermische Apparat Freiberg GmbH (TAF), mantendo apenas seu gestor original, Sr. Jonas Kappeler, figura (4.10);

Figura 4.10 CHOREN Components GmbH.

Fonte: (fonte informal)⁸.

09.Fev.2012 A tecnologia de gaseificação Carbo-V® foi vendida para a gigante alemã Linde Engineering Dresden GmbH, do grupo Linde AG. As atividades da planta-beta (β -plant) foram completamente encerradas e a mesma permanece fechada, sem previsão de retomar suas operações.

A seguir, é possível observar, em termos de números, alguns dos recursos empregados para a construção da planta-beta (β -plant), como componentes e material de construção:

1. Material de construção empregado:

$7,90 \times 10^3 \text{ m}^3$ de concreto;	$5,00 \times 10^3 \text{ m}$ de armações metálicas;
$3,30 \times 10^3 \text{ kg}$ de aço;	$57,0 \times 10^3 \text{ m}$ de cabos de eletricidade;
$31,5 \times 10^3 \text{ m}$ de tubulações;	$165 \times 10^3 \text{ m}$ de cabeamento de linhas de controle.

2. Componentes primários num total de 916 unidades, sendo que 180 desses foram projetados e manufaturados pela CHOREN Components GmbH:

⁸ CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

584 componentes para a manufatura do gás de síntese (*biosyngas*), sendo:

- 31 trocadores de calor;
- 35 compressores e ventiladores;
- 62 bombas;
- 93 esteiras para transporte;
- 363 tanques, reatores e itens diversos.

332 componentes para a síntese do combustível e melhoramento (*upgrading*), sendo:

- 18 compressores e ventiladores;
- 60 bombas;
- 73 trocadores de calor;
- 181 tanques, reatores e itens diversos.

No que diz respeito aos planos para a tecnologia Carbo-V®, pode-se observar pelo trecho abaixo, em itálico, retirado da troca de mensagens particulares por correio eletrônico cuja fonte preferiu permanecer anônima, que seu destino não mais está associado ao da planta-beta (β -plant) o que, por si só, poderá gerar promissoras possibilidades para o futuro da gaseificação de biomassa, contudo, lamentavelmente, posiciona o complexo industrial da CHOREN Industrietechnik GmbH, sem o seu principal avanço tecnológico, numa incerteza ainda maior. A venda das estruturas e equipamentos foi anunciada em julho de 2012, pela Niagara Worldwide, localizada em Niagara, Wisconsin, EUA, empresa do ramo de aquisição e negociações de complexos industriais e liquidações de estruturas fabris. Muitos dos equipamentos são anunciados como sendo novos ou com menos de dois anos de uso e podem ser adquiridos separadamente ou como parte dos laboratórios ou de toda a planta-beta (β -plant) – é válido destacar que o maquinário responsável pela síntese Fischer-Tropsch pertence à Shell Deutschland Oil GmbH, não integrando os ativos no processo de insolvência.

“[...] all operations at the Beta plant are stopped due to the insolvency. Therefore any studies at the plant can not be initiated by us, the Carbo V technology owner and would not make much sense, as the plant is not in operation. Linde has taken over the Carbo V technology to get it marketable, which will take its time but without the Beta plant asset itself. [...]”

Em conversa com Claes Tullin⁹, pesquisador do SP Technical Research Institute of Sweden e membro da delegação sueca da International Energy Agency (IEA), em junho de 2012, por ocasião do II Encontro Internacional em Resíduos Sólidos e seus Impactos Socioambientais: Experiências Européias na Gestão de Resíduos, nas dependências da Universidade de São Paulo (USP), *campus* capital, o mesmo, ao comentar sobre as perspectivas que circundam os investimentos de complexos industriais nos moldes da planta-beta (β -plant) da CHOREN Industrietechnik GmbH, afirmou que há uma grande necessidade de subsídios, apontando que a participação governamental é deveras relevante, de suma importância, quando projetos referentes à utilização de biomassa são pretendidos, ainda mais quando se tratam de melhorias em processos já existentes ou novas tecnologias.

4.2 Principais estágios da planta-beta (β -plant)

Apesar de a iniciativa da CHOREN Industrietechnik GmbH em produzir óleo diesel sintético em escala comercial não tenha se concretizado como o esperado, ela acabou por legar importantes contribuições referentes à rota tecnológica *Biomass-to-Liquids*, especialmente no que diz respeito ao processo de gaseificação da biomassa. Conforme a figura (3.2), observada no capítulo anterior, ter-se-á uma abordagem sobre os três principais estágios em que se divide o processo de obtenção do óleo diesel sintético: (1) operações relacionadas à disponibilização da matéria-prima; (2) a transformação dessa matéria-prima em gás de síntese (*biosyngas*) através do processo de gaseificação Carbo-V®; e (3) a utilização da síntese Fischer-Tropsch para a conversão do gás de síntese (*biosyngas*) em hidrocarbonetos líquidos e posterior beneficiamento do óleo diesel sintético.

4.2.1 Primeiro Estágio: O preparo da biomassa lignocelulósica

A cadeia produtiva do óleo diesel sintético SunDiesel® – e, naturalmente, a da rota tecnológica *Biomass-to-Liquids* – principia-se com o planejamento acerca da biomassa a ser

⁹ TULLIN, Claes. São Paulo, Universidade de São Paulo, junho de 2012. Entrevista a Aires Duarte, São Paulo, 2012.

utilizada que, nesse caso, é a biomassa lignocelulósica: madeira advinda de resíduos florestais de baixa qualidade e também, em menor quantidade, de madeira reciclada descontaminada. A maior parte desses resíduos é recolhida nas margens das grandes estradas da região leste da Alemanha, mais especificamente no Estado Livre da Saxônia, pela Sachsenforst, a corporação estatal de gerenciamento florestal interativo e consultoria estratégica em culturas silvestres – é válido destacar que há um considerável potencial para geração de oportunidades para a agricultura em geral que, um dia, poderá se tornar uma das principais fontes de fornecimento de resíduos, nesse caso, agrícolas, para processos de gaseificação de biomassa. Após a coleta da biomassa *in natura*, empresas terceirizadas encarregavam-se também de sua logística, transportando-a para grandes centrais de estocagem onde lá ficava, por meses, secando ao ar livre, até seu teor de umidade se tornar inferior a 35%, para um posterior dimensionamento no formato cavacos de madeira ($\approx 120 \times 50 \times 30 \text{ mm}$). Uma vez, devidamente condicionada e livre de detritos metálicos e rochas, a biomassa seguia em caminhões para ser descarregada e armazenada em três grandes silos com capacidade para $2,00 \times 10^3 \text{ m}^3$ cada. Para a CHOREN Industrietechnik GmbH o emprego dos resíduos florestais representava apenas o primeiro passo do aproveitamento da biomassa vegetal na planta-beta (β -plant), reservando para outros projetos industriais e para as próximas gerações de biocombustíveis sintéticos, outras matérias-prima igualmente promissoras, como a palha, poderiam ser aproveitadas e, com o passar dos anos, a tendência seria de que a maior parte da biomassa pudesse ser suprida por culturas dedicadas que fossem planejadas e controladas para otimização de todo o processo de conversão, conforme gráfico (4.1) a seguir – reforçando a tendência mencionada pelo Dr. Andre Faiij sobre a utilização de florestas energéticas.

Gráfico 4.1 Perspectiva do uso de matéria-prima na planta-beta (β -plant).

Fonte: (Adaptado; fonte informal)¹⁰.

¹⁰ CHOREN Biomass GmbH – Michael Deutmeyer, CHOREN Biomass Manager, Hamburg, 2009.

É possível observar a evolução esperada que as diferentes variedades de biomassa vegetal, expressas em milhares de bdt (*bone dry ton* que, dentre muitos, é um fator de conversão de biomassa equivalente $1,88 \times 10^3$ kg, no original $2,00 \times 10^3$ lb, de cavacos de madeira isenta de umidade), poderiam assumir com o decorrer do tempo e conforme um detalhado planejamento de abastecimento da planta-beta (β -plant). Alguns estudos apontavam que se apenas 10% das terras não cultivadas disponíveis na Alemanha, cerca de $1,20 \times 10^{10}$ m² ($1,20 \times 10^6$ ha), fossem utilizadas para o cultivo de espécies vegetais de rápido crescimento como o gênero *populus* e espécies *willow* do gênero *salix*, a cada três anos seria possível realizar a colheita da madeira para a produção de cerca de $4,00 \times 10^6$ dm³ de SunDiesel® o que poderia suprir quase que 13% do total da demanda alemã por óleo diesel (CHOREN Industries, 2007).

4.2.2 Segundo Estágio: O processo de gaseificação Carbo-V®

The Choren technology works, as demonstrated by years of run time at a smaller scale. But as I always warn people, scale-up issues can take some time to work through. When you first start up, there are a hundred little problems. You shut down, fix them, and restart to find there are still a dozen problems. You continue this process until all of the problems are solved, and then comes the challenge of running reliably for an extended period of time.

(Robert Rapier)

A segunda etapa da rota tecnológica *Biomass-to-Liquids* é o processo de gaseificação da biomassa vegetal, etapa esta crucial e de grande complexidade. Não é pretendida uma revisão dos aspectos que envolvem esse processo, contudo algumas linhas serão importantes antes da apresentação do processo de gaseificação Carbo-V®. É indicado por muitos autores, dentre eles, Probst e Hicks (1982), Klass (1998), Hamelink et al. (2003), Bridgwater apud Sales; Andrade e Lora (2005) que a gaseificação é um processo de conversão térmica, uma vez que os processos de degradação térmica são aqueles que oferecem os meios mais efetivos de conversão da energia armazenada na biomassa lignocelulósica, para fins desse estudo, em

uma mistura gasosa combustível, denominada gás bruto, precursor do gás de síntese (*biosyngas*), de composição variada em decorrência de diversos fatores como a natureza da biomassa empregada, as variáveis do processo e também do agente oxidante empregado, como ar comum ou oxigênio (O_2); a composição do gás bruto de gaseificação, comumente, apresenta teores de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), metano (CH_4) e outros hidrocarbonetos de baixo peso molecular, água em forma de vapor, substâncias voláteis advindas dos extrativos da madeira e também cinzas, alcatrão e material particulado. Outros fatores que ainda podem interferir na composição desse gás, afirma Apolinário (2006), são: o modelo do gaseificador que será utilizado, a forma como a energia térmica será fornecida e administrada no processo, a injeção ou não de vapor de água junto ao agente oxidante escolhido, o tempo de permanência da carga de biomassa lignocelulósica dentro do gaseificador, o sistema de coleta dos gases e dos demais subprodutos, dentre outros.

É indicado em Klass (1998) que, dentre os processos de gaseificação, três são os mais relevantes: a pirólise, a oxidação parcial e a gaseificação a vapor também chamada de reforma a vapor (empregada na rota tecnológica GTL) e que tanto a pirólise quanto a gaseificação e a combustão podem ocorrer simultaneamente dentro de um gaseificador. Em Andrade et al. (2007) é apontado que a conversão térmica da biomassa ocorrerá a partir de sua oxidação parcial em temperaturas que podem variar, comumente, de 500 a 1.100 °C, entretanto é válido destacar que nem todas as reações de gaseificação são conhecidas pela literatura até o momento. Ainda no que se refere às temperaturas de operação no leito do gaseificador, esta é um fator de grande importância, não somente para a qualidade do gás bruto gerado mas também para o bom funcionamento do reator, já que o mesmo, conforme a temperatura de funcionamento, pode colapsar em decorrência de fenômenos como a aglomeração e/ou sinterização. No que diz respeito à pressão, há dois tipos primordiais de gaseificadores: gaseificadores com reatores atmosféricos e reatores pressurizados.

No que diz respeito à dinâmica da gaseificação, é no interior do reator, em diferentes zonas, que ocorre a degradação térmica da biomassa lignocelulósica uma vez fornecida quantidades suficientes de energia e em contato com o oxigênio (O_2) do agente gaseificante, gerando reações exotérmicas; em seguida, segue-se a chamada fase de redução, onde ocorrem reações endotérmicas – as zonas podem variar de posição dentro do reator de acordo com os diferentes tipos e modelos industriais de gaseificadores adotados. É apontado em Melo (2008), Higman e Burgt (2003) e em um estudo realizado em 2002 pelo Centro Nacional de

Referência em Biomassa (CENBIO), algumas das principais reações que fazem parte do processo de gaseificação da biomassa, organizadas em cinco etapas distintas:

1. Primeira etapa: dá-se a decomposição térmica da biomassa lignocelulósica pelo processo da pirólise, podendo esta etapa ser representada, de forma esquemática, pela reação (4.1) adiante:

2. Segunda etapa: ocorre a oxidação do carbono presente na biomassa quando em contato com o oxigênio (O_2), presente no agente gaseificante, reações (4.2) a (4.4), liberando a energia térmica que será responsável pela volatilização de alguns componentes presentes no reator.

3. Terceira etapa: nesse ponto é onde ocorre a gaseificação propriamente dita, onde outras reações podem ser divididas em (a) heterogêneas, quando ocorrem entre componentes em fases diferentes e (b) homogêneas, quando ocorrem entre os componentes de uma mesma fase:

(a) Reações heterogêneas:

A reação (4.7), também denominada por reação de gás-azul ou reação carbono-vapor, ocorre ao se passar a água (H_2O), em forma de vapor, sobre o carvão incandescente, produzindo tal mistura quando a mesma é reduzida pelo carbono – reação favorecida em altas temperaturas por se tratar de uma reação endotérmica ($\Delta H = +131,00 \text{ MJ kmol}^{-1}$).

(b) Reações homogêneas:

A reação (4.8) é conhecida como *water gas shift reaction* (WGSR), também, responsável por majorar o rendimento do hidrogênio (H_2).

Observa-se que a adição de vapor de água contribui para o aumento da produção do monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2) – objetivo para o gás de síntese.

4. Quarta etapa: nesse ponto ocorre a quebra (*cracking*) dos alcatrões dada sua interação com o calor, como pode ser observado na reação (4.10):

5. Quinta etapa: é quando ocorre a oxidação parcial dos produtos da pirólise:

As cinco etapas acima mencionadas resumem apenas as reações mais relevantes segundo o estado da arte de um processo de gaseificação de biomassa e cujo objetivo é proporcionar um melhor entendimento adiante, quando forem estudadas algumas das particularidades do processo Carbo-V®. Uma vez mencionado o conhecimento mínimo que orbita os processos de gaseificação da biomassa vegetal, passar-se-á para os principais aspectos que não representam segredos industriais, tampouco violam aspectos confidenciais, da tecnologia conhecida como Carbo-V®, tecnologia esta desenvolvida e patenteada pela CHOREN Industrietechnik GmbH, utilizada para a produção do gás de síntese (*biosyngas*), isento de alcatrões e com baixo teor de metano (CH_4), que será submetido a processos de resfriamento, remoção mecânica de particulados e inúmeras etapas de lavagem para atender aos estritos parâmetros da síntese Fischer-Tropsch e assim permitir a produção do óleo diesel sintético SunDiesel®. O gás de síntese obtido contém mais de 80% da energia primária da biomassa empregada, energia essa que, após sua conversão em biocombustível sintético, terá

preservado, aproximadamente, 55% da energia inicial. É possível observar, na figura (4.11) adiante, de forma esquemática, o processo Biomass-to-Liquids empregado pela CHOREN Industrietechnik GmbH, onde pode-se contemplar os dois primeiros estágios do processo, responsabilidade da empresa, e o estágio da síntese Fischer-Tropsch cabível à Shell Deutschland Oil GmbH.

Figura 4.11 Processo BTL empregado na planta-beta (β -plant).

Fonte: (fonte informal)¹¹.

O processo de gaseificação Carbo-V® pode ser tomado como o coração tecnológico da planta-beta (β -plant), sendo este dividido em três subestágios distintos, ou etapas, que juntos representam uma tecnologia ainda não observada.

Subestágio I – Gaseificação em baixas temperaturas.

A gaseificação em baixas temperaturas (*low temperature gasification*-LTG) compreende o primeiro subestágio do processo de gaseificação. A biomassa empregada, já devidamente condicionada e cujo teor de umidade poderá variar de 15 a 20%, é continuamente carbonizada, nesse primeiro momento, em um reator de gaseificação (*entrained flow reactor*), figura (4.12) a seguir, de 45 MW_{th}, operando a $5,00 \times 10^5$ Pa (5 bar), através de uma oxidação parcial utilizando oxigênio (O₂) como agente gaseificador e também vapor de água, a temperaturas que variam de 400 a 500 °C – isso acaba por convertê-la em

¹¹ CHOREN Industrietechnik GmbH – Tom Blades, Paternship CHOREN / Shell GmbH, Hamburg, 2005.

uma mistura gasosa bruta composta majoritariamente por hidrocarbonetos de baixo peso molecular (compostos voláteis) e rico carbono sólido na forma de partículas. Na base do gaseificador é retirada uma substância denominada o biocoque, que consiste em um resíduo poroso sedimentado composto majoritariamente por carbono.

Figura 4.12 Carbo-V® – Subestágio I.

Fonte: (Adaptado; fonte informal)¹².

Subestágio II – Gaseificação em altas temperaturas.

No segundo subestágio do processo, denominado por gaseificação em altas temperaturas (*hight temperature gasification*-HTG), variando de 1.200 a 1650 °C, o biocoque suspenso e o gás contendo os hidrocarbonetos voláteis são oxidados com o oxigênio (O₂) em uma câmara de combustão, figura (4.13) adiante, 160 MW_{th}, acima do ponto de fusão das cinzas combustíveis (≈ 1.400 °C), para criar, dessa forma, um agente gaseificador quente.

Subestágio III – Gaseificação em altas temperaturas.

No terceiro, e último, subestágio do processo, figura (4.14) adiante, o biocoque retirado no primeiro subestágio, é pulverizado na forma de um pó combustível no agente gaseificante quente produzido durante o segundo subestágio; o pó combustível e o agente gaseificante quente agora reagem endotermicamente, no reator de gaseificação, a uma temperatura em torno de 800 °C, originando assim uma mistura gasosa denominada gás bruto,

¹² CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

findando o processo de gaseificação da biomassa lignocelulósica. Seguindo os procedimentos adequados para atender os diferentes fins possíveis desse gás bruto, o mesmo deverá ser condicionado para atender às especificações da síntese Fischer-Tropsch, e para isso o gás bruto será submetido a processos de limpeza através de procedimentos secundários químicos ou físicos, como lavadores a base de água e separadores de gás, filtros cerâmicos, craqueamento térmico ou catalítico, dentre outros não especificados. Uma vez condicionado termicamente, com sua composição de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) devidamente ajustada à proporção desejada, o gás bruto passará a ser denominado por gás de síntese (*biosyngas*) e poderá atender a diversos propósitos da indústria química, conforme observado anteriormente na figura (1.1). Para fins desta pesquisa será a obtenção de líquidos Fischer-Tropsch.

Figura 4.13 Carbo-V® – Subestágio II.

Fonte: (Adaptado; fonte informal)¹³.

Figura 4.14 Carbo-V® – Subestágio III.

Fonte: (Adaptado; fonte informal)¹².

¹³ CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

4.2.3 Terceiro Estágio: A Síntese Fischer-Tropsch (SMDS®)

Uma vez que o gás bruto foi devidamente condicionado em gás de síntese (*biosyngas*) ele será transformado em uma mistura de hidrocarbonetos líquidos através de um complexo processo de polimerização sobre superfície catalítica e, assim como feito anteriormente com o processo de gaseificação, uma pequena revisão será feita com a tecnologia conhecida como síntese Fischer-Tropsch¹⁴ a fim de contribuir para um melhor entendimento do processo *Biomass-to-Liquids* (BTL) empregado pela CHOREN Industrietechnik GmbH.

Observa-se em Hamelinck et al. (2003) e em Vessia (2006) que o crescimento das cadeias de hidrocarbonetos é modelado a partir da reação do monóxido de carbono (CO) com o hidrogênio (H₂), conforme a reação geral (4.12), sobre uma superfície catalítica à base de ferro (Fe) ou cobalto (Co), comumente, no interior de um reator Fischer-Tropsch.

Poder-se-á observar adiante, nas reações (4.13) à (4.16), a formação da unidade monomérica intermediária conhecida como carbeno ou também metileno, este se tratando de um radical orgânico com seis elétrons, sendo dois não ligantes, onde o átomo de carbono (C) é bivalente e altamente reativo, composto por duas ligações simples (-CH₂-) ou uma ligação dupla (=CH₂), que consistirá na principal unidade de propagação das cadeias de hidrocarbonetos no interior do reator Fischer-Tropsch, e cuja probabilidade dessas cadeias de propagarem, formando hidrocarbonetos mais longos, será descrita pela constante de propagação expressa por α , ou pela sua probabilidade de terminarem, expressa por β . Em Steynberg e Dry (2004) é possível observar que esse mecanismo de reação consiste em uma polimerização de superfície, levando a uma distribuição de hidrocarbonetos com diferentes pesos moleculares, lineares, cíclicos ou ramificados, com a presença de outras espécies orgânicas, como alcoóis (R-OH), e que é denominada distribuição Anderson-Schulz-Flory (ASF). Esta distribuição determina uma relação entre o rendimento de cada hidrocarboneto (%) e seu número de átomos de carbono (C), mostrando uma seletividade que varia desde os hidrocarbonetos de menor peso molecular (C₁-C₄), passando pelos hidrocarbonetos de peso

¹⁴ Por se tratar de um extenso e complexo processo da indústria química, um maior entendimento sobre a síntese Fischer-Tropsch, suas variáveis de processo, modelos e funcionamento de reatores, condições de operação, cinética, mecanismos de formação de hidrocarbonetos e catalisadores, não será possível diante das limitações desta pesquisa; diante disso, a bibliografia inicial mais indicada é Steynberg e Dry (2004).

intermediário (C₅-C₁₇) até os hidrocarbonetos de elevado peso molecular (C₁₈₊), sólidos em condições normais de temperatura e pressão (CNT), porém em estado líquido dentro do reator Fischer-Tropsch dada suas condições de operação em temperaturas elevadas.

O modelo Anderson-Schulz-Flory (ASF) basicamente consiste em um modelo estatístico simples que relaciona de forma linear a massa molar do hidrocarboneto e o seu número de carbonos, observável no gráfico (4.2) adiante. A probabilidade do crescimento, ou seletividade, das cadeias de hidrocarbonetos é expressa pela constante α e o rendimento dos hidrocarbonetos com n moléculas de carbono é dado pela equação (4.1):

$$C_n = \alpha^{n-1} (1 - \alpha) \quad \text{Equação (4.1)}$$

Tem-se, na equação (4.1), que C_n é a fração de hidrocarbonetos que possuem n átomos de carbono (C), ou seja, a quantidade de hidrocarbonetos de comprimento n dentro do reator, com $n \in \mathbb{N}$, representando o comprimento dos hidrocarbonetos e α sendo a probabilidade de crescimento daquela cadeia, uma vez que a mesma já tenha sido iniciada pela ligação organometálica das espécies precursoras, chamadas de *building blocks*, cujo entendimento costuma ser aceito uma vez que haja a dissociação do monóxido de carbono (CO) seguida de sua hidrogenação, formando as espécies ($=\text{CH}$), ($-\text{CH}_2-$) e/ou ($-\text{CH}_3$); é consenso em Ciobîcă; Ciobîcă et al. apud Jun (2008), que as reações essenciais podem ser tomadas como reações de polimerização de superfície onde as espécies CH_x interagem umas com as outras, formando uniões do tipo (C-C), formando assim os hidrocarbonetos de maior peso molecular.

Gráfico 4.2 Distribuição das frações C_n para diferentes valores de α.

Fonte: (HAMELICK et al., 2003)

É explicado em Dijk (2001) e Vessia (2006) que quando uma faixa específica de hidrocarbonetos é desejada preferencialmente sobre outras, isso tornar-se-á possível, em parte, através de ajustes nas condições que regem a dinâmica das reações, (4.17) à (4.19), dado que o rendimento (%) de cada faixa de hidrocarboneto irá depender da probabilidade de crescimento daquelas cadeias que, por sua vez, poderão ser influenciadas principalmente pelas variáveis do processo, como a pressão, temperatura, proporção da composição (CO:H₂) do gás de síntese utilizado, a taxa de alcenos que são reinseridos nas cadeias de alcanos (também conhecida como taxa de olefinas/parafinas), o tempo de permanência das cadeias de hidrocarbonetos no interior do reator, a composição do catalisador utilizado e também a tecnologia do reator Fischer-Tropsch aplicada – todas essas variáveis influenciarão na linearidade dos compostos desejados, assim como na quantidade desejada de cada um.

As reações (4.17) à (4.19) ocorrem num sistema trifásico dentro do reator, onde os hidrocarbonetos gasosos estão em equilíbrio com a fase líquida, formada pelos hidrocarbonetos líquidos e pelos sólidos fundidos que se comportam como um líquido homogêneo borbulhante sobre a fase sólida, que consiste na superfície do catalisador. Revisados alguns dos aspectos fundamentais, tem-se que, na planta-beta (β -plant) da CHOREN Industrietechnik GmbH, no que diz respeito à síntese Fischer-Tropsch, empregava-se a tecnologia conhecida como *Shell Middle Distillate Synthesis* (SMDS®)¹⁵, desenvolvida nos anos da década de 1970 pela Royal Dutch Shell e pela Qatar Petroleum (QP), inicialmente para a rota tecnológica *Gas-to-Liquids* (GTL) aplicada na planta de Bintulu, na Malásia, consistindo em uma variação da convencional síntese Fischer-Tropsch acima apresentada. Essa variação se dá uma vez que a distribuição ASF aplica-se apenas quando há a presença da constante probabilística α de crescimento das cadeias de hidrocarbonetos, e somente ela, entretanto, na prática, a distribuição (%) dos hidrocarbonetos difere significativamente da distribuição teórica ASF, isso conforme Geerling et al.; van der Laan e Beenackers apud Hamelinck et al. (2003), dados diversos aspectos não contemplados pela mesma, como o processo de hidrogenação e a re-inserção dos alcenos (α -olefinas) na região de crescimento das cadeias de alcanos – sendo que suas reações de polimerização ocorrem mais rapidamente que as reações de dessorção das espécies de superfície. Os desvios existentes, explicados em Picher et al. apud Jun (2008), podem explicar a relativa (e indesejada) alta na seletividade do metano (CH_4) e uma maior do que esperada seletividade dos hidrocarbonetos de elevado peso molecular (desejável, como será explicado adiante), superior à faixa do óleo diesel – o objetivo do processo *Shell Middle Distillate Synthesis* (SMDS®).

Sabe-se, através de Steynberg e Dry (2004), que não é possível controlar totalmente a probabilidade de crescimentos das cadeias de hidrocarbonetos formados no interior do reator, contudo alterações nas variáveis de processo, especificamente na temperatura e pressões parciais do monóxido de carbono (CO) e do hidrogênio (H_2), são capazes de favorecer a formação de cadeias mais longas de hidrocarbonetos e, fazendo-se valer dos desvios na distribuição teórica ASF, tem-se que a probabilidade de crescimento das cadeias de hidrocarbonetos aumenta conforme o número de átomos de carbono (C) também aumenta, gerando assim, cadeias de hidrocarbonetos mais longas; isso ocorre graças à re-incorporação de α -olefinas às cadeias ainda em crescimento (ainda em ligação organometálica). A pressão

¹⁵ Para detalhes tecnológicos e operacionais sobre a *Shell Middle Distillate Synthesis* (SMDS®) a bibliografia recomendada é “The Shell Middle Distillate Synthesis Process” de Burgt, J.M. et al. (1988) e “The Shell Middle Distillate Synthesis Process SMDS” de Eilers, Posthuma e Sie (1990).

parcial do hidrogênio (H_2) é mantida constante enquanto a pressão parcial do monóxido de carbono (CO) é aumentada; conforme sua pressão parcial aumenta gradativamente, enquanto o mesmo alimenta o reator Fischer-Tropsch, também aumenta o rendimento dos hidrocarbonetos de maior peso molecular. Isso é explicado uma vez que os hidrocarbonetos mais pesados precisam de mais moléculas de monóxido de carbono (CO) do que moléculas de hidrogênio (H_2) e assim é possível construir cadeias carbônicas mais longas, *Heavy Paraffin Synthesis* (HPS), impróprias para a aplicação como combustíveis líquidos, contudo, reduzindo consideravelmente a formação dos hidrocarbonetos de cadeias curtas, gasosos (C_1 – C_4), que são indesejados para estes fins. Os hidrocarbonetos de cadeias longas (C_{18+}) então formados são submetidos a processos de isomerização e hidrocraqueamento (*hydrocracking*) ou HCC, *Heavy Paraffin Conversion* (HPC), conforme demonstrado nas reações (4.20) à (4.22), e convertidos em hidrocarbonetos de pesos moleculares menores, abrangendo a faixa desejada, que é a do óleo diesel (C_{13} – C_{16}). Assim sendo o processo *Shell Middle Distillate Synthesis* (SMDS®) é responsável por majorar o rendimento (%) da rota *Biomass-to-Liquids*.

4.3 O SunDiesel ®

Fuel quality is a constructive element of engine research, which we take into account and benefit from in the development of new power units. 'SunDiesel', which is free of sulfur and aromates, is a technically ideal fuel which complements the engines of the future in an environment-friendly manner.

(Herbert Kohler)

O combustível produzido através da rota *Biomass-to-Liquids* da empresa CHOREN Industrietechnik GmbH é um biocombustível sintético, incolor, pertencente à chamada 2ª Geração de Biocombustíveis, sendo este um *designer fuel*, batizado de SunDiesel® pela empresas automobilísticas alemãs Volkswagen AG e Daimler AG, e obtido a partir da gaseificação da biomassa lignocelulósica contendo baixa quantidade de umidade. A concepção de um biocombustível advindo de matéria vegetal descartada (*wood wastes*), ambientalmente menos danoso que seu equivalente petroquímico e passível de melhorias são os vetores responsáveis por todos os anos de pesquisa e desenvolvimento acerca da tecnologia Carbo-V® e de sua combinação com a tecnologia SMDS® em um único complexo industrial. Quando comparado ao o óleo diesel oriundo da petroquímica tradicional, o SunDiesel® pode ser tomado como um combustível ecológico já que libera de 30% a 50% menos material particulado e até 90% menos de hidrocarbonetos voláteis e gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO₂) – esse último, em especial, apenas se for considerado que o carbono que será liberado na atmosfera advém de vegetais que o fixaram anteriormente, contudo esse é um aspecto que requer um estudo detalhado envolvendo uma análise de ciclo de vida do carbono (*life cycle analysis-LCA*) de acordo com as normas internacionais ISO 14041 (CHOREN Industries, 2007).

O SunDiesel®, figura (4.15), é um biocombustível sintético da Segunda Geração, cujos teores dos hidrocarbonetos aromáticos benzeno (C₆H₆), tolueno (C₆H₅CH₃) e xileno (C₆H₄CH₃CH₃), denominados por BTX, não ultrapassa a marca de 3,2% de sua composição; apresenta até 0,3 ppm do elemento enxofre (S); possui um elevado número de cetano (NC>70) dada sua base parafínica e baixa presença de hidrocarbonetos aromáticos; e possui uma energia específica, ou densidade energética, de de 40 MJ dm⁻³ o que proporciona uma boa ignição e combustão, liberando dessa forma menos material particulado e hidrocarbonetos não queimados nos gases de exaustão dos motores automotivos. Considerado um *designer fuel*, o SunDiesel® poderá ser empregado na próxima geração de motores a combustão interna, seja automotivo ou aeroespacial. A utilização desse tipo de combustível não demanda, num primeiro momento, alterações estruturais nos motores do ciclo diesel ou na estrutura da rede de distribuição. A CHOREN Industrietechnik GmbH estimava que os custos de manufatura dos combustíveis BTL iriam, no médio prazo, atingir um patamar equivalente ao do biodiesel e, talvez, a longo prazo, reduções nos custos poderiam ser esperadas, possibilitando a competição com os combustíveis fósseis (CHOREN Industries, 2007).

Figura 4.15 Amostras de SunDiesel®.

Fonte: (fonte informal)¹⁶.

Foi solicitado à empresa uma amostra do biocombustível SunDiesel®, contudo não foi possível a concretização de tal pedido. Conforme explicação da Sra. Susan Pfeiffer, Desenvolvimento de Projetos, da CHOREN Industrietechnik GmbH, não mais havia quantidades produzidas para testes disponíveis para envio e não havia previsão para produção de mais SunDiesel® até que o processo de comissionamento da planta-beta (β -plant) estivesse concretizado, aguardado para o final de 2011.

No trecho abaixo, em *itálico*, retirado da troca de mensagens particulares por correio eletrônico com o Sr. Matthias Ruddlof, gerente de Marketing, Vendas e Desenvolvimento de Projetos, poucas semanas antes da CHOREN Industrietechnik GmbH declarar insolvência, o mesmo se expressa em relação à situação da empresa e o futuro dos biocombustíveis sintéticos, baseado em sua experiência com os anos de colaboração na planta-beta (β -plant):

“[...] Looking back you always know what could have been done better. However, I do feel that we as CHOREN have been an important brig in the invention and promotion of the 2nd generation biofuels as a future fuel offering both excellent properties and low GHG impact and not competing with food production. Even if it is a pity that not ourselves will harvest the fruit of our seeds and efforts, I'm convinced that this pathway finally will be successfully completed by others. [...]”

¹⁶ CHOREN Industries & Purdue University – Cristopher Peters, CHOREN USA, Houston, Texas, EUA, 2008.

Em 25 de janeiro de 2013 foi anunciado que a tecnologia Carbo-V®, pertencente à Linde Engineering Dresden GmbH, foi licenciada para a empresa finlandesa Forest BTL Oy, pertencente à Vapo Corporation, cuja planta, 480 MW_{th}, localiza-se na cidade de Kemi, norte da Finlândia, com uma capacidade nominal de produção próxima de $152,5 \times 10^6$ dm³ de líquidos Fischer-Tropsch ao ano (óleo diesel e nafta sintéticos), equivalente a $2,664 \times 10^3$ bpd, uma capacidade quase nove vezes superior à da planta-beta (β-plant) da CHOREN Industrietechnik GmbH. A planta da Forest BTL Oy planeja utilizar biomassa lignocelulósica já processada e dimensionada disponível no mercado. As atividades estão previstas para se iniciarem ao final do ano de 2016 (informação online)¹⁷.

¹⁷ Material disponível em <<http://www.greencarcongress.com/2013/01/forest-20130125.html#more>> Acesso em 17 de junho de 2013.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

The fact is that most biofuel ventures based on new technology are going to fail. That is the nature of technology development.

(Robert Rapier)

Pode-se inferir que, sob muitos aspectos, o uso planejado da biomassa moderna, quando orientado para a manufatura de combustíveis automotivos, configura-se como uma opção para mitigar os efeitos provocados pelas emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa advindos do emprego dos combustíveis petroquímicos na frota veicular brasileira sem que, com isso, haja uma maior degradação ambiental – esta é apenas mais um cenário compartilhado com muitos outros estudiosos da bioenergia. Melhorias estruturais nos motores de combustão interna; instruções normativas que regulamentem a fabricação de novos veículos e os teores máximos de poluentes nos combustíveis; programas de incentivo aos biocombustíveis da Primeira Geração; a disseminação do conhecimento pelas comunidades científicas e os programas sociais que buscam a conscientização da população sobre a importância do uso ponderado das fontes energéticas, são medidas que, há muito, vêm sendo adotadas com sucesso, todas em busca de satisfazer as exigências advindas do crescente consumo energético, sem que com isso, sejam negligenciadas as exigências de preservação ambiental, cujo objetivo é melhorar a qualidade de vida das pessoas sem interferir no progresso da sociedade. Como sugerido anteriormente, a tensão existente entre a tríade progresso, economia e meio ambiente é o que impulsiona comunidades de diferentes competências a buscar por alternativas viáveis para promover esse progresso sustentável de uma forma economicamente possível – mais um cenário por muitos partilhado que integra alguns dos grandes desafios deste século, porém não há uma única resposta para tentar balancear esses três pontos; estes irão variar sua influência com o passar do tempo, o advento de novas tecnologias, com a descoberta de reservas de combustíveis fósseis *onshore* e *offshore* e também novas políticas internas e externas.

O Brasil ainda não atingiu sua auto-suficiência energética no que diz respeito aos derivados do petróleo, ainda sendo preciso importar óleo diesel, gasolina, querosene de aviação e nafta para suprir sua demanda interna – e, com os programas sociais de repasse de

capital e o poder aquisitivo do cidadão brasileiro tornando-se maior, a busca por veículos automotivos e passagens aéreas tende a continuar crescendo. A construção de novas refinarias e também a melhoria nas redes de distribuição poderão contribuir para que, talvez em poucos anos, o país seja capaz de atingir essa auto-suficiência, todavia há, certamente, dificuldade associadas a esse progresso. No que diz respeito aos biocombustíveis brasileiros, sua presença deve ser encarada como um suporte à rede de abastecimento, assim como um dos pilares para uma melhor qualidade dos combustíveis líquidos, mas esses mesmos biocombustíveis merecem um entendimento como substitutos parciais dos combustíveis de refinaria apenas, uma vez que cogitar uma completa substituição poderia acarretar em um problema ambiental de proporções ainda maiores. Ainda que seu alcance possa ter limites, a manufatura dos biocombustíveis ainda é uma das mais nobres aplicações para a biomassa moderna – é o tipo de matéria-prima empregada que irá definir toda a cadeia de processos que serão aplicados para a obtenção dos biocombustíveis

Frente a essas considerações acerca dos combustíveis de refinaria e os biocombustíveis da Primeira Geração, tem-se os promissores *designer fuels*, cujo conceito proposto pode se estender aos combustíveis XTL, como o SwiftFuel®, e também aos biocombustíveis da Segunda Geração, como é o caso do SunDiesel®. Este, por sua vez, talvez represente o primeiro grande passo da rota BTL em se tornar mais do que uma distante realidade que, apesar de ter sido bem sucedido em consolidar os vértices progresso e meio ambiente, infelizmente não se tornou comercialmente viável, posicionando-se numa situação de incerteza quanto ao seu emprego no futuro dado o encerramento das atividades da planta-beta (β -plant) e a venda do processo Carbo-V®. As conquistas alcançadas pela CHOREN Industrietechnik GmbH poderão servir de exemplo para os novos projetos de biorrefinarias e tecnologias que orbitem os biocombustíveis da Segunda Geração: nesta tese foi possível analisar a economia de escala e sua importância para projetos desta natureza, sendo esta uma das muitas facetas a envolver o dimensionamento de grandes complexos industriais que busquem se firmar perante desta fronteira tecnológica.

Constatou-se nesta tese que o Brasil ainda não dispõe de uma estrutura mínima necessária para suprir, com resíduos de biomassa lignocelulósica advindos de atividades industriais, uma planta *greenfield* ou *brownfield* que opere pela rota BTL e cuja capacidade nominal de produção seja igual ou superior a 20×10^3 bpd para se beneficiar da economia de escala – idealmente deveria essa ser igual ou superior a 34×10^3 bpd: investimentos da ordem de bilhões de dólares envolvem plantas BTL dessa magnitude como foi demonstrado nos cálculos do Total Capital Investment (TCI) que, por sua vez, foi calculado, assumindo-se o

menor grau de incerteza, como sendo 34,66% superior ao TCI de um típica planta GTL e tendo a planta ORYX GTL sido escolhida como modelo de partida. A experiência acumulada com os anos da planta-alfa (α -plant) e da planta-beta (β -plant) da CHOREN Industrietechnik GmbH poderá ser amplamente utilizada pelo cenário energético nacional, cabendo às comunidades científicas, acadêmicas e também governamentais, ponderar se a Segunda Geração de biocombustíveis terá espaço no futuro do Brasil, seguindo os passos do Programa Nacional do Alcool ou do PNPB onde os já firmados etanol combustível de cana-de-açúcar e biodiesel possuem grande participação no mercado de combustíveis veiculares. Um extenso planejamento seria demandado para que os obstáculos financeiros enfrentados pela pioneira alemã possam ser superados. Como ferramentas para esse planejamento, foi apresentado nessa tese uma fórmula financeira e curvas para nortear os primeiros estudos relativos ao dimensionamento inicial de uma típica planta BTL em território brasileiro e seu posicionamento estratégico mediante oferta de resíduos de biomassa lignocelulósica. Uma proposição indica que a melhor forma de proceder com tais planos seria, primeiramente, verificar as implicações necessárias para o sucesso das florestas (madeira plantada) de culturas destinadas para fins energéticos que, como já visto, seriam imprescindíveis para o abastecimento do processo dada a insuficiência de resíduos lignocelulósicos como observado – no caso de esta ser a biomassa moderna a ser adotada e no caso de a auto-suficiência na produção da matéria-prima seja pretendida.

Uma vez que a engenharia florestal e os melhoramentos genéticos possam prover culturas energéticas regulares, orientadas para a produção de biocombustíveis, prosseguir-se-á com os planejamentos acerca da complexa produção comercial do gás de síntese (*biosyngas*), que caracteriza, no momento, o maior desafio da rota BTL – algumas iniciativas nacionais foram direcionadas nesse sentido, como foi o caso do Projeto Biosyngas, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas Estado de São Paulo S.A., IPT, sob a coordenação de Fernando Landgraf e Gerhard Ett. Antes de ter sido interrompido seu objetivo era a construção de um gaseificador e de uma planta-piloto, no município de Piracicaba, São Paulo, para produção de gás de síntese (*biosyngas*) através da gaseificação do bagaço da cana-de-açúcar – utilizado na cogeração em usinas sucroenergéticas e também como matéria-prima nas pesquisas para a obtenção do etanol celulósico (ceetol), um biocombustível da Segunda Geração. Houve também, no período de 2008 a 2010, o projeto BioTop, ligado ao CENBIO, um consórcio entre América Latina e Europa cujo objetivo foi a identificação de oportunidades em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&DT) e políticas relacionadas aos biocombustíveis. No que diz respeito à síntese Fischer-Tropsch, uma escolha, segundo esta tese, seria estabelecer

parcerias comerciais e contar com a experiência e o *know-how* de notórias representantes da indústria química como feito CHOREN Industrietechnik GmbH com a Royal Dutch Shell.

Outras iniciativas ao redor do mundo também podem ser estudadas por terem sido sólidas contribuições aos biocombustíveis da Segunda Geração, como foi o caso do projeto Clean Hydrogen-Rich Synthesis Gas (CHRISGAS), em parceria com a Linnæus University, Suécia, sob a coordenação de Sune Bengtssons. O projeto envolveu a planta-piloto Väjö Värnamo Biomass Gasification Centre, 18 MW_{th}, para produção de gás de síntese (*biosyngas*) rico em hidrogênio. Muitos estudos consideraram a construção de uma unidade de conversão de biometanol em bioDME (CH₃OCH₃), um biocombustível sintético que pode ser utilizado em substituição ao óleo diesel. O projeto durou de setembro de 2004 até fevereiro de 2010 e, dada uma participação industrial insuficiente e a necessidade por mais fundos, foi finalizado: segundo seus coordenadores, o bioDME, exatamente por ser um “*ecofriendly fuel*”, torná-lo-ia um processo comercialmente inviável. Outros projetos foram igualmente responsáveis por contribuições significativas para o amadurecimento da Segunda Geração dos biocombustíveis, como o da produção de biogasolina, pelo processo BioForming®, patenteado pelas empresas Virent Energy Systems Inc. e Royal Dutch Shell, que juntas operaram a primeira planta no mundo, em escala demonstrativa, na cidade de Madison, Wisconsin, EUA, utilizando a rota BTL para transformar tanto resíduos de biomassa advindos de culturas agrícolas como vegetais com altos teores de carboidratos e há também, na cidade Güssing, Áustria, uma planta-piloto de 4.5 MW_{th} para produção de gás natural sintético, o SNG, por um processo de metanação a partir de gás de síntese (*biosyngas*). Essa planta opera desde o ano de 2002 e testes para a produção de líquidos Fischer-Tropsch vêm sendo realizados.

Dentro do cenário energético brasileiro, os biocombustíveis da Primeira Geração ainda não atingiram sua maturidade sendo estes passíveis de aprimoramentos, como o desenvolvimento da rota etílica para a obtenção do biodiesel ou o uso de outras matérias-primas, por exemplo, mas chegará um momento onde suas limitações far-se-ão por demais evidentes que a necessidade advinda do progresso social e industrial demandará novas estratégias. Se essa demanda energética, ambiental e também social, será suprida, em parte, pela Segunda Geração de biocombustíveis ou por outras fontes, como os automóveis híbridos – ou por uma combinação de todas elas – não há como prever dado o dinamismo do setor energético. Já os biocombustíveis da Segunda Geração ainda se encontram em um estágio menos avançado e não possuem histórico de emprego comercial, carecendo de previsibilidade no que tange sua inserção no contexto energético global. Mesmo que excetuadas fossem as incertezas dados os altos investimentos, ainda sim, empresas energéticas teriam como

destacada problemática a posição precoce que estes biocombustíveis se encontram em seu ciclo de vida: por se tratar de uma rota ainda embrionária, isso poderá implicar em uma aparente falta de interesse pelas políticas regentes; a ausência de um setor maduro e a inexistência de parâmetros de mercado acarreta em dificuldades para se projetar cenários, operar com expansões além dos estágios laboratoriais e também pulverizar empresas do ramo. Pelo histórico do desenvolvimento energético brasileiro, alternativas como o etanol combustível mostraram-se assertivas quando o mercado nacional demandou, da mesma forma que os combustíveis XTL o fizeram em países como a África do Sul. Pode-se concluir que a realidade brasileira acerca dos biocombustíveis sintéticos ainda esteja distante de se concretizar se considerada sua grande complexidade, incertezas e altos custos – investimentos elevados e um *know how* específico são necessários. Dados tais aspectos e frente aos resultados apresentados nesta tese referentes aos custos e abastecimento de plantas BTL, infere-se que, neste momento, não seja interessante para o mercado nacional investir esforços em cruzar essa fronteira tecnológica, e assim, é possível que o Brasil, por enquanto, não venha a usufruir dos benefícios advindos dos biocombustíveis da Segunda Geração.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. 1ª Edição. Brasília: [s.n.], 2012. 145 p.
- ANDREOLI, C.; DE SOUSA, S.P. *Cana-de-açúcar: A melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol*. Paraná: [s.n.], 2009. 4 p.
- ANSORJE, J. *Shell Middle Distillate Synthesis: Fischer-Tropsch catalysis in natural gas conversion to high quality products*. Amsterdam, The Netherlands: [s.n.], [198-?]. 10 p.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA AGROENERGIA. 1ª Edição. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. 161 p.
- APOLINÁRIO, S.M. *Geração de eletricidade em comunidades isoladas na região amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa*. 2006. 186 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ARAÚJO, P.; PINHO, M. *Economia de escala em duas tecnologias: um estudo do setor siderúrgico*. Florianópolis, SC: [s.n.], 2004. 8 p.
- AXEGÅRD, P. *The Kraft pulp mill as a biorefinery*. Stockolm, Sweden: [s.n.], [2007?]. 6 p.
- BAROLO, M. *Process Economics Fundamentals*. Padova, Italy: [s.n.], 2008. 39 p.
- BARTOK, W. *Combustion of synthetic fuels*. Washington, D.C.: ACS Symposium series, 1983. 217 p.
- BATRA, V.K.; KUMAR, K. *Installation of greenfield vs brownfield cement plant*. Gurgaon, India: [s.n.], [200-?]. 8 p.
- BOUNDY, B. et al. *Biomass Energy Data Book*. 4th Edition. Oak Ridge, TN: UT-Battelle, LLC, 2011. 254 p.
- BERNDES, G.; HOOGWijk, M; BROEK, R. *The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies*. Utrecht, The Netherlands: ECN Energy Inovation, 2003. 28 p.

BIAZUS, A.; HORA, A.B.; LEITE, B.G.P. *Panorama de mercado: Painéis de madeira*. [S.l.: s.n.], 2010. 41 p.

BOERRIGTER, H. *Economy of Biomass-to-Liquids (BTL) Plants. An engineering assessment*. Utrecht, The Netherlands: ECN Energy Inovation, 2006. 29 p.

BOERRIGTER, H.; DRIFT, A. *Biosyngas: Description of R&D trajectory necessary to reach large-scale implementation of renewable syngas from biomass*. 1st Edition. Utrecht, The Netherlands: ECN Energy Inovation, 2004. 29 p.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, M; HOFBAUER, H. *Gasification Demonstration Plants in Austria*. Bratislava, Slovak: [s.n.], 2004. 4 p.

BRAY, K. *OSBL tips for engineers*. Kansas, KS: [s.n.], 2007. 2 p.

CALLARI, R. *Produção de óleo diesel limpo a partir do gás natural: estudo de viabilidade técnico-econômica para instalação de uma planta GTL (Gas-to-Liquids) no Brasil*. 2007. 85 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CASSILHA, A. et al. *Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental*. Revista Educação e Tecnologia. [S.l.: s.n.], [2004?]. 22 p.

CHOREN Industries: BTL-plant Freiberg - SunDiesel®. 1st Edition. Freiberg, Germany: [s.n.], 2007. 63 p.

DECRETO n° 76.593, de 14 de novembro de 1975. Diário Oficial da União. Seção 1. 14/11/1975. p. 15257.

DECRETO n° 3.420, de 20 de abril de 2000. Diário Oficial da União. Seção 1. Edição Extra. 22/04/2000. p. 2.

DECRETO n° 6.101, de 26 de abril de 2006. Diário Oficial da União - Seção 1 - 27/4/2007, p. 7.

DIJK, H.J. *The Fischer-Tropsch synthesis: A mechanistic study using transiente isotopic tracing*. Eindhoven, Germany: [s.n.], 2001. 174 p.

DUARTE, A. *Biomass-to-Liquids: Uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch*. 2009. 143 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DRIFT, A. et al. *Entrained flow gasification of biomass: Ash behaviour, feeding issues, and system analyses*. 1st Edition. The Netherlands: ECN Energy Inovation, 2004. 58 p.

EATON, B. C.; EATON, D. F. *Microeconomia*. São Paulo: Editora Saraiva, 1999. 608 p.

ENERGIA BRASIL. Rio de Janeiro: Editora Brasil Energia Ltda. Mensal. Ano 30, n° 370, set. 2011. 113 p.

HAMELINCK, C.N.; FAAIJ, A. *Outlook for advanced biofuels*. Utrecht, Netherlands: Elsevier B.V., 2004. 16 p.

HAMELINCK, C.N. et al. *Production of FT transportation fuels from biomass; Technical options, process analysis and optimisation and development potential*. Utrecht, Netherlands: ECN Energy Inovation, 2003, 69 p.

GEROSA, T. M. *O estudo da utilização do gás natural como insumo para a indústria química e petroquímica: modelagem de uma planta gás-química*. 2007. 155 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GOLDEMBERG, J. et al. *Ethanol learning curve – the Brazilian experience*. São Paulo, SP: Elsevier B.V., 2004. 4 p.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. *The sustainability of ethanol production from sugarcane*. São Paulo, SP: Energy Policy, Elsevier B.V., 2008. 12 p.

HAMADA, J. *Resíduos sólidos: Conceituação e caracterização*. Bauru, SP: [s.n.], 2003. 20 p.

HIGMAN, C.; BURGT, M. *Gasification*. 2nd Ed. Massachusetts, USA: Gulf Professional Publishing, 2008. 456 p.

HOFFMANN, B. S. *O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: Uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?* 2010. 143 p. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

HÜEBLIN, H.J. *Modelo para aplicação da metodologia Zeri: Sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento*. 2001. 139 p. Dissertação. Centro de Educação Tecnológica do Paraná, Paraná, 2001.

JUN, C. et al. *A quantitative determination of reaction mechanism from density functional theory calculations: Fischer-Tropsch synthesis on flat and stepped cobalt surfaces*. Poland: [s.n.], 2008. 10 p.

JUNIOR, F.A.G. *Otimização do sistema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos*. 2004. 218 p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

JUNKES, M.B. *Procedimentos para aproveitamento de resíduos sólidos urbanos em municípios de pequeno porte*. 2002. 116 p. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2002.

KIM, S.; DALE, B.E. *Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grains: nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emission*. Michigan, MI: Elsevier B.V. 2005. 15 p.

KOCH, W. et al. *What is a Ratio Scale?* Rasch Measurement Transactions. [s.n.], 1996, 457 p.

KLASS, D. L. *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. 1st Edition. San Diego, CA: Academic Press – An Imprint of Elsevier, 1998. 651 p.

KLERK, A. *Gas to liquids conversion*. Houston, TX: [s.n.], 2012. 48 p.

MOKHATAB, S.; POE, W. A. *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2nd Edition. Massachusetts, USA: Gulf Professional Publishing, 2012. 828 p.

MORRISON, L.H. *Diesel engineering handbook*. 1st Edition. New York, USA: Diesel Publications, Inc, 1943. 964 p.

MULLIN, J.R.; KOTVAL, Z.; MORIARTY, M. *The greenfield versus brownfield debate: A balanced approach to industrial planning*. Amherst, MA: Selected Works, 1993. 11 p.

NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 1004. 2^a Edição. Brasil: [s.n.], 2004. 19 p.

ÖHRMAN, O.G.G. et al. *Pressurized oxygen blown entrained flow gasification of a biorefinery lignin residue*. Fuel Processing Technology, Piteå, Sweden: Elsevier B.V. 2013. 9 p.

PFEIFFER, Susan. [Mensagem pessoal]. Mensagens recebidas de <susan.pfeiffer@choren.com> de 12 de dezembro de 2010 a 5 de janeiro de 2011.

PROBSTEIN, R.F.; HICKS, R.E. *Synthetic Fuels*. 1st Edition. New York, NY: McGraw Hill Book Company, 1982. 490 p.

REZAIYAN, J.; CHEREMISINOFF, N. P. *Gasification Technologies: A primer for engineers and scientists*. 1st Ed. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005. 360 p.

ROCHA, J. *Gaseificação de biomassa: histórico e conceitos básicos*. Manaus, AM: [s.n.], 2002. 43 p.

RUDLOFF, Matthias. [Mensagem pessoal] Mensagens recebidas de <matthias.rudloff@choren.com> de 5 de janeiro de 2011 a 21 de fevereiro de 2012.

SALES, C.A.V.B; ANDRADE, R.V.; LORA, E.E.S. *Geração de eletricidade a partir da biomassa*. [S.l.; s.n.], 2005. p. 10. 2 v.

SPATH, P.L.; DAYTON, D.C. *Preliminary screening – Technical and economic assessment of synthesis gas to fuels and chemicals with emphasis on the potential for biomass derived syngas*. Washington, D.C.: National Renewable Energy Laboratory, USA, 2003.

SPIILÄ, K. *Biofuels in Europe: Visions for transport*. Finland: [s.n.], 2006. 29 p.

STEYNBERG, A.; DRY, M. *Fischer-Tropsch Technology (Studies in surface science and catalysis)*. 1st Edition. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2004. 722 p.

SUSTAINABLE LAND USE AND URBAN DESIGN ON BROWNFIELD SITES. Version 4.1. [S.l.: s.n.], 2004. 183 p.

SWAIN, P.K.; DAS, L.M.; NAIK, S.N. *Biomass to liquids: A prospective challenge to research and development in 21st century*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2011. 16 p.

SWANSON, R.M. et al. *Techno-economic analysis of biofuels production based on gasification*. Washington, D.C.: National Renewable Energy Laboratory, 2010. 165 p.

TADEU, H. F. B. *Cenários de longo prazo para o setor de transportes e consumo de combustíveis*. 2010. 227 p. Tese. Pontifícia Universidade Católica, Minas Gerais. 2007.

TAYLOR, G. *Biofuels and biorefinery concept*. Southhampton, UK: Elsevier B.V., 2008. 4 p.

The Rectisol® Process: Lurgi's leading technology for purification and conditioning of synthesis gas. Germany: [s.n.], [200-?]. 12 p.

TOWLER, G.; SINNOT, R.K. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. 2nd Edition. United Kingdom, UK: Butterworth-Heinemann – An Imprint of Elsevier B.V., 2012. 1320 p.

VARRAVETO, D. M. et al. *OSBL Considerations for Refinery Expansion Projects*. San Antonio, TX: Burns & McDonnell, 2006. 10 p.

VELÁSQUEZ ARREDONDO, H.I. *Avaliação exergética e exergo-ambiental da produção de biocombustíveis*. 2009. 235 p. Tese. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VESSIA, Ø. *Biofuels from lignocellulosic material – In the Norwegian context 2010 – Technology, Potential and Costs*. Trondheim, Norway: [s.n.], 2005. p. 101.

WIECHETECK, M. *Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos – Sumário Executivo. Revisão 00*. Curitiba, Paraná: [s.n.], 2009. 40 p.

WRIGHT, M.M.; BROWN, R.C. *Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms*. Iowa, USA: [s.n.], 2007. 8p.

ZENNARO, R. *Greener Fischer-Tropsch process*. Alberta, Canada: [s.n.], 2012.

APÊNDICE A – COMBUSTÍVEIS XTL.

Os combustíveis sintéticos XTL, englobam, por sua vez, uma campo do saber de destacada relevância para o prosseguimento deste estudo e seus principais conceitos e entendimento far-se-ão necessários, gerando assim uma breve explanação sobre seus aspectos mais relevantes. Em se tratando da primeira trajetória tecnológica, os primórdios das atividades de P&D no estudo dos combustíveis sintéticos XTL deram-se na pioneira Alemanha durante os anos da década de 1920 – o país contou com incentivos estatais para desenvolver pesquisas com tecnologias de obtenção de combustíveis veiculares, pesquisas essas que se intensificaram durante as décadas de 1940 e 1950, durante II Guerra Mundial, e nos anos da década de 1970, na África do Sul. A tecnologia, desenvolvida pelo professor Franz Joseph Emil Fischer (1877-1947), diretor e fundador do célebre Kaiser-Wilhelm Institute of Coal Research, na Alemanha, e seu chefe de departamento, o tcheco Dr. Hans Tropsch (1889-1935), batizada de Fischer-Tropsch, pode ser tomada como única em muitos aspectos dada sua propriedade de “construir” cadeias de hidrocarbonetos mais longas a partir de moléculas menores (monômeros), originadas de uma matéria-prima que contivesse o elemento carbono. Depois de “construídas”, as cadeias de hidrocarbonetos podem ser convertidas em combustíveis veiculares líquidos para consumo, como a gasolina e o óleo diesel, dentre outros insumos para indústria química e automotiva.

Inicialmente foi o carvão mineral empregado como matéria-prima para a produção de combustíveis veiculares líquidos. Sua aplicação foi de grande relevância para Alemanha durante os anos que durou a II Guerra Mundial, entretanto, depois desse período, por conta de diversos aspectos econômicos e sociais advindos da nova conjuntura trazida pelo pós-guerra, a tecnologia Fischer-Tropsch foi gradativamente caindo em desuso nos poucos países que investiram em seu desenvolvimento. No que tange sua trajetória tecnológica no pós-guerra, curiosamente, esta encontrou um promissor mercado na África do Sul – o governo sul-africano pretendia superar as dificuldades de importação de petróleo e derivados impostas pelo embargo internacional pelo qual o país passava em consequência da represália ao regime político segregatório conhecido como *Apartheid*. Assim, em Sasolburg, na década de 1950, a South African Coal, Oil and Gas Corporation Limited – Sasol, tornou-se a empresa responsável pela produção de combustíveis líquidos sintéticos tendo como principal insumo o carvão mineral através da rota química que ficou conhecida como *Coal-to-Liquids*, ou

simplesmente CTL¹, sendo esta a primeira e precursora dos combustíveis XTL. Muitas iniciativas privadas e também parcerias estatais viriam a se formar ao longo das décadas seguintes para o avanço e ampliação da tecnologia acerca da síntese Fischer-Tropsch.

A segunda trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos iniciou-se em Mossel Bay, também na África do Sul, com a criação da Mossgas, atual Petro S.A., uma grade estatal, contudo, desta vez, era possível fazer uso de tecnologias como a Reforma a Vapor do Metano (SMR) ou a Oxidação Parcial do Metano (POX), por exemplo, capazes de utilizar o gás natural como matéria-prima, ao invés do carvão mineral, podendo assim convertê-lo em combustíveis sintéticos veiculares, como a gasolina e o óleo diesel, além de querosene e demais produtos da indústria petroquímica também pela síntese Fischer-Tropsch. Essa rota tecnológica ficou conhecida como *Gas-to-Liquids*, ou GTL², e que, assim como na rota CTL, até os dias de hoje possui plantas em operação. Dessa forma surgia um novo horizonte de possibilidades para a utilização do gás natural, oferecendo aos países com grandes reservas deste combustível fóssil uma nova opção em se tratando de abastecimento e segurança energética. A tabela (A.1), adiante, sumariza as principais plantas CTL e GTL em atividade no mundo, sintetizando o panorama dos combustíveis XTL na atualidade.

Tabela A.1 – Plantas XTL em atividade.

Companhia	Localização	Produtos	Capacidade (bpd)	Matéria-prima	Situação
Sasol	Sasolburg e Secunda (África do Sul)	Combustíveis e produtos especiais	150,00 x 10 ³	Carvão (CTL)	Em operação
Petro SA (Mossgas)	Mossel Bay (África do Sul)	Combustíveis e produtos especiais	22,50 x 10 ³	Gás Natural (GTL)	Em operação
Royal Dutch Shell	Bintulu (Malásia)	Combustíveis e produtos especiais	12,50 x 10 ³	Gás Natural (GTL)	Em operação
Sasol e Qatar Petroleum (Oryx)	Ras Laffan (Qatar)	Combustíveis	34,00 x 10 ³	Gás Natural (GTL)	Em operação

Fonte: (Adaptado de CALLARI, 2007).

¹ Para um detalhamento sobre a rota tecnológica *Coal-to-Liquids*, a bibliografia recomendada é “*Beyond Fischer-Tropsch: Coal-to-Liquids production and refining*” de Arno de Klerk, Elsevier Science, de 2009

² Para um entendimento inicial sobre os processos de conversão da tecnologia *Gas-to-Liquids* e plantas GTL, as bibliografias recomendadas são as dissertações “O estudo da utilização do gás natural como insumo para a indústria química e petroquímica: modelagem de uma planta gás-química” de Tatiana Magalhães Gerosa; e “Produção de óleo diesel limpo a partir do gás natural: estudo de viabilidade técnico-econômica para a instalação de uma planta GTL (Gas-to-Liquids) no Brasil” de Roberto Callari; ambas apresentadas ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) da Universidade de São Paulo (USP) em 2007.

Os biocombustíveis da Segunda Geração fazem uso da tecnologia Fischer-Tropsch, e de semelhante forma às rotas CTL e GTL, apresentam-se no contexto de um processo produtivo cuja matéria-prima empregada é a biomassa lignocelulósica, um recurso renovável, em substituição ao carvão mineral e o gás natural – ambos combustíveis de origem fóssil – o que origina a rota tecnológica conhecida como *Biomass-to-Liquids*, ou BTL³, podendo ser tomada como a terceira trajetória tecnológica em combustíveis sintéticos. A primeira empresa a operar pela rota BTL foi a CHOREN GmbH, em Freiberga, Alemanha, cujas pesquisas se iniciaram nos anos da década de 1990 e, quase duas décadas depois, entraria em atividade, mesmo que de forma modesta e por um breve período de tempo. Essa planta, seu histórico e principais contribuições tecnológicas serão abordados no Capítulo 4 desta pesquisa, sendo ela um marco no que tange os biocombustíveis da Segunda Geração.

O gás advindo do processo de gaseificação, conhecido como gás bruto, precisa passar por processos de resfriamento, remoção de material particulado, cinzas, remoção da mistura BTX (benzeno, tolueno e xileno) e demais contaminantes, especialmente aqueles que contenham o elemento enxofre (S), mantendo-se apenas o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H), cujas proporções poderão variar conforme o uso que se deseje, caracterizando-se assim o gás de síntese – o gás de síntese ganhou uma nova denominação quando sua matéria-prima passou a ser uma biomassa de natureza diversa, podendo ser chamado também de *biosyngas*. Obtido o gás de síntese, suas aplicações na indústria química são inúmeras conforme pode ser observado na figura (A.1), adiante, didática no que se refere às possíveis rotas químicas de aplicação deste insumo para a obtenção de diversos produtos.

Deve-se atentar para essa etapa, pois a escolha de qual sistema de limpeza de gases é mais adequado dependerá de uma série de diferentes fatores, tais como a eficiência do sistema, os custos de investimento e os operacionais envolvidos, impactando diretamente em custos adicionais para a rota tecnológica BTL. Uma vez obtido o *biosyngas*, este é submetido ao reator Fischer-Tropsch, um reator multi-tubular de parede catalítica interna, cujos catalisadores metálicos mais comumente empregados são o ferro (Fe) ou cobalto (Co), sob controladas condições de temperatura e pressão, no qual, através de processos de polimerização em superfície, o *biosyngas* será convertido em uma mistura de muitos hidrocarbonetos, desde gasosos, líquidos e sólidos. Uma proposta para explicar as reações de polimerização foi dada pelo modelo estatístico conhecido como distribuição Anderson-

³ Para um entendimento inicial sobre o histórico e processos de conversão da tecnologia *Biomass-to-Liquids*, a bibliografia recomendada é a dissertação “Biomass-to-Liquids: Uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch” de Aires Duarte, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE) da Universidade de São Paulo (USP) em 2009.

Schulz-Flory (ASF) que apresenta a constante de probabilidade α , ou seletividade, expressando a probabilidade de um determinado hidrocarboneto se formar segundo a adição, passo a passo, do monômero ($-\text{CH}_2-$), ou de alguma olefina formada no interior do reator, enquanto as diversas espécies CH_x interagem umas com as outras na superfície catalítica.

Figura A.1 O gás de síntese (*syngas*) e algumas de suas aplicações.

Fonte: (SPATH; DAYTON, 2003).

Durante a polimerização, o controle das variáveis de processo, como a temperatura, pressão, proporção entre o CO e H_2 do *biosyngas* e o tempo de permanência da mistura no interior do reator, irá majorar os hidrocarbonetos da faixa desejada – que, para esta pesquisa, é a faixa que varia de C_{13} a C_{16} – enquanto os hidrocarbonetos de maior peso molecular sofrerão hidrocraqueamento (*hydrocracking*) objetivando-se aumentar o rendimento da faixa desejada. O pleno entendimento da dinâmica sobre a superfície catalítica da síntese Fischer-Tropsch ainda não foi alcançado, havendo, contudo, modelos estatísticos e mecanismos que buscam explicar a formação dos compostos lineares, compostos ramificados e também dos oxigenados. Uma vez que a faixa de hidrocarbonetos desejada é obtida, a mesma passará por um processo de melhoramento (*upgrading*) onde receberá aditivos que finalizarão o combustível, disponibilizando-o para as redes de distribuição e conseqüente consumo final.

APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO.

Tabela B.1 – Distribuição dos custos proporcionais para plantas BTL.

	2006	SSB-1	SSB-2	SSB	
ASU	45	8	12,5	18,8	15,15
GAS	30	22	34,4	51,6	41,7
H2	10	11	17,1	17,1	13,9
REC	35	11	-	11	11
FT	25	16	25	25	20,2
UP	15	-	-	-	18,9
PRE	-	7	11	11	8,8
POW	-	15	-	-	-
BAL	-	11	-	-	-
	160	101	100	134,5	129,65

Fonte: (Elaboração própria).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		20.000,00	1,24E+09		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
3		22.000,00	1,33E+09		2,00	1,07	1,15	1,41	1,87			
4		24.000,00	1,41E+09		3,00	1,12	1,25	1,73	2,69			
5		26.000,00	1,49E+09		4,00	1,15	1,32	2,00	3,48			
6		28.000,00	1,57E+09		5,00	1,17	1,38	2,24	4,26			
7		30.000,00	1,65E+09		6,00	1,20	1,43	2,45	5,02			
8		32.000,00	1,73E+09		7,00	1,21	1,48	2,65	5,76			
9		34.000,00	1,80E+09		8,00	1,23	1,52	2,83	6,50			
10		36.000,00	1,87E+09		9,00	1,25	1,55	3,00	7,22			
11		38.000,00	1,95E+09		10,00	1,26	1,58	3,16	7,94			
12		40.000,00	2,02E+09		20,00	1,35	1,82	4,47	14,82			
13		42.000,00	2,09E+09		30,00	1,41	1,97	5,48	21,35			
14		44.000,00	2,16E+09		50,00	1,48	2,19	7,07	33,81			
15		46.000,00	2,22E+09		100,00	1,58	2,51	10,00	63,10			
16		48.000,00	2,29E+09		200,00	1,70	2,89	14,14	117,74			
17		50.000,00	2,36E+09		500,00	1,86	3,47	22,36	268,58			
18		52.000,00	2,42E+09		1.000,00	2,00	3,98	31,62	501,19			
19		54.000,00	2,49E+09		5.000,00	2,34	5,49	70,71	2.133,40			
20		56.000,00	2,55E+09		10.000,00	2,51	6,31	100,00	3.981,07			
21		58.000,00	2,62E+09		100.000,00	3,16	10,00	316,23	31.622,78			
22		60.000,00	2,68E+09		1.000.000,00	7,94	63,10	31.622,78	125.892.541,18			
23												
24												
25												

Figura B.1 Cálculos para diferentes fatores de escala (1).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.1 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (1).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.2 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (2).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.3 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (3).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.4 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (4).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.5 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (5).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.6 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (6).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.7 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (7).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.8 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (8).

Fonte: (Elaboração própria).

Gráfico B.9 Função acerca do cálculo de diferentes fatores de escala (8).

Fonte: (Elaboração própria).

$$f(x) = 4.416.666,67x^4 - 12.883.333,33x^3 + 14.155.833,33x^2 - 6.771.166,67x + 1.182.000,00$$

Equação (B.1)

Pasta2.xlsx - Microsoft Excel

Equação 2.1 Equação 2.2 FE#2 FE 0,70 FE 0,78 Madeira Economia de Escala Economia de

	1-0,5	1-0,7	1-0,9
3	30.000,00	30.000,00	30.000,00
4	31.000,00	31.000,00	31.000,00
5	32.000,00	32.000,00	32.000,00
6	33.000,00	33.000,00	33.000,00
7	34.000,00	34.000,00	34.000,00
8	35.000,00	35.000,00	35.000,00
9	36.000,00	36.000,00	36.000,00
10	37.000,00	37.000,00	37.000,00
11	38.000,00	38.000,00	38.000,00
12	39.000,00	39.000,00	39.000,00
13	40.000,00	40.000,00	40.000,00
14	41.000,00	41.000,00	41.000,00
15	42.000,00	42.000,00	42.000,00
16	43.000,00	43.000,00	43.000,00
17	44.000,00	44.000,00	44.000,00
18	45.000,00	45.000,00	45.000,00
19	46.000,00	46.000,00	46.000,00
20	47.000,00	47.000,00	47.000,00
21	48.000,00	48.000,00	48.000,00
22	49.000,00	49.000,00	49.000,00
23	50.000,00	50.000,00	50.000,00

Figura B.2 Cálculos para diferentes fatores de escala (2).

Fonte: (Elaboração própria).

Pasta2.xlsx - Microsoft Excel

Equação 2.1 Equação 2.2 FE#2 FE 0,70 FE 0,78 Madeira Economia de Escala Economia de

	1-0,7	1-0,78
3	30.000,00	30.000,00
4	31.000,00	31.000,00
5	32.000,00	32.000,00
6	33.000,00	33.000,00
7	34.000,00	34.000,00
8	35.000,00	35.000,00
9	36.000,00	36.000,00
10	37.000,00	37.000,00
11	38.000,00	38.000,00
12	39.000,00	39.000,00
13	40.000,00	40.000,00
14	41.000,00	41.000,00
15	42.000,00	42.000,00
16	43.000,00	43.000,00
17	44.000,00	44.000,00
18	45.000,00	45.000,00
19	46.000,00	46.000,00
20	47.000,00	47.000,00
21	48.000,00	48.000,00
22	49.000,00	49.000,00
23	50.000,00	50.000,00

Figura B.3 Cálculos para diferentes fatores de escala (3).

Fonte: (Elaboração própria).

Figura B.6 Cálculos para relação entre CP versus TCI Específico (1).

Fonte: (Elaboração própria).

Figura B.7 Cálculos para relação entre CP versus TCI Específico (2).

Fonte: (Elaboração própria).

Cálculos do TCI para típicas plantas GTL e BTL segundo Boerrigter (2006).

$$\text{TCI} = [(\text{ISBL} + \text{OSBL}) + \text{IC}] + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = \text{FCI} + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = [(\text{ISBL}) + (1,00 \times \text{ISBL})] + 0,20 \times \text{EPC}$$

$$\text{TCI} = [(100) + (1,00 \times 100)] + 0,20 \times \text{EPC}$$

$$\text{TCI} = (200) + 0,20 \times 200$$

$$\text{TCI} = 240$$

Proposta GTL#1 – Cálculo proposto para o TCI de típicas plantas GTL. Proposta conservadora, atribuindo o maior peso dos custos às estruturas e equipamentos que integram o OSBL e ISBL: StC=0,08% do FCI; IC=15% do FCI; e WC=10% do TCI.

$$\text{TCI} = \text{FCI} + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = [(\text{DC}) + \text{IC}] + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = [(\text{ISBL} + 1,00 \times \text{ISBL}) + \text{IC}] + \text{WC} + 0,08 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [(100 + 1,00 \times 100) + \text{IC}] + \text{WC} + 0,08 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [200 + \text{IC}] + \text{WC} + 0,08 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [200 + 35] + \text{WC} + 0,08 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [235] + \text{WC} + 0,08 \times 235$$

$$\text{TCI} = 235 + 18,80 + \text{WC}$$

$$\text{TCI} = 253,80 + \text{WC}$$

$$\text{TCI} = 253,80 + 28,20$$

$$\text{TCI} = \mathbf{282}$$

Proposta GTL#2 – Cálculo proposto para o TCI de típicas plantas GTL. Proposta de maior grau de incerteza, reduzindo o peso dos custos que compõem das estruturas e equipamentos que integram o OSBL e ISBL: StC=10% do FCI; IC=35% do FCI; e WC=20% do TCI.

$$\text{TCI} = \text{FCI} + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = [(\text{DC}) + \text{IC}] + \text{WC} + \text{StC}$$

$$\text{TCI} = [(\text{ISBL} + 1,00 \times \text{ISBL}) + \text{IC}] + \text{WC} + 0,10 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [(100 + 1,00 \times 100) + \text{IC}] + \text{WC} + 0,10 \times \text{FCI}$$

$$\text{TCI} = [200 + \text{IC}] + \text{WC} + 0,10 \times \text{FCI}$$

$$TCI = [200+107,69] + WC + 0,10 \times FCI$$

$$TCI = [307,69] + WC + 0,10 \times 307,69$$

$$TCI = 307,69 + 30,76 + WC$$

$$TCI = 338,45 + WC$$

$$TCI = 338,45 + 84,61$$

$$TCI = 423,06$$

Proposta BTL#1 – Cálculo proposto para o TCI de típicas plantas BTL. Proposta conservadora, atribuindo o maior peso dos custos às estruturas e equipamentos que integram o OSBL e ISBL: StC=0,08% do FCI; IC=15% do FCI; e WC=10% do TCI.

$$TCI = [(DC)+IC] + WC + StC$$

$$TCI = [(ISBL+1,00 \times ISBL)+IC] + WC + 0,08 \times FCI$$

$$TCI = [(134,5+1,00 \times 134,5)+IC] + WC + 0,08 \times FCI$$

$$TCI = [269+IC] + WC + 0,08 \times FCI$$

$$TCI = [269+47,47] + WC + 0,08 \times FCI$$

$$TCI = [316,47] + WC + 0,08 \times 316,47$$

$$TCI = 316,47+25,31 + WC$$

$$TCI = 341,78 + WC$$

$$TCI = 341,78 + 37,97$$

$$TCI = 379,75$$

Proposta BTL#2 – Cálculo proposto para o TCI de típicas plantas BTL. Proposta de maior grau de incerteza, reduzindo o peso dos custos que compõem das estruturas e equipamentos que integram o OSBL e ISBL: StC=10% do FCI; IC=35% do FCI; e WC=20% do TCI.

$$TCI = [(DC)+IC] + WC + StC$$

$$TCI = [(ISBL+1,00 \times ISBL)+IC] + WC + 0,10 \times FCI$$

$$TCI = [(134,5+1,00 \times 134,5)+IC] + WC + 0,10 \times FCI$$

$$TCI = [269+IC] + WC + 0,10 \times FCI$$

$$TCI = [269+144,84] + WC + 0,10 \times FCI$$

$$TCI = [413,84] + WC + 0,10 \times 413,84$$

$$TCI = 413,84+41,38 + WC$$

$$TCI = 455,22 + WC$$

$$TCI = 455,22 + 41,38 \rightarrow TCI = 505,80$$

Pasta2.xlsx - Microsoft Excel

Formatação Condicional: Formatar como Tabela, Estilos de Célula, Inserir, Excluir, Formatar, Localizar e Filtar e Selecionar

Alinhamento: Número, % 000, 0,00, 0,00

Fonte: Times New Rom 10, A, I, S, N

Layout da Página: Início, Fórmulas, Dados, Revisão, Exibição

Modelagem: Economia de Escala (2), Florestas Energéticas

Pronto

K12 $f_k = ((34000/H12)^{J12}) * 45547$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		BIOMASSA	COMBUSTIVEL			ECONOMIA							
	MW/ano	ton/ano	ton/mês	ton/mês	L/mês	L/dia	bb/dia	FE	1-FE	ICI Esp	TCI		
1													
2													
3													
4	0,10	2.386	199	22	22.465	749	5	-	-	-	-		
5	1,00	23.856	1.988	225	224.648	7.488	47	-	-	-	-		
6	1,10	26.242	2.187	247	247.113	8.237	52	-	-	-	-		
7	2,10	50.098	4.175	472	471.760	15.725	99	-	-	-	-		
8	3,00	71.569	5.964	674	673.943	22.465	141	-	-	-	-		
9	3,10	73.955	6.163	696	696.408	23.214	146	-	-	-	-		
10	20,00	477.128	39.761	4.493	4.492.955	149.765	942	0,56	0,44	220.670,59	207.853.903,43		
11	20,10	479.514	39.959	4.515	4.515.420	150.514	947	0,56	0,44	220.186,86	208.435.255,71		
12	30,00	506.548	42.212	4.770	4.769.994	159.000	1.000	0,56	0,44	214.936,79	214.936.502,47		
13		715.692	59.641	6.739	6.739.433	224.648	1.413	0,56	0,44	184.613,86	260.837.056,07		
14	0,10	2.386	199	22	22.465	749	5	-	-	-	-		
15	1,00	23.856	1.988	225	224.648	7.488	47	-	-	-	-		
16	5,00	119.282	9.940	1.123	1.123.239	37.441	235	-	-	-	-		
17	5,10	121.668	10.139	1.146	1.145.704	38.190	240	-	-	-	-		
18	15,00	357.846	29.821	3.370	3.369.717	112.324	706	0,55	0,45	260.340,39	183.914.737,51		
19	15,10	360.232	30.019	3.392	3.392.181	113.073	711	0,55	0,45	259.563,12	184.588.083,27		
20	30,00	715.692	59.641	6.739	6.739.433	224.648	1.413	0,56	0,44	184.613,86	260.837.056,07		
21	30,10	718.078	59.840	6.762	6.761.898	225.397	1.418	0,56	0,44	184.343,74	261.323.595,42		
22	100,00	2.385.640	198.803	22.465	22.464.777	748.826	4.710	0,60	0,40	100.428,70	472.978.696,04		
23	0,10	2.386	199	22	22.465	749	5	-	-	-	-		
24	0,20	4.771	398	45	44.930	1.498	9	-	-	-	-		
25	0,30	7.157	596	67	67.394	2.246	14	-	-	-	-		
26	0,50	11.928	994	112	112.324	3.744	24	-	-	-	-		
27	1,00	23.856	1.988	225	224.648	7.488	47	-	-	-	-		
28	4,10	97.811	8.151	921	921.056	30.702	193	-	-	-	-		
29	10,00	238.564	19.880	2.246	2.246.478	74.883	471	0,54	0,46	326.112,59	153.585.880,23		
30	10,10	240.950	20.079	2.269	2.268.942	75.631	476	0,54	0,46	324.623,33	154.413.345,67		
31	100,00	2.385.640	198.803	22.465	22.464.777	748.826	4.710	0,60	0,40	100.428,70	472.978.696,04		
58													
59													
60													
61													

Figura B.8 Cálculos do TCI Total por região do Brasil – Parte 1

Fonte: (Elaboração própria).

Pasta2.xlsx - Microsoft Excel

Formatação Condicional: Formatar como Tabela, Estilos de Célula, Formatar, Excluir, Inserir, Classificar e Filtrar, Localizar e Selecionar

Fonte: Times New Roman, 10, Negrito, Itálico, Sublinhado, Cor, Bordas, Alinhamento, Número, Estilo, Células

Equação: $f_x = ((34000/H56)^{H56}) * 45547$

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	BIOMASSA			COMBUSTÍVEL			ECONOMIA				
	MW/ano	ton/ano	ton/mês	ton/mês	L/mês	L/dia	bb/dia	FE	1-FE	TCI Esp	TCI
32	0,10	2.386	199	22	22.465	749	5	-	-	-	-
33	2,00	47.713	3.976	449	449.296	14.977	94	-	-	-	-
34	2,10	50.098	4.175	472	471.760	15.725	99	-	-	-	-
35	5,00	119.282	9.940	1.123	1.123.239	37.441	235	-	-	-	-
36	5,10	121.668	10.139	1.146	1.145.704	38.190	240	-	-	-	-
37	15,00	357.846	29.821	3.370	3.369.717	112.324	706	0,55	0,45	260.340,39	183.914.737,51
38	15,10	360.232	30.019	3.392	3.392.181	113.073	711	0,55	0,45	259.563,12	184.588.083,27
39	40,00	954.256	79.521	8.986	8.985.911	299.530	1.884	0,57	0,43	158.025,41	297.694.376,22
40	40,10	956.642	79.720	9.008	9.008.375	300.279	1.889	0,57	0,43	157.855,83	298.118.362,96
41	80,00	1.908.512	159.043	17.972	17.971.821	599.061	3.768	0,59	0,41	112.247,30	422.911.625,65
42	0,10	2.386	199	22	22.465	749	5	-	-	-	-
43	1,00	23.856	1.988	225	224.648	7.488	47	-	-	-	-
44	1,10	26.242	2.187	247	247.113	8.237	52	-	-	-	-
45	5,00	119.282	9.940	1.123	1.123.239	37.441	235	-	-	-	-
46	5,10	121.668	10.139	1.146	1.145.704	38.190	240	-	-	-	-
47	10,00	238.564	19.880	2.246	2.246.478	74.883	471	0,54	0,46	326.112,59	153.585.880,23
48	10,10	240.950	20.079	2.269	2.268.942	75.631	476	0,54	0,46	324.623,33	154.413.345,67
49	20,00	477.128	39.761	4.493	4.492.955	149.765	942	0,56	0,44	220.670,59	207.853.903,43
50	20,10	479.514	39.959	4.515	4.515.420	150.514	947	0,56	0,44	220.186,86	208.435.255,71
51	50,00	1.192.820	99.402	11.232	11.232.388	374.413	2.355	0,57	0,43	143.567,32	338.072.105,07
52		2.532.743	211.062	23.850	23.850.000	795.000	5.000	0,60	0,40	98.053,55	490.267.772,90
53		5.065.487	422.124	47.700	47.700.000	1.590.000	10.000	0,64	0,36	70.760,71	707.607.108,54
54		10.130.973	844.248	95.400	95.400.000	3.180.000	20.000	0,70	0,30	53.406,54	1.068.130.826,48
55		17.222.655	1.435.221	162.180	162.180.000	5.406.000	34.000	0,78	0,22	45.547,00	1.548.598.000,00
56		22.794.690	1.899.558	214.650	214.650.000	7.155.000	45.000	0,84	0,16	43.549,42	1.959.724.018,05
57											
58											

Pronto

Figura B.9 Print Screen de cálculos do TCI Total por região do Brasil – Parte 2

Fonte: (Elaboração própria).